



## Globaler Klimawandel

Wasserwirtschaftliche  
Folgenabschätzung für das Binnenland

Gesamtbericht des Projektes KliBiW  
Themenbereich Niedrigwasser



**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, Dr.-Ing. Anne Fangmann,  
Luisa-Bianca Thiele



Technische Universität Braunschweig,  
Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie,  
Wasserwirtschaft und Gewässer-schutz:  
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: August 2019, 200 Stück

## Bezug:

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



## Globaler Klimawandel

Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung  
für das Binnenland



## Kurzfassung

Im Projekt KliBiW (Phase 5) wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftigen Niedrigwasser-Verhältnisse in den niedersächsischen Fließgewässern untersucht. Neben der Analyse der vergangenen Entwicklung der Klima- und Abflussverhältnisse wurden zukünftige Veränderungen von Trockenwetter- und Niedrigwasserindizes auf Basis von Klimamolldaten ermittelt. Zusätzlich wurde eine regio-nale Starkregenstatistik für Niedersachsen erstellt.

Im Projekt wurden zwei verschiedene Klimamodellensembles betrachtet, eines davon basierend auf dem gemäßigten Klimaszenario SRES A1B, das andere basierend auf dem „Weiter-wie-bisher“-Szenario RCP8.5. Die Auswertungen wurden für zwei Zukunftszeiträume durchgeführt, eine nahe Zukunft (2021-2050) und eine ferne Zukunft (2071-2100), jeweils bezogen auf den Referenzzeitraum 1971-2000.

Die Simulation der zukünftigen Niedrigwasserabflüsse auf Basis von Klimamolldaten erfolgte mit zwei verschiedenen Impaktmodellen, einem Wasserhaushaltsmodell sowie einem statistischen Prognosemodell, welche jeweils auf einem unterschiedlichen Ansatz beruhen. Während das Wasserhaushaltsmodell die Gesamtheit aller hydrologischen Prozesse im Detail nachbildet, fokussiert sich das statistische Modell ausschließlich auf die für Niedrigwasser relevanten meteorologischen und physiographischen Einflussfaktoren. Durch diesen Ansatz kann es, im Gegensatz zum Wasserhaushaltsmodell, auch Abflüsse in unbeobachteten Gebieten mittels statistischer Zusammenhänge simulieren. Mit dem Wasserhaushaltsmodell wurden Simulationen für die sieben ausgewählten Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Große Aue, Hase, Hunte, Ilmenau, Vechte und Wümme durchgeführt. Mit dem statistischen Modell erfolgten Prognosen für Teileinzugsgebiete in ganz Niedersachsen. Die Ergebnisse der beiden verwendeten Impaktmodelle wurden im Anschluss an die Einzelauswertung zusammengeführt und für verschiedene Naturräume ausgewertet.

Die Untersuchungen in KliBiW 5 kamen zu folgenden Ergebnissen:

### 1.) Starkregenanalyse

Im Rahmen von KliBiW 5 konnte eine regionale Starkregenstatistik für Niedersachsen erstellt werden. Eine Betrachtung zukünftiger Veränderungen war aufgrund der zu geringen zeitlichen Auflösung bzw. schlechten Qualität hochaufgelöster Klimamolldaten nicht möglich. Die Ergebnisse der Starkregenanalyse werden in Kapitel 3.3 dargelegt.

### 2.) Klimatische Entwicklung

#### *Trendanalysen seit 1961*

Die mittlere Temperatur hat in Niedersachsen seit 1960 flächendeckend um mehr als 1°C zugenommen. Der Temperaturanstieg ist nicht kontinuierlich verlaufen, sondern durch einen deutlichen Bruchpunkt (sprunghafter Anstieg) um das Jahr 1988 gekennzeichnet.

Zukünftige Entwicklung

Die Klimasignalanalyse zeigt, dass bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einer weiteren deutlichen Zunahme der mittleren Temperatur zu rechnen ist. Im Winter wird mit bis zu +4°C durch beide Klimamodellensembles der stärkste Temperaturanstieg projiziert. Trockenperioden werden sich auf Basis des A1B-Szenarios in der fernen Zukunft im Sommer verschärfen, während die Dauer von Niederschlagsereignissen abnimmt. Das RCP8.5-Szenario deutet auf eine ähnliche Entwicklung hin, die Bandbreiten sind hier allerdings relativ groß.

### 3.) Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse

#### *Trendanalysen seit 1961*

Die Trendanalysen zeigen, dass die mittleren Abflüsse (MQ) im Sommerhalbjahr seit 1960 in ganz Niedersachsen zurückgegangen sind. Der NM7Q hat in einigen Regionen, vor allem im Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet, ebenfalls deutlich abgenommen, und auch andere Niedrigwasserkenngrößen zeigen eine Verschärfung der Niedrigwassersituation an. Wie bei der mittleren Temperatur ist auch die Entwicklung der Niedrigwasserkenngrößen durch einen Bruchpunkt im Jahr 1988 gekennzeichnet.

#### *Ergebnisse aus dem statistischen Prognosemodell und dem Wasserhaushaltsmodell*

Die Ergebnisse aus statistischem Prognosemodell und Wasserhaushaltsmodell deuten in der nahen Zukunft in den meisten Regionen auf eine Entspannung der Niedrigwasserverhältnisse hin. In der fernen Zukunft fallen die Ergebnisse, je nach Region, sehr unterschiedlich aus. Auf Basis des A1B-Szenarios kommt es in ganz Niedersachsen zu einer Verschärfung der Niedrigwassersituation. Unter Betrachtung des RCP8.5-Szenarios gibt es deutliche regionale Unterschiede. Während sich im östlichen Flachland eher eine Entspannung der Niedrigwasserverhältnisse andeutet, ist die Entwicklung im westlichen Flachland nicht eindeutig. Im Berg- und Hügelland sowie im Harz wird eine tendenzielle Verschärfung der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse projiziert, allerdings standen für den Harz ausschließlich Ergebnisse des statistischen Prognosemodells Verfügung.





## Inhalt

|          |  |           |           |  |            |
|----------|--|-----------|-----------|--|------------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....  | <b>8</b>  | 5.5       | Anpassung der Klimamodelldaten an die Beobachtung (Bias-Adjustierung).....   | 41         |
| <b>2</b> | <b>Projektgrundlagen</b> .....   | <b>9</b>  | 5.5.1     | Methodik.....  | 41         |
| 2.1      | Organisation.....  | 9         | 5.5.2     | Ergebnisse.....  | 41         |
| 2.2      | Untersuchungsgebiet.....   | 9         | <b>6</b>  | <b>Analyse der möglichen klimatischen Verhältnisse der Zukunft</b> .....   | <b>43</b>  |
| 2.3      | Vorgehensweise.....  | 10        | 6.1       | Robustheit von Klimaänderungssignalen.....   | 43         |
| 2.4      | Untersuchte Trockenwetter- und Niedrigwasserkenngrößen.....                        | 11        | 6.2       | Analyse ausgewählter Trockenwetter-Indizes.....  | 44         |
| <b>3</b> | <b>Betrachtung der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit bis heute</b> ..... | <b>12</b> | 6.3       | Analyse der möglichen Starkregenverhältnisse der Zukunft.....  | 58         |
| 3.1      | Regionalisierung von Klimadaten.....   | 12        | 6.4       | Zusammenfassung.....   | 58         |
| 3.1.1    | Datenbasis.....  | 12        | <b>7</b>  | <b>Analyse der möglichen hydrologischen Verhältnisse der Zukunft</b> .....   | <b>59</b>  |
| 3.1.2    | Methodik.....  | 12        | 7.1       | Ermittlung veränderter zukünftiger Niedrigwasserverhältnisse mit einem statistischen Prognosemodell.....           | 59         |
| 3.1.3    | Ergebnisse.....  | 12        | 7.1.1     | Modellbeschreibung.....  | 59         |
| 3.2      | Trendanalysen ausgewählter Trockenwetterindizes.....                               | 15        | 7.1.2     | Modellanpassung.....   | 59         |
| 3.2.1    | Datenbasis.....  | 15        | 7.1.3     | Simulation ausgewählter Niedrigwasserkenngrößen.....   | 62         |
| 3.2.2    | Methodik.....  | 15        | 7.1.4     | Zusammenfassung.....   | 64         |
| 3.2.3    | Ergebnisse.....  | 16        | 7.2       | Modellierung zukünftiger Niedrigwasserverhältnisse mit dem hydrologischen Modellsystem PANTA RHEI.....             | 65         |
| 3.2.4    | Zusammenfassung.....   | 16        | 7.2.1     | Modellbeschreibung.....  | 65         |
| 3.3      | Durchführung einer regionalen Starkregenanalyse für Niedersachsen.....             | 19        | 7.2.2     | Modellerweiterungen.....   | 68         |
| 3.3.1    | Datenbasis.....  | 19        | 7.2.3     | Modellaufbau der untersuchten Einzugsgebiete.....  | 69         |
| 3.3.2    | Index-Verfahren.....   | 19        | 7.2.4     | Kalibrierung und Validierung.....  | 70         |
| 3.3.3    | Validierung.....   | 23        | 7.2.5     | Simulationen mit Klimamodelldaten.....   | 73         |
| 3.3.4    | Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....  | 23        | 7.2.6     | Zusammenfassung.....   | 82         |
| <b>4</b> | <b>Betrachtung der Abflussverhältnisse der Vergangenheit bis heute</b> .....       | <b>24</b> | 7.3       | Zusammenführung der Ergebnisse aus hydrologischer Modellierung und statistischer Prognose.....                     | 83         |
| 4.1      | Trendanalysen ausgewählter Niedrigwasserindizes.....                               | 24        | <b>8</b>  | <b>Abschätzung der regionalen Bedeutung zukünftig veränderter Niedrigwasserverhältnisse in Niedersachsen</b> ..... | <b>86</b>  |
| 4.1.1    | Datenbasis.....  | 24        | 8.1       | Grundsätzliches.....   | 86         |
| 4.1.2    | Methodik.....  | 24        | 8.2       | Vorgehensweise.....  | 87         |
| 4.1.3    | Ergebnisse.....  | 24        | 8.3       | Ergebnisse.....  | 88         |
| 4.1.4    | Zusammenfassung.....   | 25        | 8.4       | Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....  | 92         |
| <b>5</b> | <b>Die Klimamodell-Ensembles von KliBiW</b> .....                                  | <b>30</b> | <b>9</b>  | <b>Ausblick</b> .....  | <b>93</b>  |
| 5.1      | Klimaszenarien.....  | 30        | <b>10</b> | <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....   | <b>94</b>  |
| 5.2      | Auswahl von WETTREG-Realisationen.....   | 33        | <b>11</b> | <b>Tabellenverzeichnis</b> .....   | <b>98</b>  |
| 5.3      | Regionalisierung der Klimamodelldaten.....   | 34        | <b>12</b> | <b>Literaturverzeichnis</b> .....  | <b>99</b>  |
| 5.3.1    | Regionalisierung der Daten der statistischen Klimamodelle.....                     | 34        | <b>13</b> | <b>Abkürzungsverzeichnis und Glossar</b> .....   | <b>102</b> |
| 5.3.2    | Regionalisierung der Daten der dynamischen Klimamodelle.....                       | 35        | <b>14</b> | <b>Anhang</b> .....  | <b>104</b> |
| 5.4      | Validierung der Klimamodelldaten anhand von Beobachtungsdaten.....                 | 38        |           |  |            |
| 5.4.1    | Methodik.....  | 38        |           |  |            |
| 5.4.2    | Ergebnisse.....  | 38        |           |  |            |

## 1 Einleitung

Der Klimawandel ist auch in Niedersachsen bereits spürbar. Seit 1881 ist es hier zu einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur um  $+1,5^{\circ}\text{C}$  gekommen (DWD, 2018a), und es sind weitere Temperaturzunahmen und Veränderungen im Niederschlagsregime zu erwarten.

Zukünftige Klimaveränderungen werden sich auch auf die Niedrigwasserverhältnisse in den niedersächsischen Binnengewässern auswirken. DIN 4049 definiert Niedrigwasser als einen Zustand, der auftritt, wenn der gemessene Abfluss in einem Fließgewässer einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet. Natürliche Niedrigwasserereignisse entstehen aus der Kombination verschiedener meteorologischer und hydrologischer Bedingungen. Auslöser ist meist eine längere Trockenperiode, die zu geringen Abflüssen führt. Hitze und hydrologische Voraussetzungen, etwa die Höhe der Grundwasserstände, können das Ausmaß von Niedrigwasserperioden zusätzlich beeinflussen. Daneben kann es aber auch anthropogenen Einflüssen, wie z.B. Einleitungen und Entnahmen, unterliegen (LAWA, 2007).

Das Jahr 2018 war das deutschlandweit bisher wärmste und eines der niederschlagsärmsten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen (DWD, 2018b). Infolgedessen kam es auch in Niedersachsen zu einer ausgeprägten Niedrigwasserphase mit weitreichenden Folgen für Wasserwirtschaft, Schifffahrt und Ökologie. Die Nachfrage nach Trinkwasser war so hoch wie seit Jahrzehnten nicht mehr, viele Wasserwerke arbeiteten am Limit (Harzwasserwerke, 2018). Nach 2003 und 2011 hat das vergangene Jahr einmal mehr verdeutlicht, vor welche Herausforderungen uns extreme Wetterereignisse stellen können und dass eine frühzeitige Anpassung entscheidend sein kann.

Bereits in Projektphase 3 hat sich die KliBiW-Projektgruppe mit den Folgen des Klimawandels für die Niedrigwasserverhältnisse in Niedersachsen beschäftigt (NLWKN, 2015). In Projektphase 5 wurden Methodik, Klimamodellensemble und Untersuchungsgebiet erweitert und die gewonnenen Erkenntnisse aktualisiert. Der vorliegende Bericht stellt die durchgeführten Analysen und Ergebnisse detailliert dar und gibt Empfehlungen für die Berücksichtigung der Erkenntnisse in Anpassungsstrategien.



## 2 Projektgrundlagen

### 2.1 Organisation

Das Projekt KliBiW (Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland) beschäftigt sich seit dem Jahr 2008 mit den Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft in Niedersachsen. Es wird gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU). Unter der Leitung des Niedersächsischen Landesbetriebes für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) bearbeiten das Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Leibniz Universität Hannover (WAWI LUH) sowie das Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig (LWI TUBS) gemeinsam die Projektaufgaben. In den Projektphasen 1-3 war außerdem die Harzwasserwerke GmbH beteiligt. In Projekt-phase 5 stand die Analyse zukünftiger Niedrigwasserabflüsse im Fokus. Außerdem wurde eine Starkregenregionalisierung für Niedersachsen durchgeführt. Abbildung 2-1 gibt einen Überblick über die Arbeitsschwerpunkte der beteiligten Projektpartner.

### 2.2 Untersuchungsgebiet

In KliBiW 5 wurden klimatische sowie hydrologische Untersuchungen für Niedersachsen durchgeführt. Die Auswertung von Klimamodelldaten und die Analyse möglicher zukünftiger klimatischer Veränderungen erfolgte für die gesamte niedersächsische Landesfläche. Trendanalysen von meteorologischen und hydrologischen Indizes wurden für die jeweils zur Verfügung stehenden Pegel- und Klimastationen durchgeführt. Die Simulation der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse erfolgte mit zwei verschiedenen Impaktmodellen, dem hydrologischen Modell PANTA RHEI (TUBS) und einem statistischen Prognosemodell (LUH). Mit PANTA RHEI wurden Simulationen für die sieben Teileinzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Große Aue, Hase, Hunte, Ilmenau, Vechte und Wümme durchgeführt (vgl. Abbildung 2-3). Die Auswahl stellt die im Rahmen der vorläufigen Bewertung nach der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EG-HWRM-RL) ermittelten Risikogewässer dar.

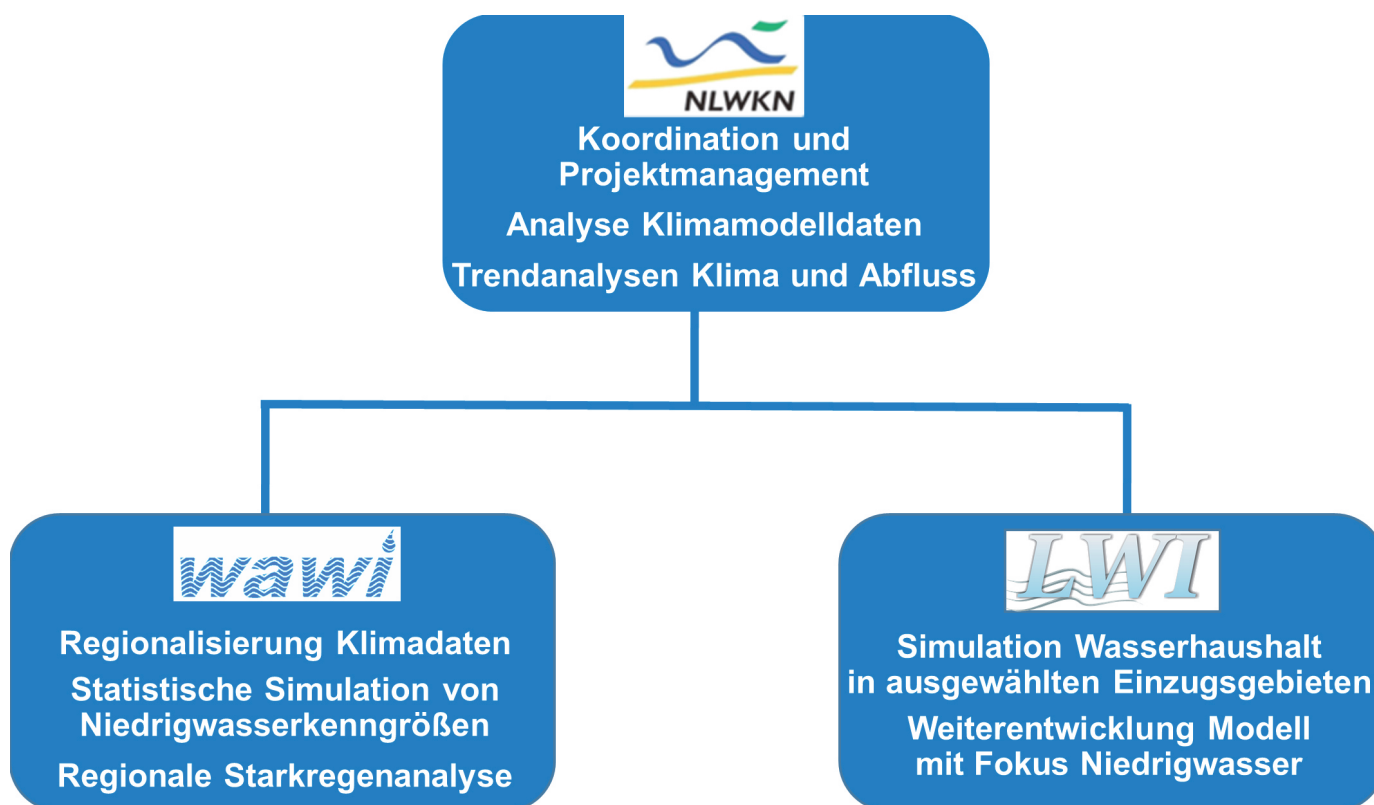


Abbildung 2-1: Beteiligte Projektpartner mit Arbeitsschwerpunkten

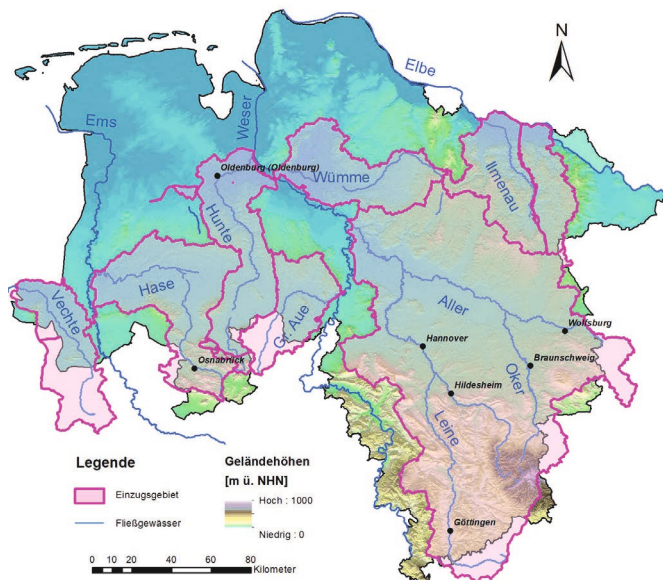


Abbildung 2-3: Untersuchungsgebiet

Bei der statistischen Niedrigwasserprognose wurden Pegel in ganz Niedersachsen betrachtet. Durch die Zusammenführung der Ergebnisse aus hydrologischer und statistischer Simulation können somit niedersachsenweite Untersuchungsergebnisse über mögliche zukünftige Veränderungen von Niedrigwasserkenngößen bereitgestellt werden. Die regionale Starkregenanalyse erfolgte auf Basis der zur Verfügung stehenden Niederschlagsstationen für ganz Niedersachsen. Informationen über die für die einzelnen Methoden jeweils verwendeten Stationen können den jeweiligen Unterkapiteln entnommen werden.

## 2.3 Vorgehensweise

Die Projektarbeiten in KliBiW 5 wurden in mehreren aufeinander aufbauenden Teilprojekten durchgeführt. Abbildung 2-2 stellt die wesentlichen Schritte der durchgeführten Analysen dar. Zur Untersuchung der vergangenen Entwicklung wurden, basierend auf Pegel- und meteorologischen Stationsdaten auf Tageswertbasis, Trendanalysen von Klima- und Niedrigwasserindizes durchgeführt. Zur Untersuchung der zukünftigen Entwicklung wurden regionale Klimamodelldaten auf Tageswertbasis herangezogen. Am NLWKN erfolgte der Download und die weitere Aufbereitung dieser Daten. Hierzu zählte u.a. die BIAS-Adjustierung und Interpolation der Daten auf ein 10x10 km Raster. Anschließend wurden Änderungssignale verschiedener klimatischer Indizes (Trockenwetterindizes) für zwei Zukunftszeiträume ermittelt. Daneben gingen die Klimamodelldaten in zwei Impaktmodelle ein, ein statistisches Prognosemodell (WAWI LUH) sowie ein hydrologisches Modell (LWI TUBS). Die Modelle wurden anhand von Klimabeobachtungsdaten kalibriert, welche zuvor auf ein 1x1 km-Raster interpoliert worden sind. Mit beiden Impaktmodellen erfolgte dann die Simulation der zukünftigen Abflüsse. Zusätzlich wurde eine Starkregenregionalisierung für Niedersachsen (WAWI LUH) durchgeführt.

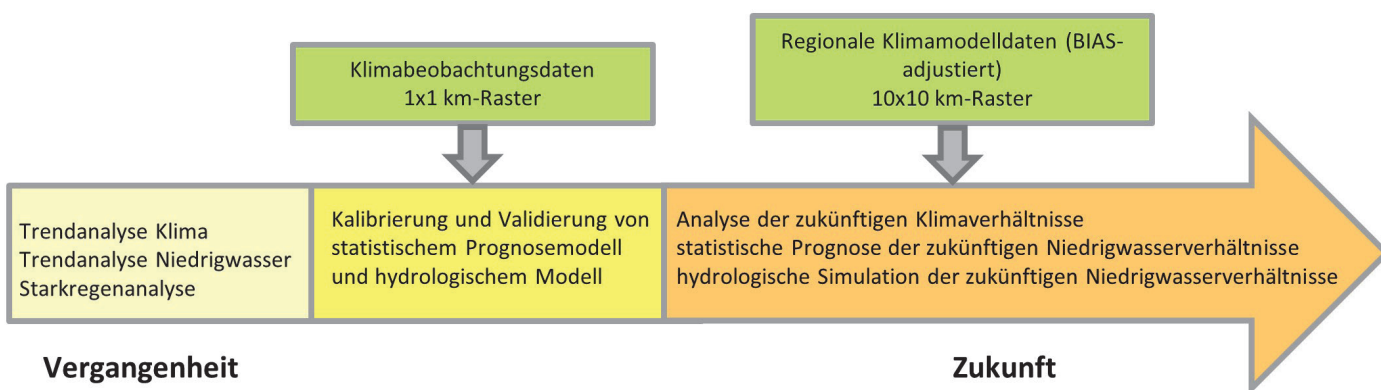


Abbildung 2-2: Arbeitsschritte der durchgeführten Analysen

## 2.4 Untersuchte Trockenwetter- und Niedrigwasserkenngrößen

Neben den hydrologischen Vorbedingungen wird ein Niedrigwasserereignis maßgeblich durch meteorologische Ereignisse hervorgerufen und in seinem Ausmaß beeinflusst. Aus diesem Grund wurden in KliBiW 5 relevante Temperatur- und Niederschlagskenngrößen untersucht, die im Folgenden beschrieben werden.

**Tav** beschreibt die mittlere Temperatur eines Zeitabschnittes. Die maximale Hitzewelldauer (engl. maximum heat wave duration) **HWDmax** ist ein Kennwert für die maximale Andauer von Tagen mit stark überdurchschnittlicher Temperatur. Zur Berechnung wird für jeden der 365 Tage im Jahr das individuelle 90%-Langzeitquantil der Tagesmaximaltemperatur berechnet. Als Grundlage zur Berechnung des Langzeitquantils wird die 30-jährige Referenzperiode (1971-2000) verwendet. Für jeden Tag im Jahr stehen zur Berechnung des maßgeblichen tagesspezifischen Schwellenwertes also 30 Werte zur Verfügung. Das 90%-Langzeitquantil ergibt sich dann aus dem Temperaturwert, der an 10% der Tage (also an 3 Tagen) überschritten wird. Zur Ermittlung der HWDmax wird nun die maximale Anzahl an aufeinanderfolgenden Tagen, an denen das individuelle 90%-Langzeitquantil überschritten wird, aufsummiert.

**Psum** beschreibt die Niederschlagssumme eines Zeitabschnittes. Bei der Berechnung werden nur Tage berücksichtigt, an denen mindestens 1 mm Niederschlag gefallen ist.

Zur Charakterisierung besonders feuchter bzw. trockener Perioden ist neben der Summe des gefallenen Niederschlags ebenfalls wichtig, wie lange ein Niederschlagsereignis andauert. In KliBiW 5 wurden dazu zwei verschiedene Kenngrößen untersucht, die mittlere Dauer eines Niederschlagsereignisses **WSDmean** sowie die maximale Dauer eines Niederschlagsereignisses **WSDmax**. Auch hier wurden ausschließlich Tage mit einer Niederschlagssumme von mindestens 1 mm berücksichtigt.

Zur Beschreibung von niederschlagsfreien Perioden wurden die maximale Trockendauer **Pxcdd** sowie die Anzahl an Trockentagen **Pnnd** untersucht. Pxcdd beschreibt die maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage eines Zeitabschnittes, an denen weniger als 1 mm Niederschlag gefallen ist. Pnnd beschreibt die Gesamtsumme aller niederschlagsfreien Tage ( $N < 1\text{mm}$ ) eines Zeitraums.

Ein Niedrigwasserereignis wird charakterisiert durch einen geringen Abfluss und durch die Andauer dieses geringen Abflusses. Zur Analyse der Niedrigwasserhältnisse wurden in KliBiW daher die im Folgenden beschriebenen Kenngrößen ausgewählt. Eine schematische Darstellung der Indizes findet sich in Abbildung 2-4.

Das **MQ** beschreibt den mittleren Abfluss eines Zeitabschnittes. In KliBiW 5 wurde das MQ zur Charakterisierung des gesamten Niedrigwasserjahres (01.04. - 31.03.) sowie des Sommerhalbjahres (01.04. - 30.09.) und des Winterhalbjahres (01.10. - 31.03.) berechnet.

Der **NM7Q** ist ein häufig verwendeter Abflusskennwert zur Beschreibung des jährlichen Niedrigwasserabflusses.

Es handelt sich dabei um das Jahresminimum des gleitenden Abflussmittelwertes über 7 aufeinanderfolgende Tage. Neben der Betrachtung eines einzelnen Jahres wurde auch der **NM7Q10** berechnet, also der Wert, der statistisch einmal in 10 Jahren zu erwarten ist.

Zur Ermittlung der Andauer von Niedrigwasserereignissen wurde die maximale Trockendauer **maxD** untersucht. Der Kennwert beschreibt die maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage innerhalb eines Jahres, an denen ein bestimmter Abflussschwellenwert ( $Q_s$ ) unterschritten wird. Als Schwellenwert wurde in KliBiW 5 das 20%-Langzeitquantil des Abflusses am jeweiligen Pegel definiert (bezogen auf den Referenzzeitraum 1971-2000), also der Abflusswert, der innerhalb dieser 30 Jahre an 20% aller Tage unterschritten wird. Der Schwellenwert ist damit kein fixer Wert, sondern wird individuell für jeden betrachteten Pegel berechnet.

Neben der maximalen Dauer wurde mit der Kenngröße **sumD** auch die Summe aller Niedrigwasserperioden betrachtet, berechnet als die Anzahl aller Tage eines Jahres, an denen  $Q_s$  unterschritten wird.

Die Niedrigwasserkenngröße **maxV** beschreibt das Abflussdefizitvolumen während der maximalen Trockendauer eines Jahres. Der Kennwert wird berechnet als Volumendifferenz zwischen dem Abflussschwellenwert  $Q_s$  und dem tatsächlichen Abfluss  $Q$  (mit  $Q < Q_s$ ).

Zusätzlich zu **maxV** wurde mit **sumV** auch die Summe aller Abflussdefizitvolumina eines Jahres ermittelt.

Eine Beschreibung der untersuchten Indizes findet sich auch in der DVWK-Regel 120/1983 zur Niedrigwasseranalyse (DVWK, 1983).

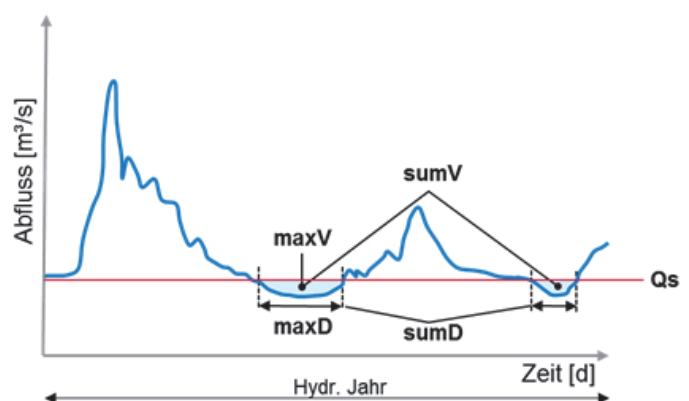


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der untersuchten Niedrigwasserindizes



### 3 Betrachtung der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit bis heute

#### 3.1 Regionalisierung von Klimadaten

Für die Betrachtung der aktuellen 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), zu beziehen über das WAWI LUH.

##### 3.1.1 Datenbasis

Insgesamt standen Zeitreihen von maximal 924 Niederschlagsstationen und 165 Klimastationen in Niedersachsen und benachbarten Bundesländern für den Zeitraum von 1951 bis 2017 auf Tageswertbasis zur Verfügung (Abbildung 3-1).

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 x 1 km bereitgestellt:

- korrigierte Niederschlagshöhe in mm
- unkorrigierte Niederschlagshöhe in mm
- Temperaturmittel in °C (tav)
- Temperaturminimum in °C (tmi)
- Temperaturmaximum in °C (tma)
- Windgeschwindigkeit in m/s (win)
- relative Luftfeuchte in % (hum)
- Sonnenscheindauer in h (sun)
- Globalstrahlung in W/m<sup>2</sup> (glo)

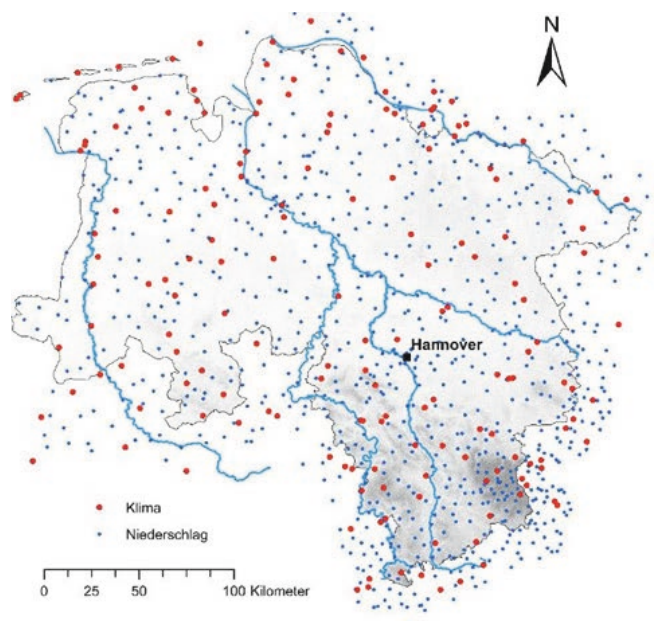


Abbildung 3-1: Lage der verfügbaren Niederschlags- und Klimastationen

##### 3.1.2 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 in Form des Quadrantenverfahrens (INVD)
- Ordinary Kriging (OK)
- Kriging mit externer Drift (EDK)

In den vorangegangenen Phasen des KliBiW-Projekts erfolgte die Regionalisierung der Klimadaten von Januar 1951 bis Dezember 2015 (NLWKN, 2012; NWLKN, 2015; NLWKN, 2017). In der aktuellen Phase wurden die Zeitreihen bis 2017 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.

##### 3.1.3 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 Ångström, 1924).

Für den Zeitraum von Januar 1951 bis Dezember 2015 sind die mittleren Klimaverhältnisse der beobachteten Klimadaten in Abbildung 3-2 dargestellt.

Die mittlere, nach Richter (1995) korrigierte Jahresniederschlagshöhe weist einen Wertebereich von etwa 650 bis 1610 mm auf. Der Mittelwert beträgt etwa 850 mm. Die Hälfte der Fläche Niedersachsens liegt in der Spannbreite zwischen etwa 790 und 890 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 niedrigen 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 Spannbreite 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 4,4 °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 Niedersachsens liegt im Bereich zwischen 8,9 und 9,3 °C mit einem Mittelwert von etwa 9,1 °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 Niedersachsens liegt in der Spannbreite von etwa 12,8 bis 13,3 °C mit einem Mittelwert von 13,0 °C.

Die mittlere tägliche Windgeschwindigkeit weist Werte von etwa 1,8 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 des Landes Niedersachsen liegt im Bereich von 2,3 bis 2,6 m/s mit einem Mittelwert von 2,5 m/s.

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 Spannbreite 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 Niedersachsens liegt in der Spannbreite 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/m<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup> mit einem Mittelwert von etwa 106 W/m<sup>2</sup>.

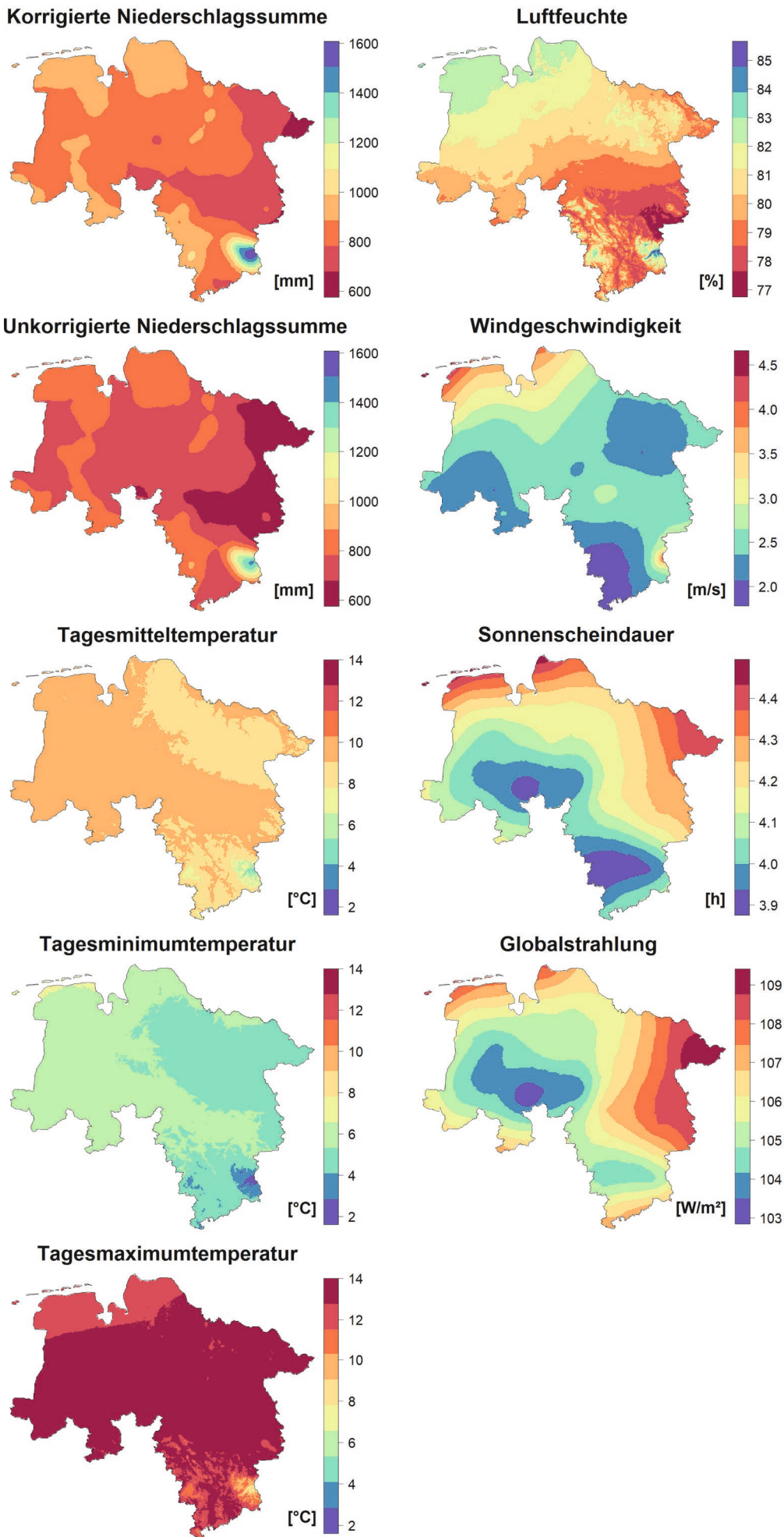


Abbildung 3-2: Mittel der interpolierten Klimavariablen für den Zeitraum 1951 bis 2015



## 3.2 Trendanalysen ausgewählter Trockenwetterindizes

### 3.2.1 Datenbasis

Für die Trendanalysen von Trockenwetterindizes wurden die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) auf dem CDC-Sever bereitgestellten Stationszeitreihen auf Tageswertbasis verwendet. Die Zeitreihen besitzen unterschiedliche Reihenlängen. Um einen möglichst langen Betrachtungszeitraum zu analysieren, wurden Zeitreihen mit einer kontinuierlichen Aufzeichnung von 1960 bis 2017 selektiert. Hierbei galt zusätzlich das Kriterium, dass eine Station einen maximalen Fehlwertanteil von 5% aufweisen durfte. Auf Basis dieser Auswahl standen für Trendanalysen von Niederschlagsindizes 162 Stationen und für Trendanalysen von Temperaturindizes 63 Klimastationen zur Verfügung (Abbildung 3-3). Die Analyse der mittleren Temperatur wurde für drei verschiedene Zeiträume durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2.3), weshalb für jeden Zeitabschnitt jeweils eine Teilmenge der insgesamt 63 Stationen, je nach Reihenlänge und Fehlwertanteil, ausgewählt wurde.

### 3.2.2 Methodik

Die Trendanalysen wurden für die in Tabelle 3-1 aufgeführten meteorologischen Kenngrößen durchgeführt. Die Kenngrößen sind in Kapitel 2.4 detailliert erläutert. Analog zu den Abflussdaten erfolgten die Analysen für den Zeitraum 1960 bis 2017 jeweils für das Niedrigwasserjahr (01.04. bis 31.03.) sowie für das Sommerhalbjahr (01.04. bis 30.09.) und das Winterhalbjahr (01.10. bis 31.03.). Die Trendstärke wurde anhand des Verfahrens nach Theil und Sen (Theil, 1950; Sen, 1968) berechnet. Es handelt sich dabei um eine nicht-parametrische Methode, bei der die Steigung des Trends als Median der Steigung der Linien durch alle möglichen Punktepaare berechnet wird. Der Trendschätzung ist dadurch robuster gegenüber „Ausreißern“ als bspw. die Methode der linearen Regression. Die Bewertung der Signifikanz erfolgte anhand des rangbasierten Mann-Kendall-Trendtests (Kendall, 1975; Mann, 1945). Es handelt sich um ein nicht-parametri-

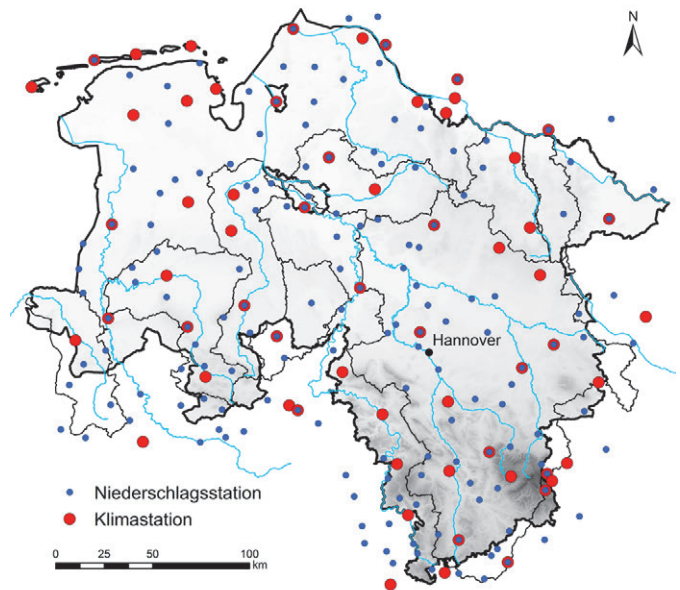


Abbildung 3-3: Bei der Trendanalyse untersuchte Niederschlags- und Klimastationen

ches Verfahren. Da der Test anfällig gegenüber Autokorrelation ist, wurde zur Entfernung der Autokorrelation ein Pre-Whitening nach Yue et al. (2002) durchgeführt. Dafür wurde zunächst der mittels Theil-Sen-Verfahren geschätzte Trend von der Zeitreihe subtrahiert. Danach wurde der Autokorrelationskoeffizient mit einer Zeitdifferenz von 1 berechnet. War dieser statistisch signifikant, wurde er von der Zeitreihe entfernt. Im Anschluss wurde der zuvor entfernte Trend erneut auf die Zeitreihe addiert. Neben der Bestimmung von Trendstärke und -signifikanz wurde im Rahmen der Untersuchungen zusätzlich eine Bruchpunktanalyse nach Pettitt (1979) durchgeführt.

Tabelle 3-1: Bei der Trendanalyse betrachtete meteorologische Kenngrößen

| Index                          | Einheit | Beschreibung   |
|--------------------------------|---------|--|
| <b>Temperaturkenngrößen</b>    |         |  |
| Tav                            | °C      | Mittlere Tagesmitteltemperatur                                     |
| <b>Niederschlagskenngrößen</b> |         |  |
| Psum1                          | mm      | Summe der Niederschläge für Tage mit $N \geq 1$ mm/d               |
| Pxcd                           | d       | Maximale Anzahl aufeinander folgender Trockentage mit $N < 1$ mm/d |

### 3.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Trendanalysen der mittleren Temperatur sind in Abbildung 3-5 dargestellt. Die Bruchpunktanalyse ergab einen sprunghaften Anstieg in der Temperaturentwicklung im Jahr 1988 (vgl. Abbildung 3-4). Aus diesem Grund wurden die Analysen der Temperaturkenngrößen in einen Zeitraum vor dem Bruchpunkt (1960 bis 1987) und einen Zeitraum nach dem Bruchpunkt (1987 bis 2017) aufgeteilt. Zusätzlich ist der Gesamtzeitraum dargestellt.

Für den Gesamtzeitraum konnten -mit Ausnahme von zwei Stationen im Winterhalbjahr- an allen Klimastationen signifikante Zunahmen der mittleren Temperatur um bis zu 2°C, im Gesamtjahr teilweise etwas höher, festgestellt werden. Innerhalb der Teil-Zeiträume vor und nach dem Bruchpunkt ergaben sich fast ausschließlich nicht signifikante Temperaturänderungen. Lediglich im Zeitraum 1988 bis 2017 gab es einige signifikante Temperaturzunahmen im Sommerhalbjahr.

Die Niederschlagsindizes waren vom Bruchpunkt nicht betroffen, daher erfolgte die Auswertung ausschließlich über den Gesamtzeitraum von 1960 bis 2017. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-6 dargestellt. Bei den mittleren Niederschlägen konnten im Gesamtjahr überwiegend leichte Zunahmen festgestellt werden, die bis auf einzelne Stationen im nördlichen Niedersachsen jedoch statistisch nicht signifikant waren. Im Sommerhalbjahr kam es im nordöstlichen und südwestlichen Niedersachsen zu überwiegend leichten, statistisch aber nicht signifikanten Zunahmen des mittleren Niederschlags. In den restlichen Teilen Niedersachsens konnten leichte Niederschlagsabnahmen beobachtet werden, die jedoch nur an vereinzelt Stationen signifikant waren. Im Winterhalbjahr wurden deutlichere Trends verzeichnet. Vor allem im nördlichen Niedersachsen, aber auch im südlichen ALO-Gebiet und an weiteren Stationen im zentralen und westlichen Niedersachsen ist es seit 1960 zu einer Zunahme der mittleren Niederschläge um bis zu 75 % gekommen. Die maximale Anzahl aufeinander folgender Trockentage hat sich seit 1960 sowohl im Gesamtjahr als auch im Sommer- und Winterhalbjahr wenig verändert.

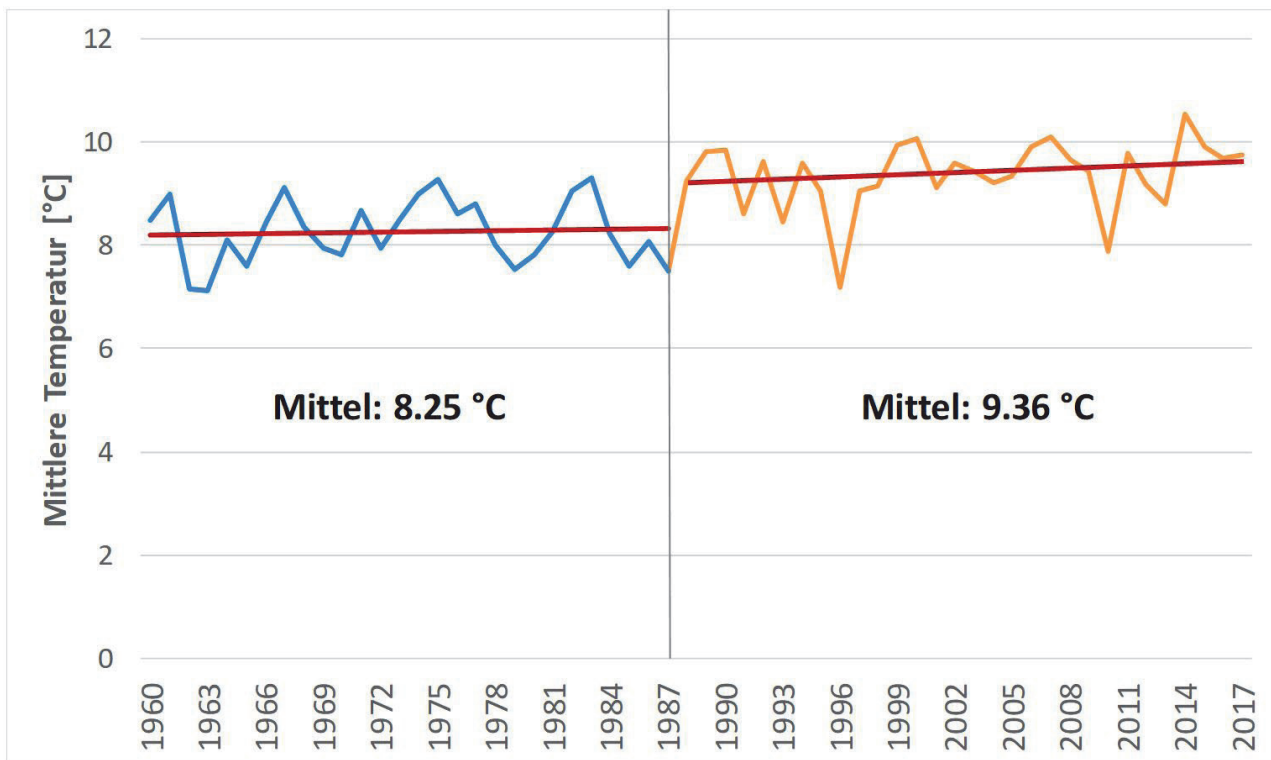


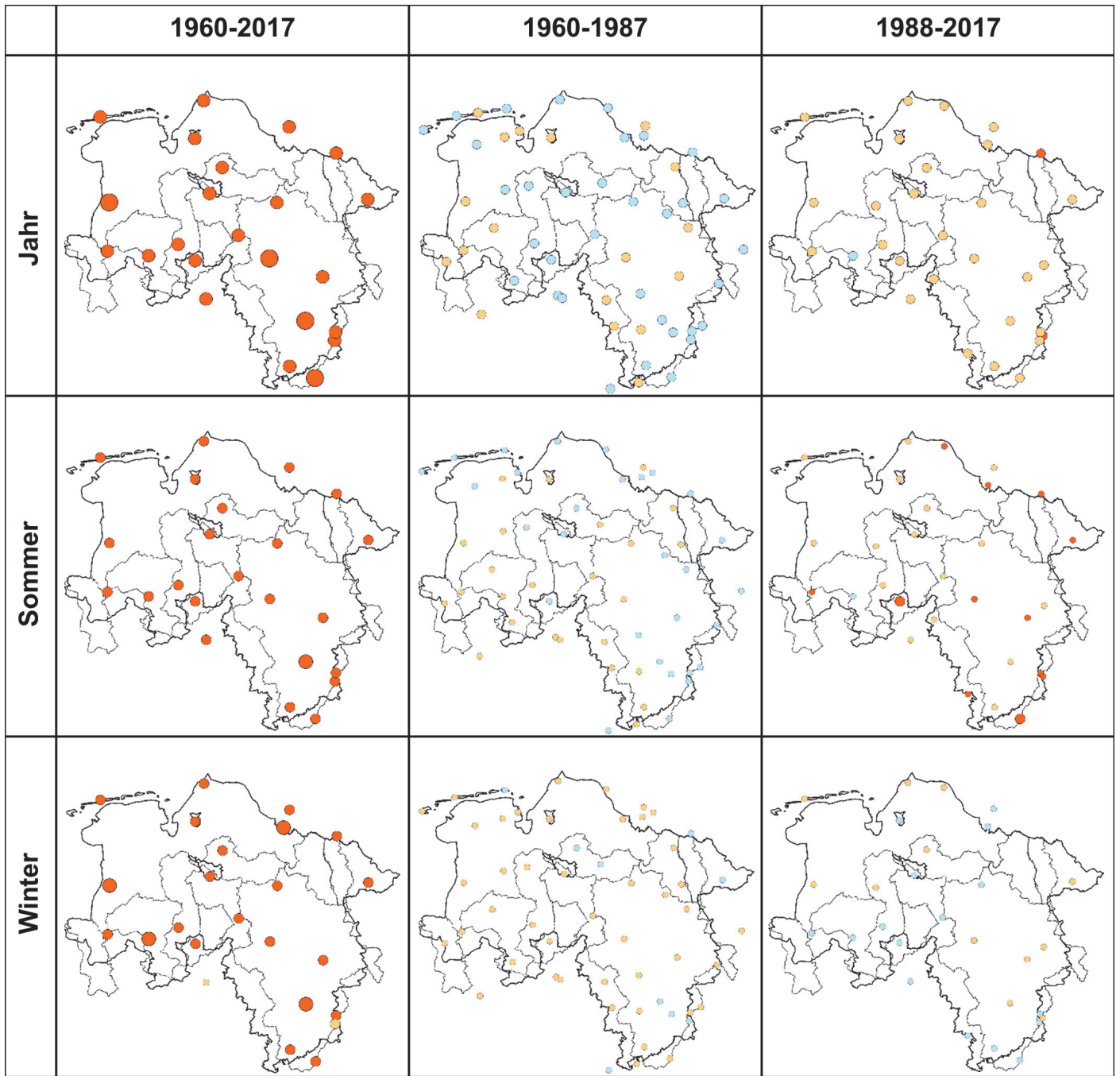
Abbildung 3-4: Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur von 1960 bis 2017, gemittelt über alle verfügbaren Klimastationen mit Aufzeichnungen über den Gesamtzeitraum. Der Bruchpunkt im Jahr 1988 ist durch eine vertikale Linie gekennzeichnet. Vor und nach dem Bruchpunkt sind die linearen Trends als rote Linien eingezeichnet.

### 3.2.4 Zusammenfassung

Bezüglich der vergangenen Entwicklung meteorologischer Kenngrößen lassen sich folgende Punkte festhalten:

- Die mittleren Temperaturen haben seit 1960 um mehr als 1°C zugenommen. Die Entwicklung ist durch einen sprunghaften Anstieg der Temperatur um das Jahr 1988 gekennzeichnet.

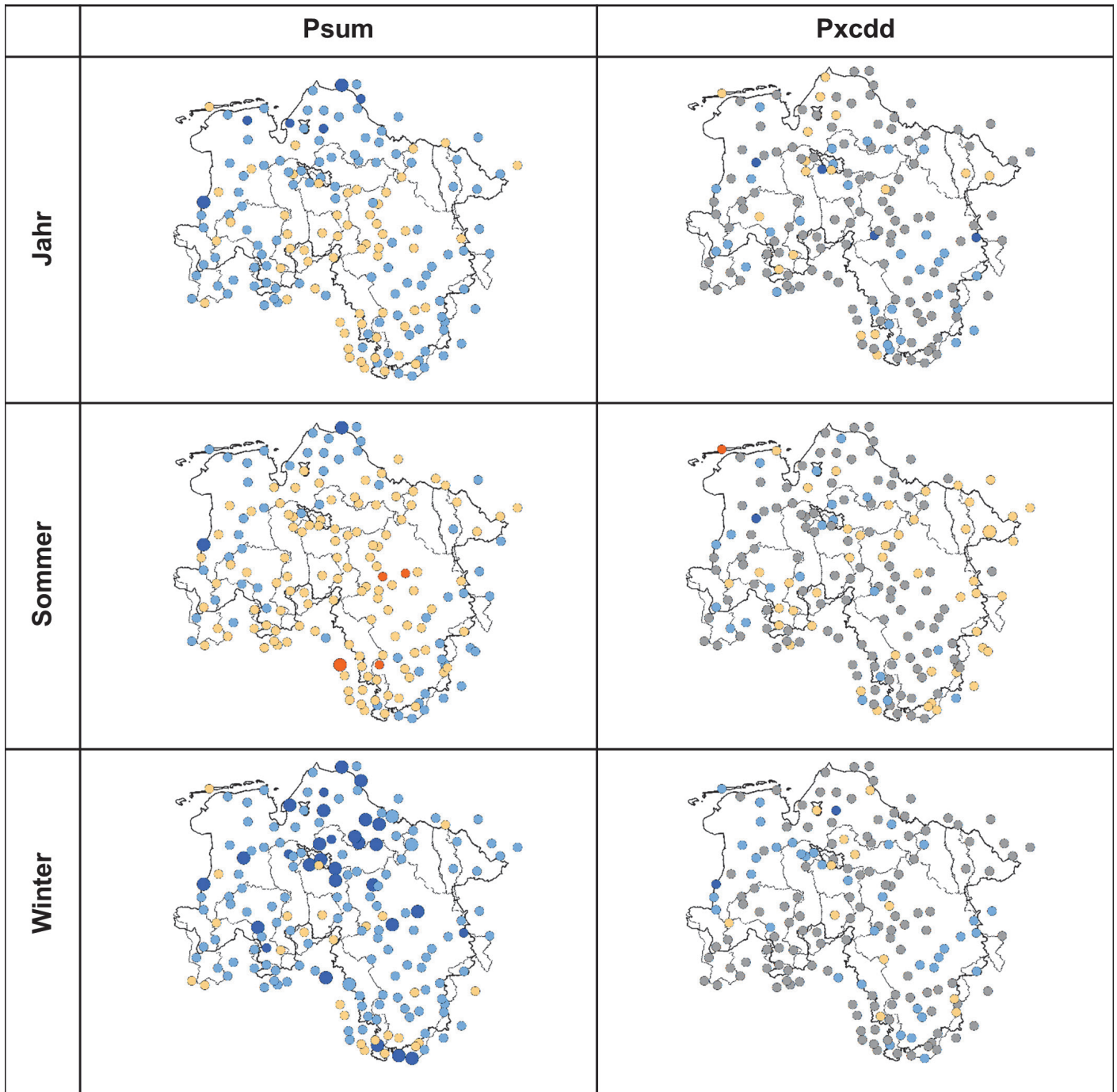
- Die mittleren Niederschläge haben sich seit 1960 nur im Winter signifikant geändert. Hier gab es deutliche Zunahmen im nördlichen Niedersachsen.
- Die maximale Dauer von Trockenphasen hat sich seit 1960 nicht signifikant geändert.



**Trendstärke [°C]**

- > 2
- 1 bis 2
- 0 bis 1
- < 0

Abbildung 3-5: Trends der mittleren Temperatur (Tav); kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant.



**Trendstärke [%]**

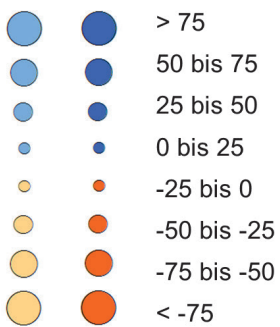


Abbildung 3-6: Trends des mittleren Niederschlags (Psum) und der maximalen Anzahl aufeinander folgender Trockentage (Pxcd) für den Zeitraum 1960-2017; kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant; graue Färbung: Trend gleich null.



### 3.3 Durchführung einer regionalen Starkregenanalyse für Niedersachsen

Die detaillierte Untersuchung des Niederschlags ist Bestandteil aller bisherigen KliBiW Projektphasen. Da Niederschlagsereignisse zeitlich und räumlich stark variieren, wurde in KliBiW Phase 5 ein weiterer Schwerpunkt auf die Analyse von Starkregen gelegt. Als Starkregen werden Niederschlagsereignisse mit besonders hoher Intensität (und meist kurzer Dauer) bezeichnet, die häufig durch konvektive Regenereignisse ausgelöst werden und somit hauptsächlich in den Sommermonaten auftreten. Starkregen können zu Hochwasser und Sturzfluten führen. Somit stellen statistische Auswertungen von Starkregen eine wichtige Bemessungsgröße in der Wasserwirtschaft und im Wasserbau dar. Mit der „Koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung und Auswertung des DWD“ KOSTRA-DWD-2010R stehen diese Bemessungswerte in Abhängigkeit der Dauer (5 min – 72 h) und der Jährlichkeit (1 a – 100 a) in etwa 67 km<sup>2</sup> großen Rasterfeldern für ganz Deutschland zur Verfügung. Den methodischen Rahmen für lokale Starkregenanalysen in Deutschland, um KOSTRA-Bemessungsregen zu ergänzen, bildet das Arbeitsblatt DWA-A 531 „Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer“. Aus den KOSTRA-Bemessungswerten lassen sich keine Änderungen für die Zukunft ableiten. Außerdem stand im Rahmen des Projekts eine erweiterte Niederschlagsdatenbasis, die nicht in KOSTRA-2010R enthalten ist, zur Verfügung, und auch die Methodik zur lokalen Starkregenstatistik wurde in den letzten Jahren weiterentwickelt. Deshalb war das Ziel des Teilprojekts eine regionale Starkregenanalyse kurzer Dauerstufen (< 24 h) für Niedersachsen sowie die Ableitung von Änderungssignalen für die Zukunft (siehe Kapitel 6.3).

#### 3.3.1 Datenbasis

Für die Starkregenanalyse kurzer Dauerstufen sind hochaufgelöste Niederschlagsdaten erforderlich. Insgesamt stehen Zeitreihen mit einer Länge von mindestens zehn Jahren an 169 Niederschlagsstationen in Niedersachsen und benachbarten Bundesländern für den Zeitraum 1994 bis 2016 auf Minutenwertbasis zur Verfügung (vgl. Abbildung 3-7). Die Niederschlagszeitreihen wurden zunächst einer Qualitätsprüfung unterzogen und anschließend zu 5-Minuten-Daten aggregiert. 19 der 169 Niederschlagsstationen (DIGI-Stationen) verfügen zudem über Zeitreihen mit einer Reihenlänge von mehr als 30 Jahren in 5-Minuten Auflösung für die Monate Mai bis September im Zeitraum von 1951 bis 2010. Nach DWA-A 531 sind Daten aus den Sommermonaten für Aussagen über kurze Dauerstufen ausreichend. Die Analyse des Auftretszeitpunkts von Starkregen der vollständigen Zeitreihen für Dauerstufen bis 24 h in Niedersachsen bestätigt diese Annahme, sodass diese Daten ohne Einschränkungen für die Analyse verwendet werden können. Als Zusatzinformation für die Interpolation konnten außerdem die Niederschlagszeitreihen auf Tageswertbasis genutzt werden. Zum Vergleich der Ergebnisse mit den KOSTRA-Bemessungswerten werden außerdem die KOSTRA-Bemessungswerte an den 19 DIGI-Stationen extrahiert.

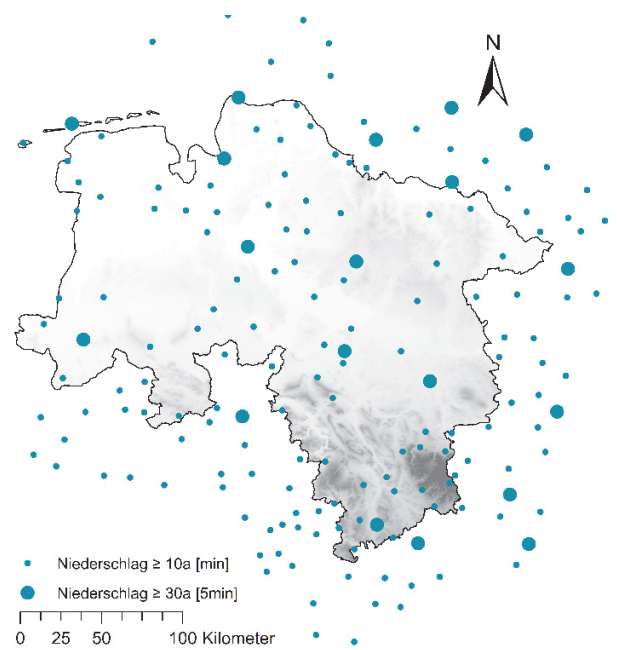


Abbildung 3-7: Verfügbare Niederschlagsstationen

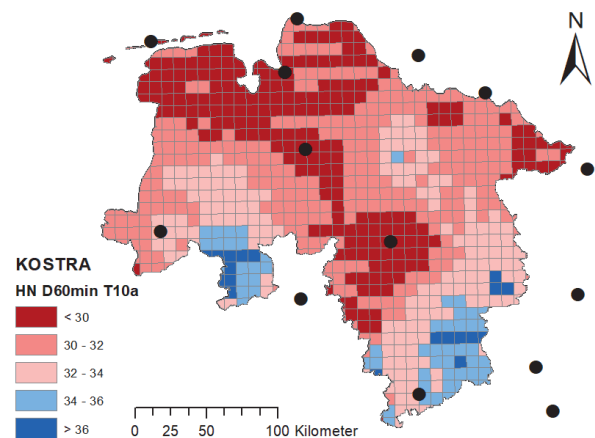


Abbildung 3-8: KOSTRA-2010R-Bemessungswerte für die Dauerstufe 60 min und die Jährlichkeit 10 a in Niedersachsen, mit Lage der DIGI-Stationen (schwarze Punkte)

Abbildung 3-8 zeigt die KOSTRA-Bemessungsniederschläge für Niedersachsen mit der Dauerstufe 60 min und der Jährlichkeit 10 a sowie die hochaufgelösten Niederschlagsstationen für Niedersachsen, die für KOSTRA-DWD-2010 analysiert wurden.

#### 3.3.2 Index-Verfahren

Das ursprünglich für die Regionalisierung von Hochwasserquantilen entwickelte Index-Flood Verfahren nach Hosking und Wallis (1997) erweist sich ebenfalls als geeignet für die Regionalisierung von Starkregen. Die Idee des Index-Verfahrens ist die Bündelungen von Informationen in statistisch homogenen Regionen, um so eine robustere Schätzung der Starkregen zu gewährleisten und die Informationen auf unbeobachtete Punkte in der Region zu übertragen. Im Fall der Extremwertstatistik kann von einer homogenen Region ausgegangen werden, wenn an allen Punkten der Region die Verteilungsfunktionen, welche das Auftreten extremer Ereignisse beschreiben, die gleiche Form aufweisen. Unterschiedlich starke Ausprägungen der Verteilungsfunktion können



dabei durch einen Skalierungsfaktor, dem Index, homogenisiert werden. Die geostatistische Interpolation dieses Index ermöglicht anschließend die Übertragung der extremwertstatistischen Auswertungen auf unbeobachtete Punkte innerhalb der homogenen Region. Bei der Regionalisierung von Starkregen kann Deutschland als insgesamt eine homogene Region behandelt werden (Malitz & Ertel, 2015), weshalb in diesem Projekt Niedersachsen mit den zusätzlichen Informationen der Niederschlagsstationen aus umliegenden Bundesländern ebenfalls als eine homogene Region betrachtet wird.

Ein besonderer Punkt, dem bei der Regionalisierung von Starkregenereignissen Rechnung zu tragen ist, ist die Abhängigkeit der Starkregen von der Dauerstufe und der Jährlichkeit. Die Dauerstufe gibt dabei an, über welche Zeit ein Starkregen beobachtet wurde. Die Jährlichkeit beschreibt, wie häufig ein solcher Starkregen auftritt, z.B. im Mittel alle 10 Jahre bei einer Jährlichkeit von 10 a. Im Rahmen des Projekts werden die Dauerstufen 5 min, 10 min, 15 min, 45 min, 60 min, 90 min, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 9 h, 12 h, 18 h und 24 h sowie Jährlichkeiten von 1 a bis 100 a untersucht. Die Dauerstufen werden somit einzeln voneinander betrachtet.

In einem ersten Schritt wird ausgehend von den Zeitreihen in 5-Minuten Auflösung eine Zeitreihe für jede Dauerstufe gebildet. Wenn die Regenhöhen mit einem festen Zeitschritt zu einer größeren Auflösung aggregiert werden, kann dies zu einer Unterschätzung der Regenhöhen für diese Dauerstufe führen. Deswegen werden überlappende Summen verwendet, um die Zeitreihen für jede Dauerstufe zu generieren. Für die Dauerstufe 15 min bedeutet das beispielsweise, dass jeweils die Summe aus drei aufeinanderfolgenden 5-Minuten Niederschlägen gebildet und dabei das drei Intervalle breite Fenster jeweils um 5-Minuten verschoben wird. Für jede Dauerstufe werden anschließend jährliche Serien aus der größten Regenhöhe pro Jahr gebildet.

Im zweiten Schritt werden die jährlichen Serien jeder Dauerstufe skaliert, um die Starkregenhöhen zu homogenisieren. Als Index wird üblicherweise der Mittelwert der jährlichen Serien verwendet. Da der Index so für jede Dauerstufe variieren würde, wurde im Rahmen des Projekts überprüft, ob ein gemeinsamer Index für alle Dauerstufen verwendet werden kann. Tabelle 3-2 zeigt die Korrelation zwischen den Mittelwerten der jährlichen Serien verschiedener Dauerstufen  $D$  ( $mHN_{a,D}$ ) sowie den mittleren Jahresniederschlägen ( $N$ ). Insbesondere kurze Dauerstufen korrelieren nicht mit dem mittleren jährlichen Niederschlag, was zeigt, dass der mittlere jährliche Niederschlag als Index grundsätzlich ungeeignet ist.

Die Korrelation zwischen benachbarten Dauerstufen ist jeweils am größten, sodass der Mittelwert der jährlichen Serie der Dauerstufe 1 h ( $mHN_{a,1h}$ ) als Index für alle Dauerstufen als geeignet erscheint. Die Validierung dieser Hypothese durch den Vergleich der regionalen Starkregenstatistik mit einem gemeinsamen und einem Index pro Dauerstufe bestätigt die Eignung des  $mHN_{a,1h}$  als Index für alle Dauerstufen.

In einem dritten Schritt werden die lokalen  $L$  Momente auf Basis der normierten jährlichen Serien ( $nHN_{a,D}$ ) für jede Dauerstufe geschätzt. Im vierten Schritt werden die regionalen  $L$  Momente für jede Dauerstufe mittels der lokalen  $L$  Momente geschätzt. Die lokalen  $L$  Momente werden dabei entsprechend ihrer Zeitreihenlänge gewichtet (vgl. Formel 3-1).

$$LR_{D,i} = \sum \frac{n^{lokal} * L_{D,i}}{n^{reg}} \quad \text{Formel 3-1}$$

$LR_{D,i}$  ... regionales  $L$  - Moment  $i$  der Dauer  $D$

$L_{D,i}$  ... lokales  $L$  - Moment  $i$  der Dauer  $D$

$n^{reg}$  ... regionaler Stichprobenumfang

$n^{lokal}$  ... lokaler Stichprobenumfang

**Tabelle 3-2: Korrelationskoeffizient nach Pearson zwischen den Mittelwerten der jährlichen Serien ( $mHN_{a,D}$ ) der Dauerstufen  $D$  und den mittleren jährlichen Niederschlägen ( $N$ )**

|                 | $mHN_{a,5min}$ | $mHN_{a,15min}$ | $mHN_{a,30min}$ | $mHN_{a,1h}$ | $mHN_{a,2h}$ | $mHN_{a,4h}$ | $mHN_{a,9h}$ | $mHN_{a,18h}$ | $N$ |
|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----|
| $mHN_{a,5min}$  | 1.0            |                 |                 |              |              |              |              |               |     |
| $mHN_{a,10min}$ | 0.9            | 1.0             |                 |              |              |              |              |               |     |
| $mHN_{a,15min}$ | 0.9            | 1.0             | 1.0             |              |              |              |              |               |     |
| $mHN_{a,20min}$ | 0.9            | 0.9             | 1.0             | 1.0          |              |              |              |               |     |
| $mHN_{a,30min}$ | 0.8            | 0.9             | 0.9             | 1.0          | 1.0          |              |              |               |     |
| $mHN_{a,45min}$ | 0.7            | 0.8             | 0.9             | 0.9          | 1.0          | 1.0          |              |               |     |
| $mHN_{a,1h}$    | 0.7            | 0.8             | 0.8             | 0.9          | 0.9          | 1.0          |              |               |     |
| $mHN_{a,2h}$    | 0.6            | 0.7             | 0.7             | 0.8          | 0.8          | 0.9          | 0.9          |               |     |
| $mHN_{a,3h}$    | 0.5            | 0.6             | 0.7             | 0.7          | 0.8          | 0.8          | 0.9          | 1.0           |     |
| $mHN_{a,4h}$    | 0.5            | 0.6             | 0.7             | 0.7          | 0.8          | 0.8          | 0.9          | 1.0           | 1.0 |
| $mHN_{a,6h}$    | 0.5            | 0.6             | 0.6             | 0.7          | 0.7          | 0.8          | 0.8          | 0.9           | 0.9 |
| $mHN_{a,9h}$    | 0.5            | 0.5             | 0.6             | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.8          | 0.9           | 1.0 |
| $mHN_{a,12h}$   | 0.4            | 0.5             | 0.5             | 0.6          | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.8           | 0.8 |
| $mHN_{a,18h}$   | 0.4            | 0.5             | 0.5             | 0.6          | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.8           | 0.8 |
| $mHN_{a,24h}$   | 0.4            | 0.5             | 0.5             | 0.5          | 0.6          | 0.6          | 0.6          | 0.7           | 0.7 |
| $N$             | 0.3            | 0.3             | 0.2             | 0.2          | 0.2          | 0.3          | 0.3          | 0.3           | 0.3 |

In einem fünften Schritt wird für jede Dauerstufe über die regionalen L-Momente eine regionale Verteilungsfunktion angepasst. Die DWA-A 531 empfiehlt bei der Verwendung von jährlichen Serien die Anpassung der zweiparametrischen Gumbel-Verteilung. Im Rahmen des Projekts wurde die Anpassung verschiedener Verteilungsfunktionen, unter anderem die Allgemeine Extremwertverteilung (GEV) anhand der DIGI-Stationen getestet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass die Gumbel-Verteilung für die Mehrheit der Stationen und Dauerstufen geeignet ist, während die GEV für alle Stationen und bei allen Dauerstufen angepasst werden kann. Aus diesem Grund wird die GEV als regionale Verteilungsfunktion gewählt. Durch die getrennte Untersuchung der verschiedenen Dauerstufen, kann es bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse aller Dauerstufen allerdings zu Widersprüchen kommen, wenn die Regenhöhe bei gleicher Jährlichkeit mit zunehmender Dauer beispielsweise abnimmt. Die DWA-A 531 empfiehlt deshalb einen Ausgleich der Parameter der Verteilungsfunktion über die Dauerstufen. Der Lageparameter  $x$  sowie der Skalenparameter  $a$  der regionalen Verteilungsfunktion werden dabei über eine loglineare Regression (vgl. Formel 3-2 und Abbildung 3-9) ausgeglichen. Für den Formparameter  $k$  wird der Mittelwert über die Dauerstufen verwendet.

Formel 3-2

$$x_D = a \cdot \log(D) + b$$

- $x_D$ ...Lageparameter  $x$  der Dauer  $D$
- $D$ ...Dauerstufe
- $a, b$ ...Regressionsparameter

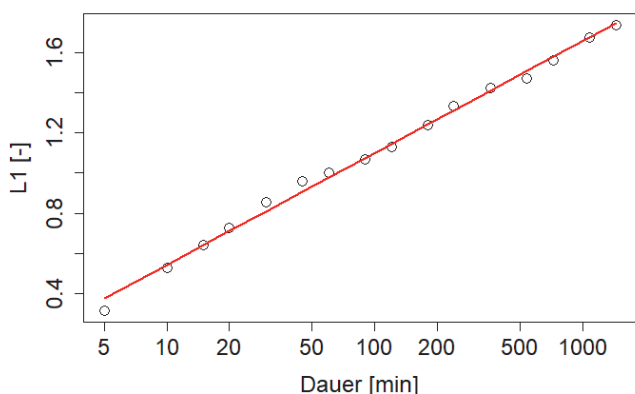


Abbildung 3-9: log-linearer Ausgleich des Lageparameters  $x$  über die Dauer

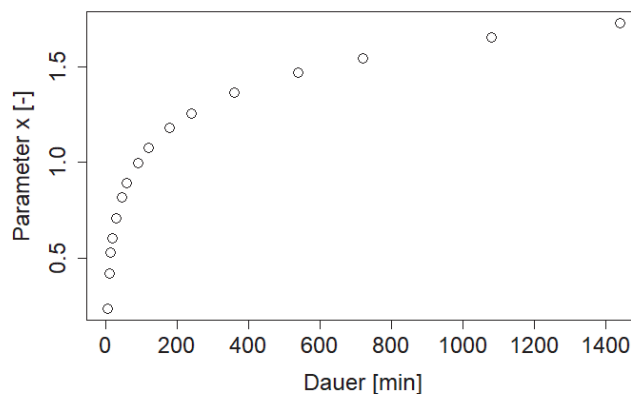


Abbildung 3-10: Lageparameter  $x$  der regionalen GEV über die Dauerstufen

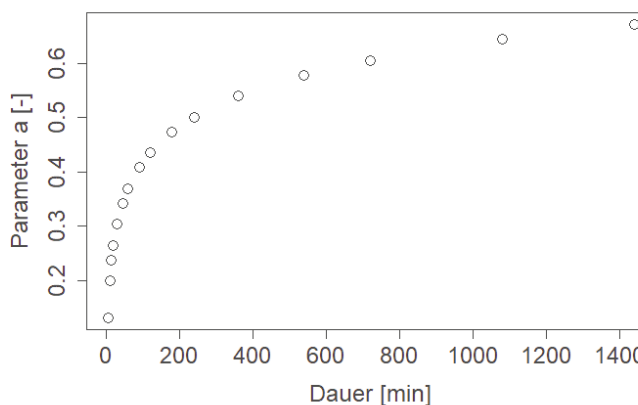


Abbildung 3-11: Skalenparameter  $a$  der regionalen GEV über die Dauerstufen

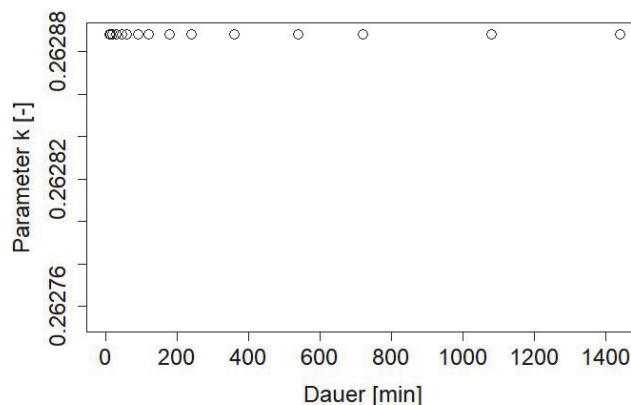


Abbildung 3-12: Formparameter  $k$  der regionalen GEV über die Dauerstufen

Tabelle 3-3: normierter Starkregen [-] in Abhängigkeit der Dauerstufe D und der Jährlichkeit T

| D [MIN] | T02  | T05  | T10  | T15  | T20  | T25  | T30  | T50  | T75  | T100 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5       | 0.27 | 0.40 | 0.50 | 0.56 | 0.60 | 0.63 | 0.65 | 0.73 | 0.79 | 0.83 |
| 10      | 0.46 | 0.65 | 0.79 | 0.87 | 0.93 | 0.97 | 1.01 | 1.11 | 1.20 | 1.26 |
| 15      | 0.57 | 0.80 | 0.96 | 1.05 | 1.12 | 1.17 | 1.21 | 1.34 | 1.44 | 1.51 |
| 20      | 0.65 | 0.90 | 1.08 | 1.18 | 1.25 | 1.31 | 1.36 | 1.50 | 1.61 | 1.69 |
| 30      | 0.76 | 1.04 | 1.24 | 1.36 | 1.45 | 1.51 | 1.57 | 1.72 | 1.85 | 1.94 |
| 45      | 0.87 | 1.19 | 1.41 | 1.54 | 1.64 | 1.71 | 1.77 | 1.95 | 2.09 | 2.19 |
| 60      | 0.95 | 1.29 | 1.53 | 1.67 | 1.78 | 1.85 | 1.92 | 2.11 | 2.26 | 2.37 |
| 90      | 1.06 | 1.44 | 1.70 | 1.86 | 1.97 | 2.06 | 2.13 | 2.33 | 2.50 | 2.62 |
| 120     | 1.14 | 1.54 | 1.82 | 1.99 | 2.10 | 2.20 | 2.27 | 2.49 | 2.67 | 2.80 |
| 180     | 1.25 | 1.68 | 1.99 | 2.17 | 2.30 | 2.40 | 2.48 | 2.72 | 2.91 | 3.05 |
| 240     | 1.33 | 1.79 | 2.11 | 2.30 | 2.43 | 2.54 | 2.63 | 2.88 | 3.08 | 3.23 |
| 360     | 1.44 | 1.93 | 2.28 | 2.48 | 2.63 | 2.74 | 2.83 | 3.10 | 3.32 | 3.48 |
| 540     | 1.55 | 2.07 | 2.45 | 2.66 | 2.82 | 2.94 | 3.04 | 3.33 | 3.56 | 3.73 |
| 720     | 1.63 | 2.18 | 2.56 | 2.79 | 2.95 | 3.08 | 3.19 | 3.49 | 3.73 | 3.91 |
| 1080    | 1.74 | 2.32 | 2.73 | 2.97 | 3.15 | 3.28 | 3.39 | 3.71 | 3.97 | 4.16 |
| 1440    | 1.82 | 2.42 | 2.85 | 3.10 | 3.28 | 3.42 | 3.54 | 3.87 | 4.14 | 4.34 |

Mit der regionalen Verteilungsfunktion können nun normierte Starkregen der jeweiligen Dauerstufe für eine bestimmte Jährlichkeit an allen beobachteten und unbeobachteten Punkten in der Region abgeleitet werden. Tabelle 3-3 zeigt die normierten Starkregen für verschiedene Dauerstufen und Jährlichkeiten.

Im sechsten Schritt wird der Index  $mHN_{a,1h}$  für ganz Niedersachsen auf ein 1 km x 1 km großes Raster interpoliert. Dabei wurden verschiedene Verfahren verglichen:

- Nächster Nachbar (NN)
- Multiple Lineare Regression (MLR)
- Ordinary Kriging (OK)
- Kriging mit externer Drift (EDK)

Als Zusatzvariable für die Multiple Lineare Regression sowie das Kriging mit External Drift stehen die Stationshöhe sowie der mittlere jährliche Niederschlag zur Verfügung. Da der mittlere jährliche Niederschlag nicht mit dem  $mHN_{a,1h}$  korreliert (vgl. Tabelle 3-2) wird das beste plausible Ergebnis durch Ordinary Kriging erreicht. Abbildung 3-13 zeigt den interpolierten Index  $mHN_{a,1h}$  auf einem 1 km x 1 km großen Raster für ganz Niedersachsen.

Im letzten Schritt können durch die Rückskalierung des normierten Starkregens für alle beobachteten und unbeobachteten Punkte auf dem 1 km x 1 km großen Raster Aussagen über den Starkregen in Abhängigkeit der Dauerstufe und der Jährlichkeit getroffen werden. Das räumliche Muster für Niedersachsen bleibt dabei für alle Dauerstufen gleich. Eine Übertragung der normierten Starkregen aus Tabelle 3-3 auf den interpolierten Index  $mHN_{a,1h}$  in Abbildung 3-13 erzeugt Starkregenkarten in Abhängigkeit der Dauerstufe und Jährlichkeit. Abbildung 3-14 zeigt beispielsweise die Starkregenkarte der Dauerstufe 1 h und Jährlichkeit 10 Jahre.

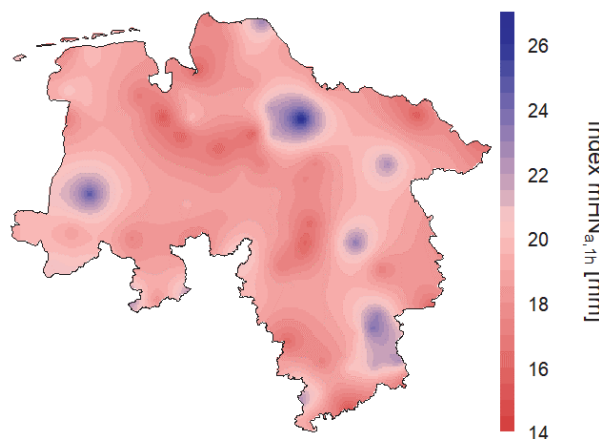


Abbildung 3-13: Interpolierter Index  $mHN_{a,1h}$

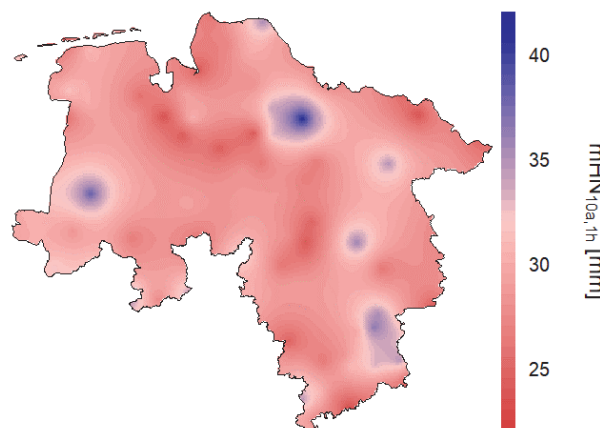


Abbildung 3-14: Regionalisierter Starkregen der Dauerstufe 1 h für die Jährlichkeit 10 a

### 3.3.3 Validierung

Um Aussagen über die Güte der Index-Methode treffen zu können, wurde eine Kreuzvalidierung an den 19 DIGI-Stationen durchgeführt, an denen die langen Zeitreihen vorliegen. Für die Kreuzvalidierung wird schrittweise eine DIGI Station aus dem Datensatz entfernt und das Index-Verfahren mit dem verbleibenden Datensatz durchgeführt. Anschließend wird an der ausgelassenen DIGI-Station die lokale Starkregenstatistik mit der regionalen Starkregenstatistik verglichen. Zusätzlich werden auch die KOSTRA-DWD-2010R Bemessungsniederschläge an den DIGI-Stationen der lokalen Starkregenstatistik gegenübergestellt. Abbildung 3-15 zeigt die Abweichungen der regionalen Starkregenstatistik des Index-Verfahrens sowie KOSTRA von der lokalen Starkregenstatistik aus den Beobachtungen für die Dauerstufen 5 min, 1 h und 6 h sowie die Jährlichkeiten 10 a. Das Index-Verfahren erzielt insgesamt sehr gute Validierungsergebnisse, wobei kurze Dauerstufen  $\leq 30$  min größere Unsicherheiten aufweisen als Dauerstufen  $> 30$  min. Tabelle 3-4 zeigt den Vergleich zwischen der Validierung des Index-Verfahrens und KOSTRA-DWD-2010R-Bemessungsniederschlägen im Detail für verschiedene Dauerstufen und Jährlichkeiten. Insbesondere bei den kurzen Dauerstufen und kleinen Jährlichkeiten, die maßgebend für die Bemessung in urbanen Gebieten sind, sind die Validierungsergebnisse des Index-Verfahrens besser oder gleichwertig zu den KOSTRA-Ergebnissen.

### 3.3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die wesentlichen Ergebnisse der regionalen Starkregenanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Index-Verfahren stellt eine geeignete Methode zur Erstellung einer regionalen Starkregenstatistik dar.
- Der Vergleich des Index-Verfahrens mit KOSTRA in Bezug auf punktuell gemessene Stationsdaten zeigt insbesondere bei den in urbanen Gebieten maßgebenden Bemessungswerten (kleiner Dauerstufen und Jährlichkeiten) Validierungsergebnisse für das Index-Verfahren.
- Daten zu Starkniederschlägen stehen auf Basis des Index-Verfahrens für Niedersachsen auf einem 1 km x 1 km großen Raster für Dauerstufen von 5 min bis 24 h und Jährlichkeiten von 1 a bis 100 a zur Verfügung. Deren Anwendbarkeit in der Praxis wird im Zuge weiterer Untersuchungen überprüft (MUNSTAR).
- Das räumliche Muster der regionalen Starkregenstatistik ist dabei für alle Dauerstufen identisch (vgl. Abbildung 3-14).

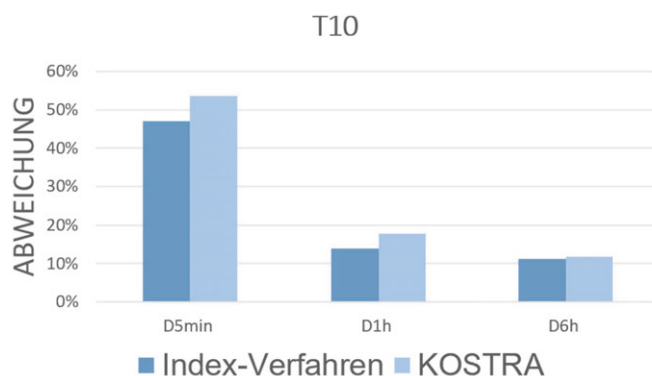
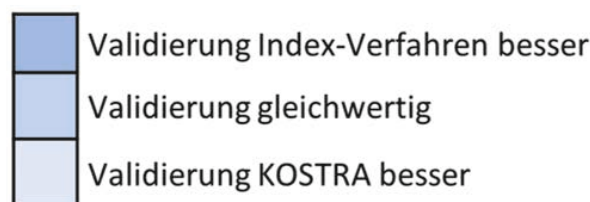


Abbildung 3-15: Abweichungen der regionalen Starkregenstatistik von der lokalen Starkregenstatistik für das Index-Verfahren sowie KOSTRA-Bemessungsniederschläge

Tabelle 3-4: Vergleich Index-Verfahren und KOSTRA



|        | T02                    | T05                    | T10                    | T20                    | T30                    | T50                    | T100                   |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| D5min  | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          |
| D10min | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          |
| D15min | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          |
| D20min | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          |
| D30min | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          |
| D45min | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          | KOSTRA besser          |
| D1h    | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser |
| D3h    | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser |
| D4h    | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser |
| D6h    | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser |
| D9h    | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser |
| D12h   | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser |
| D18h   | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser |
| D24h   | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser | Index-Verfahren besser |



## 4 Betrachtung der Abflussverhältnisse der Vergangenheit bis heute

### 4.1 Trendanalysen ausgewählter Niedrigwasserindizes

#### 4.1.1 Datenbasis

Für die Trendanalysen von Niedrigwasserindizes wurden Zeitreihen von Pegelstationen auf Tageswertbasis verwendet. Der Großteil der Stationen wird vom NLWKN betrieben, einige weitere von der Harzwasserwerke GmbH sowie von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung. Analog zu den Trendanalysen von Trockenwetterindizes wurde der Untersuchungszeitraum 1960 bis 2017 ausgewählt. Nach Ausschluss von Stationen mit einem Fehlwertanteil von mehr als 5 % standen 34 Pegel für die Trendanalyse zur Verfügung. Eine Übersicht findet sich in Abbildung 4-1.

#### 4.1.2 Methodik

Die Trendanalysen wurden für die in Tabelle 4-1 aufgeführten Niedrigwasserindizes durchgeführt. Sie sind in Kapitel 2.4 detailliert erläutert. Untersucht wurde der Zeitraum 1960 bis 2017, jeweils für das Niedrigwasserjahr (01.04. bis 31.03.) sowie für das Sommerhalbjahr (01.04. bis 30.09.) und das Winterhalbjahr (01.10. bis 31.03.). Analog zur Analyse der Trockenwetterindizes erfolgte die Schätzung der Trendstärke anhand des Theil-Sen-Verfahrens (Theil 1950; Sen, 1968) und die Ermittlung der Signifikanz mit dem Mann-Kendall-Test (Kendall, 1975; Mann, 1945). Ein pre-whitening und eine Bruchpunktanalyse wurden auf Basis der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Methoden durchgeführt.



Abbildung 4-1: Bei der Trendanalyse untersuchte Abflusspegel

#### 4.1.3 Ergebnisse

In Kapitel 3.2.3 wird ein Bruchpunkt in der Temperaturentwicklung um das Jahr 1988 beschrieben. Dieser Bruchpunkt macht sich ebenfalls in der Entwicklung der Niedrigwasserindizes bemerkbar. Aus diesem Grund, wurde auch hier die Analyse in einen Zeitraum vor (1960-1987) und nach dem Bruchpunkt (1988-2017) aufgeteilt. Zusätzlich erfolgt eine Trendanalyse über den Gesamtzeitraum (1960-2017).

Das Ergebnis der Trendanalyse der mittleren Tagesabflüsse (MQ) ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Über den Gesamtzeitraum (1960-2017) konnten im Gesamtjahr und im Sommerhalbjahr signifikante Abnahmen fest-

Tabelle 4-1: Bei der Trendanalyse untersuchte Niedrigwasserindizes

| Index | Einheit           | Beschreibung  |
|-------|-------------------|---|
| MQ    | m <sup>3</sup> /s | Mittlerer Tagesabfluss  |
| NM7Q  | m <sup>3</sup> /s | Niedrigstes 7-tägiges Mittel des Abflusses  |
| maxD  | d                 | Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Q < 20%-Langzeitquantil des Abflusses         |
| maxV  | m <sup>3</sup>    | Maximales akkumuliertes Defizitvolumen zwischen Q und dem 20%-Langzeitquantil des Abflusses |



gestellt werden. Diese betrafen vor allem Pegel im Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet, im Sommerhalbjahr auch zusätzlich Pegel im Einzugsgebiet der Hase. Im Winter hat es seit 1960 sowohl Zu- als auch Abnahmen des MQ gegeben, die jedoch überwiegend nicht signifikant waren. Bei getrennter Betrachtung der Zeiträume vor und nach dem Bruchpunkt zeigen sich überwiegend leichte Zunahmen des MQ, die jedoch bis auf wenige Ausnahmen statistisch nicht signifikant sind. Seit 1988 hat es im Weser- und Leinebergland außerdem einige signifikante Abnahmen des mittleren Abflusses gegeben.

Bei der Entwicklung des NM7Q hat es seit 1960 deutliche Veränderungen gegeben (Abbildung 4-4). Das Niveau des NM7Q ist im ALO-Einzugsgebiet signifikant gesunken. Abbildung 4-2 veranschaulicht diesen Bruchpunkt, der zeitlich mit dem Anstieg der mittleren Temperatur übereinstimmt. Innerhalb der Zeiträume vor und nach dem Bruchpunkt hat sich das NM7Q an den meisten Pegeln wenig verändert (vgl. Abbildung 4-3).

Die Entwicklung von maxD verhält sich ähnlich wie die des NM7Q. Vor allem im ALO-Gebiet kam es zu einer deutlichen Zunahme im Gesamtzeitraum. Vor und nach

dem Bruchpunkt konnten, analog zum NM7Q, überwiegend leichte Abnahmen festgestellt werden. Im Zeitraum 1988 bis 2017 kam es, vor allem im ALO-Gebiet, zu einigen statistisch signifikanten Abnahmen (vgl. Abbildung 4-5).

Das maxV zeigt sowohl über den Gesamtzeitraum als auch über die Zeiträume vor und nach dem Bruchpunkt Zunahmen des maximalen Defizitvolumens, die an vielen Pegeln statistisch signifikant sind (vgl. Abbildung 4-6).

#### 4.1.4 Zusammenfassung

- Die mittleren Abflüsse haben seit 1960 im Sommer deutlich abgenommen.
- Der NM7Q hat seit 1960 im Sommer vor allem im ALO-Gebiet deutlich abgenommen.
- Die maximale Trockendauer hat seit 1960 im ALO-Gebiet signifikant zugenommen.
- Das maximale Defizitvolumen hat in Gesamtniedersachsen seit 1960 deutlich zugenommen.
- Die Entwicklung aller Niedrigwasserkenngrößen ist durch einen Bruchpunkt um das Jahr 1988 gekennzeichnet.

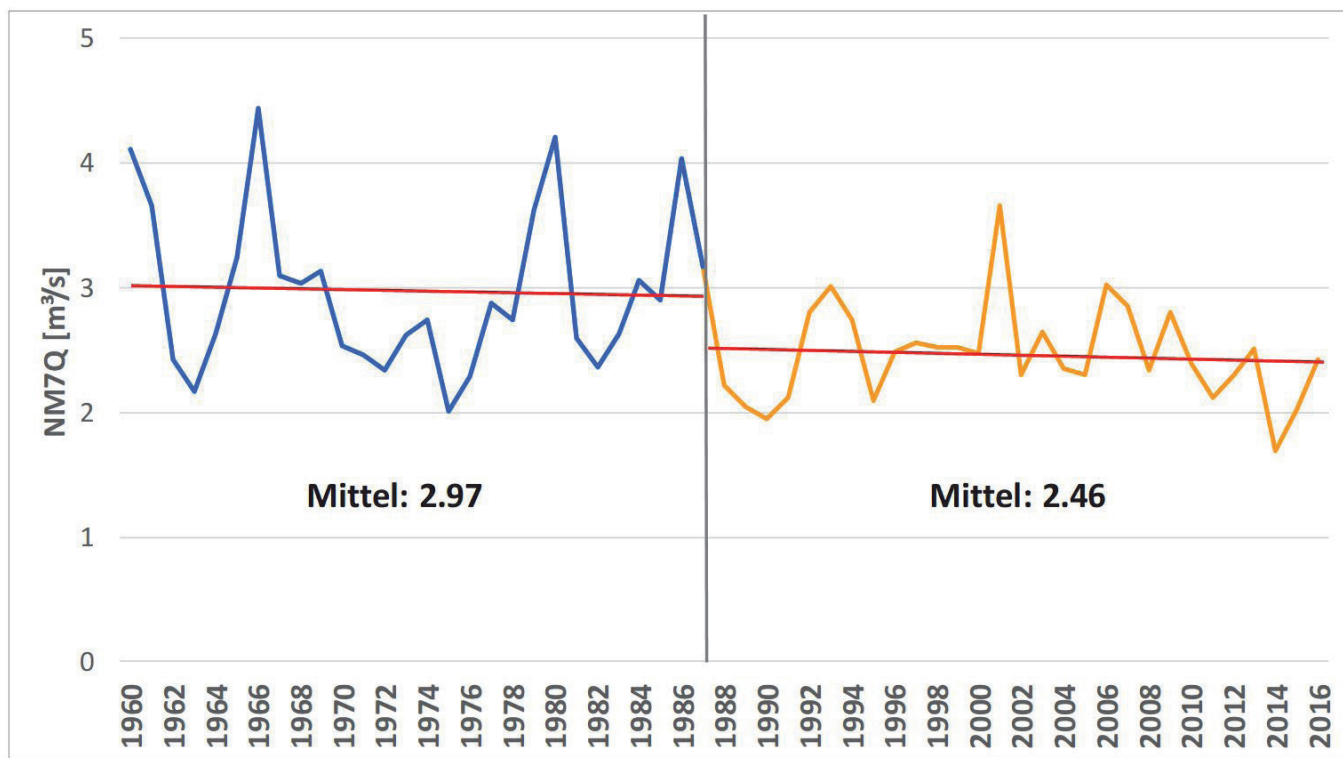
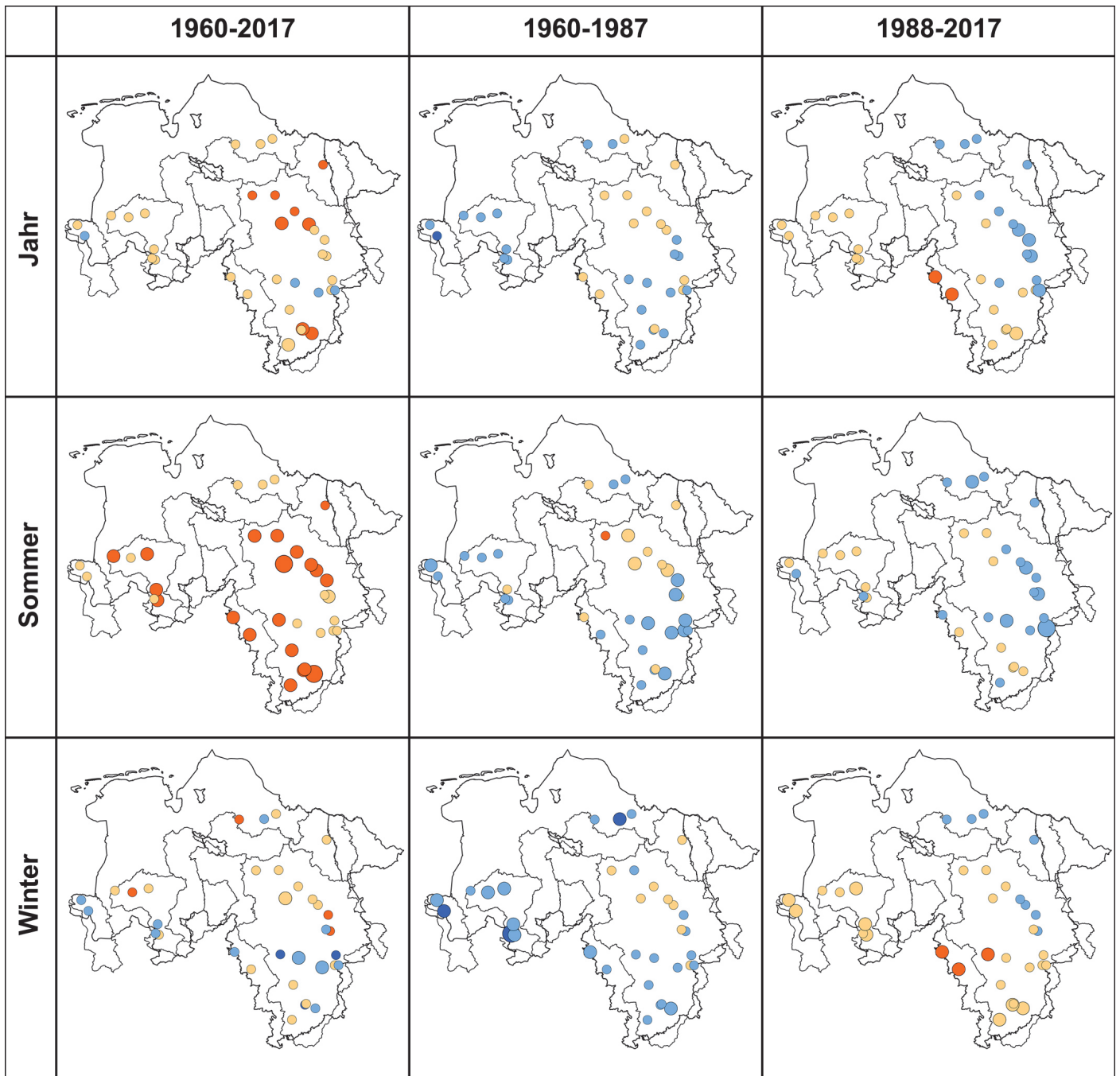


Abbildung 4-2: Entwicklung des NM7Q von 1960 bis 2017, gemittelt über alle verfügbaren Pegel im Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet. Der Bruchpunkt im Jahr 1988 ist durch eine vertikale Linie gekennzeichnet. Vor und nach dem Bruchpunkt sind die linearen Trends als rote Linien eingezeichnet.



**Trendstärke [%]**

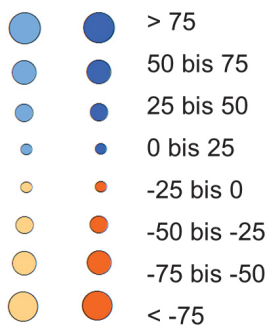
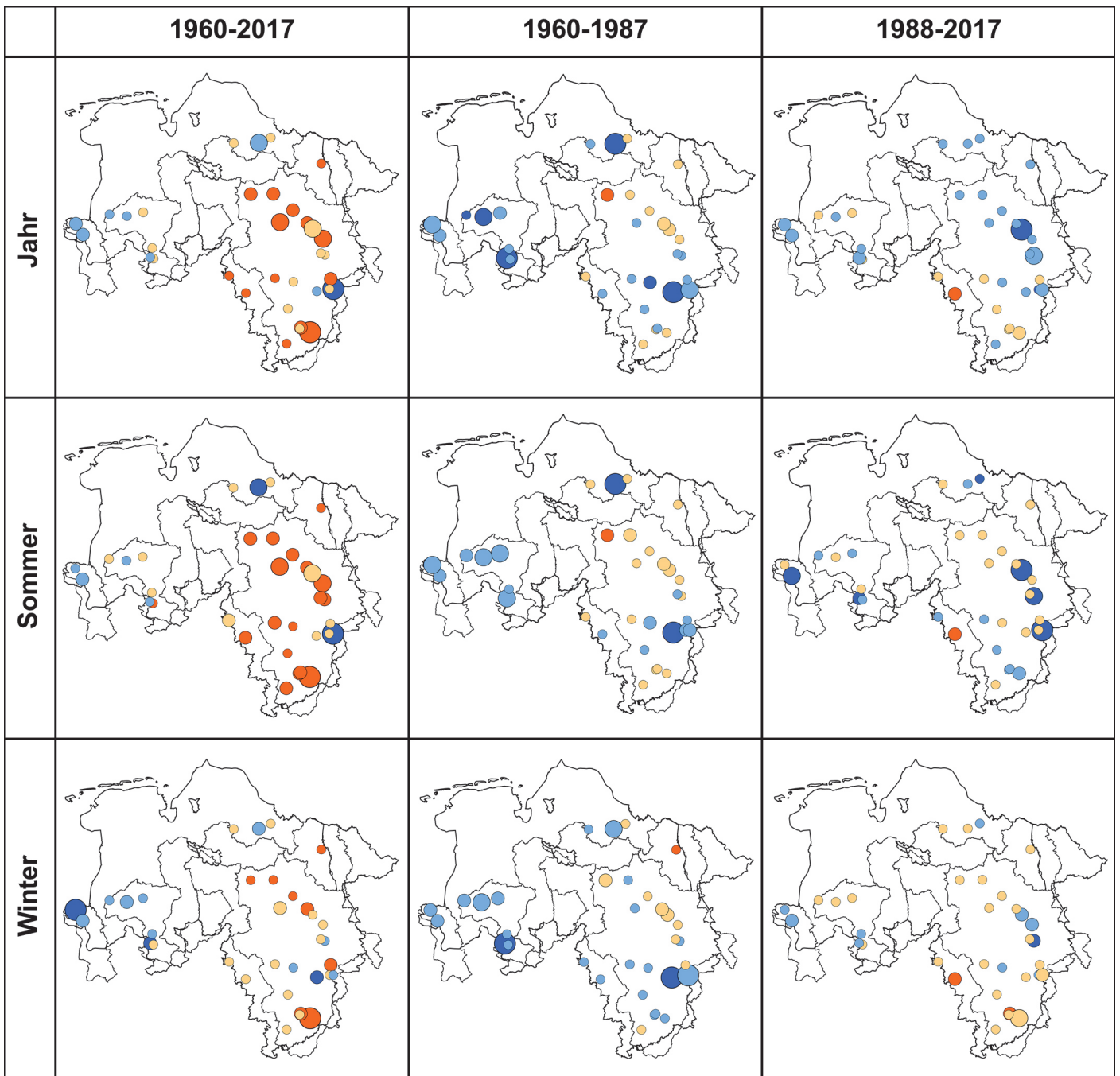


Abbildung 4-3: Trends der mittleren Tagesabflüsse (MQ) ; kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant



**Trendstärke [%]**

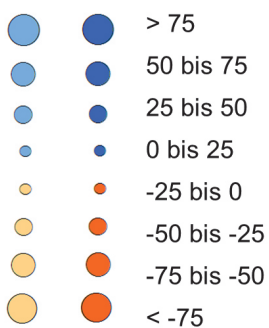
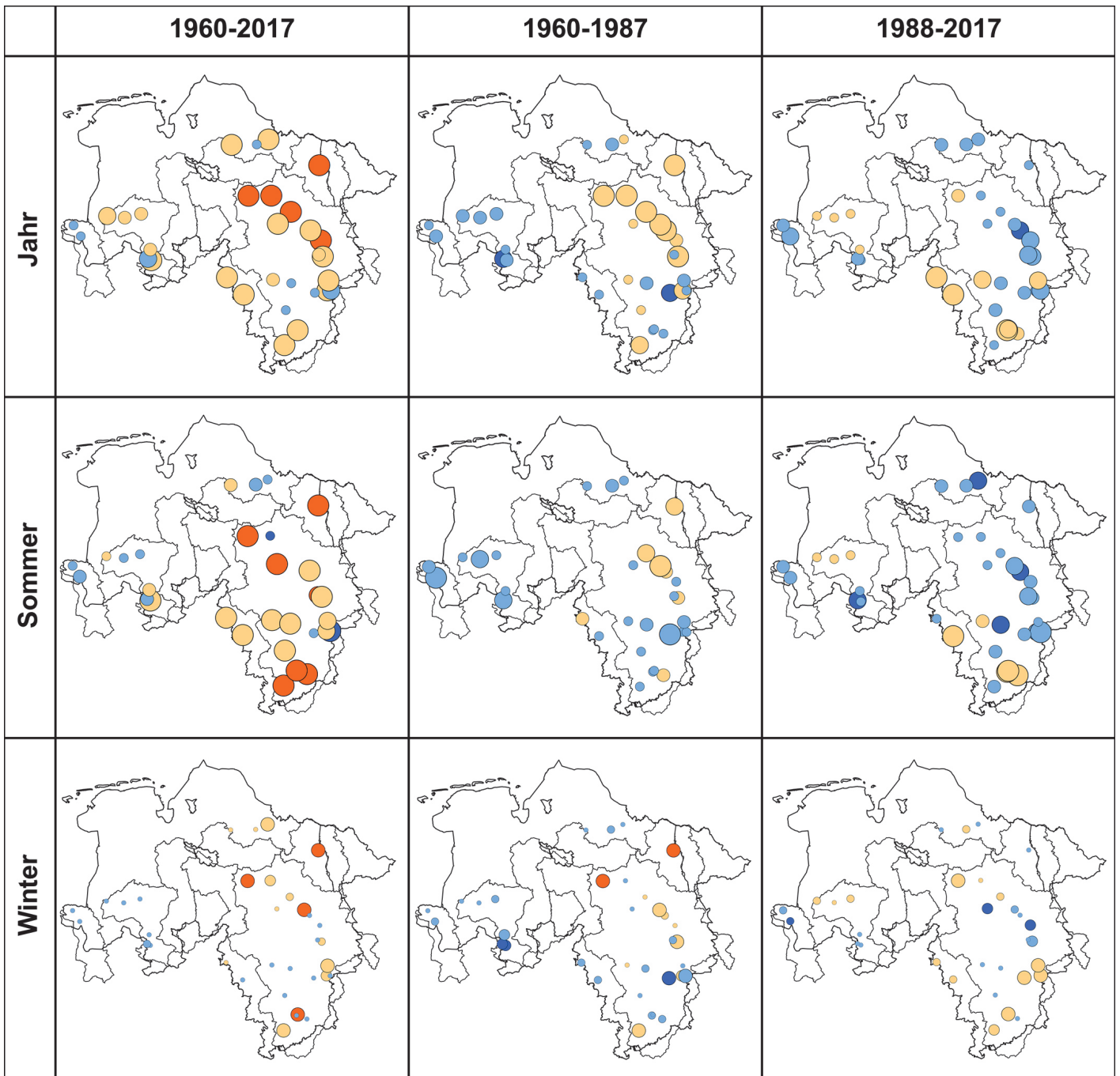


Abbildung 4-4: Trends des niedrigsten 7-tägigen Abflussmittels (NM7Q) ; kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant



**Trendstärke [%]**

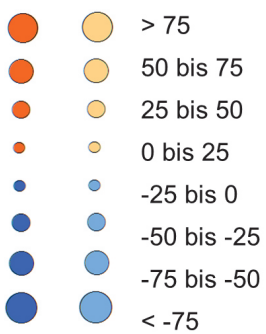
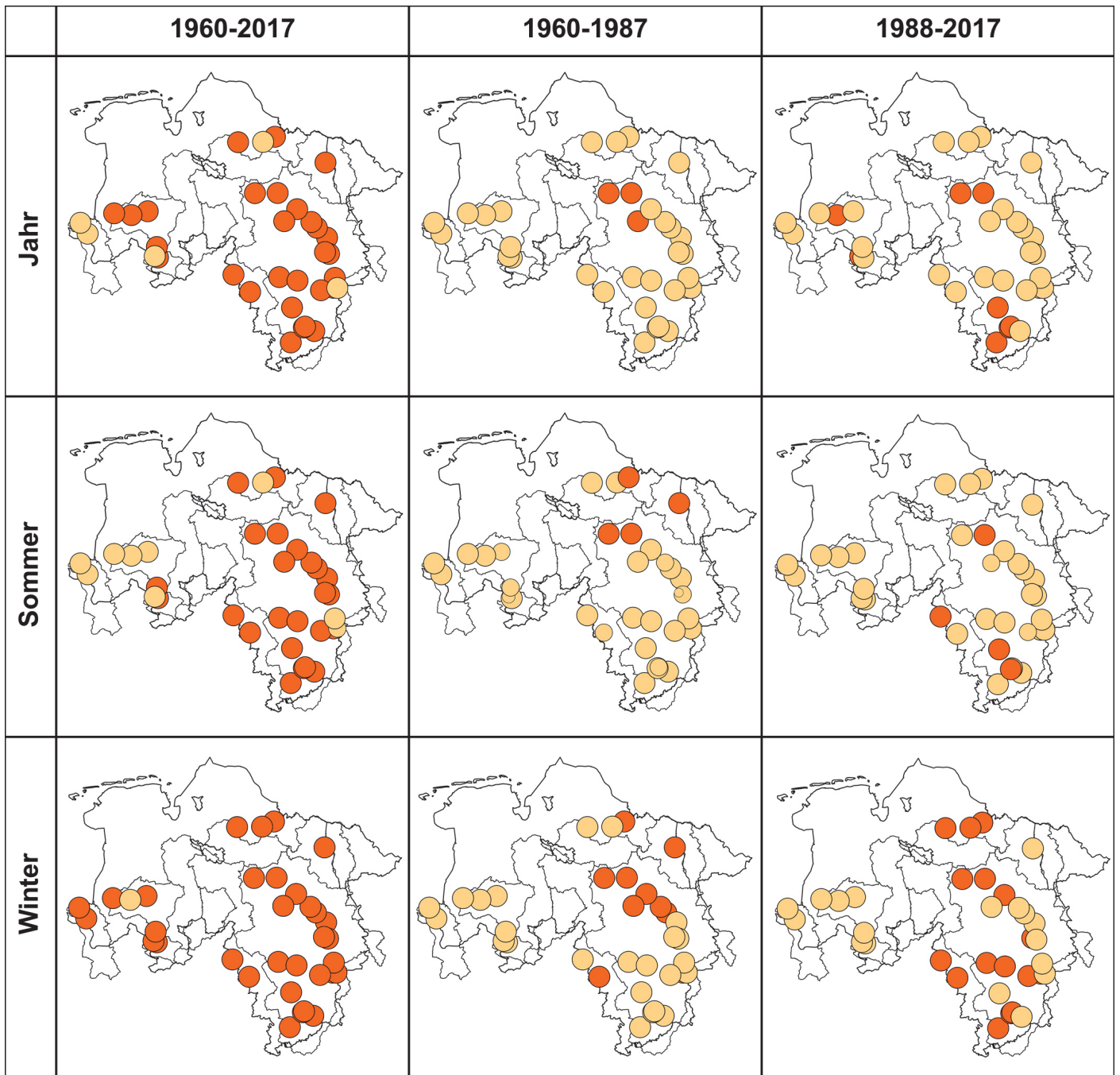


Abbildung 4-5: Trends der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit  $Q < 20\%$ -Langzeitquantil des Abflusses (maxD); kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant





**Trendstärke [%]**

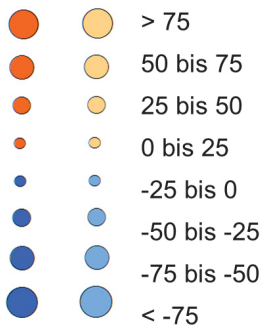


Abbildung 4-6: Trends des maximalen akkumulierten Defizitvolumens zwischen Q und dem 20%-Langzeitquantil des Abflusses (maxV) ; kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant



## 5 Die Klimamodell-Ensembles von KliBiW

### 5.1 Klimaszenarien

Abbildung 5-1 stellt die verschiedenen Arbeitsschritte in der Klimamodellierung dar. Grundlage sind Szenarien, welche die zukünftige Entwicklung klimarelevanter Treibhausgase (THG) unter verschiedenen sozioökonomischen Entwicklungen beschreiben. Die ersten vom IPCC entwickelten Emissionsszenarien wurden im Jahr 2000 im „Special Report on Emissions Scenarios“ (Nakicenovic et al., 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).

Basierend auf den zuvor genannten Szenarien der THG-Entwicklung bilden Globale Klimamodelle das Klimasystem der Erde und seine zukünftige Entwicklung als Klimaszenarien 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 besse-

re (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., 2012). 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).

Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die in KliBiW 5 verwendeten 20 Klimamodellketten. Sie basieren auf zwei verschiedenen Emissionsszenarien, die im Folgenden kurz erläutert werden.

#### **Emissionsszenario SRES A1B:**

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

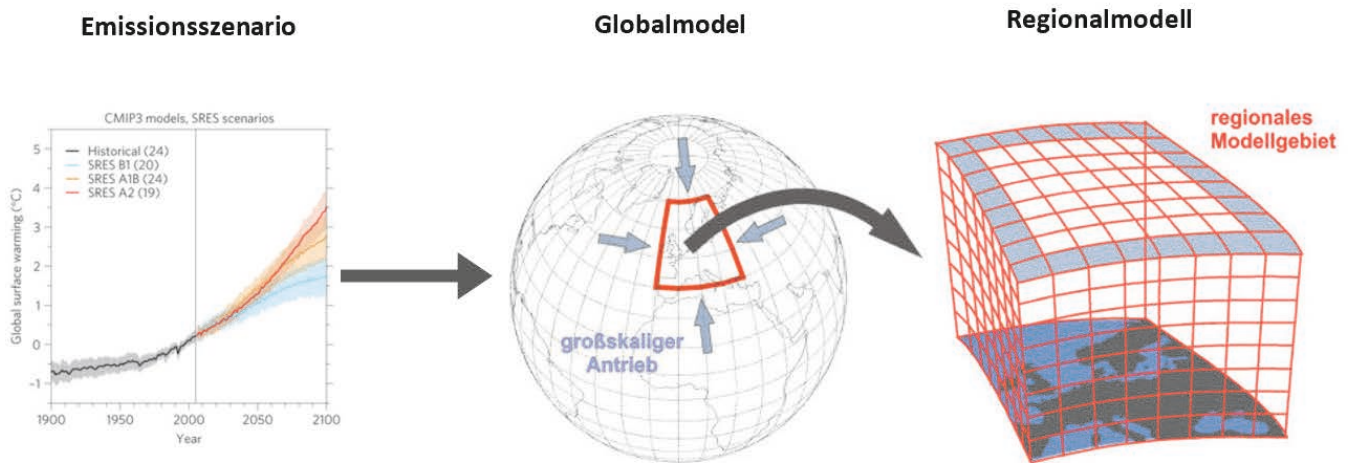


Abbildung 5-1: Modellkette der regionalen Klimamodellierung (ergänzt nach Klimanavigator, 2017)

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

| Szenario RCP8.5       |      |                   |      |                  |
|-----------------------|------|-------------------|------|------------------|
| Globalmodell          |      | Regionalmodell    |      |                  |
| Name                  | Lauf | Name              | Lauf | Abkürzung        |
| CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 | 1    | CLMcom-CCLM4-8-17 |      | CNRM_CLM         |
|                       |      | SMHI-RCA4         |      | CNRM_RCA4        |
| ICHEC-EC-EARTH        | 12   | CLMcom-CCLM4-8-17 |      | ECE_CLM          |
|                       | 3    | DMI-HIRHAM5       |      | ECE_HIRHAM       |
|                       | 1    | KNMI-RACMO22E     |      | ECE_RACMO        |
|                       | 12   | SMHI-RCA4         |      | ECE_RCA4         |
| MOHC-HadGEM2-ES       | 1    | CLMcom-CCLM4-8-17 |      | HadGEM_CLM       |
|                       |      | RACMO22E          | 2    | HadGEM_RACMO     |
|                       |      | SMHI-RCA4         |      | HadGEM_RCA4      |
| IPSL-INNERIS-CM5A-MR  | 1    | SMHI-RCA4         |      | IPSL_RCA4        |
| MPI-ESM-LR            | 1    | CLMcom-CCLM4-8-17 |      | MPI_CLM          |
|                       |      | SMHI-RCA4         |      | MPI_RCA4         |
|                       | 2    | REMO2009          | 1    | MPI-r1_REMO      |
|                       | 2    | REMO2009          | 2    | MPI-r2_REMO      |
| Szenario SRES A1B     |      |                   |      |                  |
| Globalmodell          |      | Regionalmodell    |      |                  |
| Name                  | Lauf | Name              | Lauf | Abkürzung        |
| ECHAM5                | 1    | COSMO-CLM         |      | ECH5-r1_CLM      |
|                       | 2    |                   |      | ECH5-r2_CLM      |
|                       | 1    | REMO              |      | ECH5-r1_REMO-UBA |
|                       | 2    |                   |      | ECH5-r2_REMO-BfG |
|                       | 1    | WETTREG 2006      |      | ECH5_W06         |
|                       | 1    | WETTREG 2010      |      | ECH5_W10         |

\*Wenn es verschiedene Läufe desselben Globalmodells gab, die ein Regionalmodell angetrieben haben, dann wurde die Nummer des Laufs des Globalmodells in die Abkürzung übernommen

### 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<sup>2</sup> 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.

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 und Mitchell, 2009). Die in KliBiW 5 verwendeten Klimaprojektionen wurden als Ergänzung zu ENSEMBLES für Deutschland erstellt, um vor allem der Impaktmodellierung räumlich höher aufgelöste Modelldaten zur Verfügung stellen zu können. Für KliBiW 5 wurden sechs auf dem Szenario SRES A1B basierende Modellketten davon ausgewählt, wobei alle mit demselben Globalmodell ECHAM5 (Roeckner et al., 2003) angetrieben wurden.

Den Regionalen Klimamodellen REMO (Jacob et al., 2008) und CLM (Rockel et al., 2008) liegt ein dynamisches Downscaling-Verfahren zugrunde. WETTREG (Spekat et al., 2007; Kreienkamp et al., 2010) verwendet eine statistische Regionalisierungsmethode.

Bei den auf dem Szenario SRES A1B basierenden Klimamodellketten unterscheidet sich die Auflösung je nach Regionalmodell. Bei COSMO-CLM beträgt sie etwa 18 km x 18 km und bei REMO 10 km x 10 km.

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 5 wurden 14 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 (s. Tabelle 5-1).

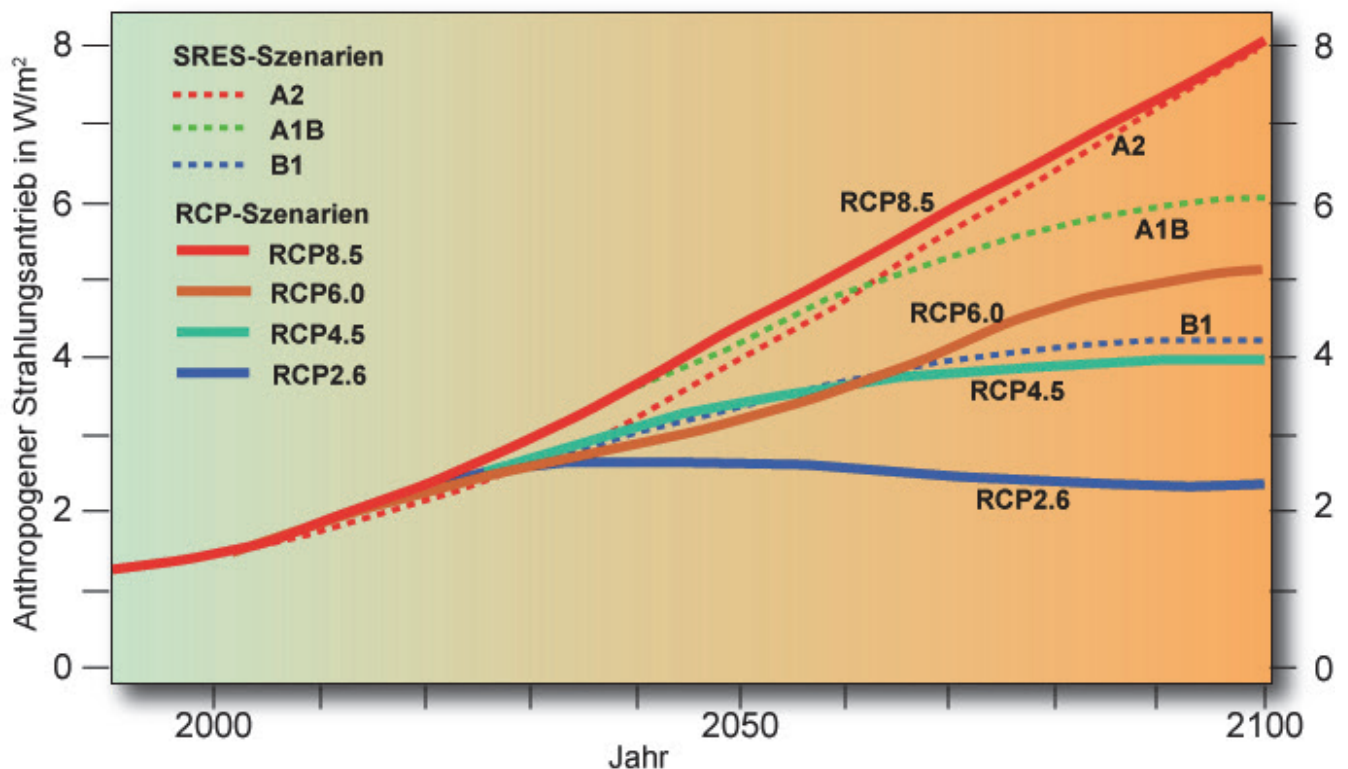


Abbildung 5-2: Die Szenarien der THG-Entwicklung im Vergleich (Hamburger Bildungsserver, 2017)

## 5.2 Auswahl von WETTREG-Realisationen

Das im SRES-A1B-Szenario betrachtete statistische regionale Klimamodell WETTREG umfasst in seinen Versionen von 2006 und 2010 eine Anzahl von 20 bzw. 10 individuellen Realisationen. Um den Umfang und den damit einhergehenden Aufwand in der Ensemble-Auswertung zu reduzieren, gleichzeitig jedoch die Bandbreite der Modellläufe zu bewahren, werden für jede Modellversion drei repräsentative Läufe ausgewählt. Diese sollen jeweils nasse, trockene und mittlere zukünftige Niedrigwasserverhältnisse innerhalb der Bandbreite von WETTREG repräsentieren.

Um die Auswirkungen der einzelnen Klimamodellläufe auf das zukünftige Niedrigwasserverhalten abzuschätzen, werden die in Kapitel 5.1 beschriebenen statistischen Modelle angewandt. Die Auswahl für WETTREG2006 wurde bereits in Projektphase 3 getroffen (NLWKN, 2015). Hier wurden die Läufe R10 (eher trocken), R06 (mittel) und R09 (eher nasser) identifiziert. Das Auswahlverfahren für WETTREG2010 entspricht weitestgehend dem damaligen Vorgehen. Für eine flächendeckende Menge an Einzugsgebieten wird für jede verfügbare WETTREG-Realisation der NM7Q für den Z3-Zeitraum mittels eines statistischen Prognosemodells bestimmt.

Abbildung 5-3 zeigt die Ergebnisse für die 10 Realisationen. Es ist zu erkennen, dass Lauf R66 insgesamt die niedrigsten NM7Q in der fernen Zukunft erzielt. R22 liefert im Median die geringste Abnahme im NM7Q. Diese Realisationen werden somit als „eher trocken“ und „eher nass“ ausgewählt. Lauf R99 wird als der mittlere bestimmt. Die ausgewählten Realisationen resultieren auch in den anderen betrachteten Indizes in trockneren, nasseren und mittleren Bedingungen.

Tabelle 5-2 gibt einen Überblick über alle ausgewählten WETTREG-Realisationen.

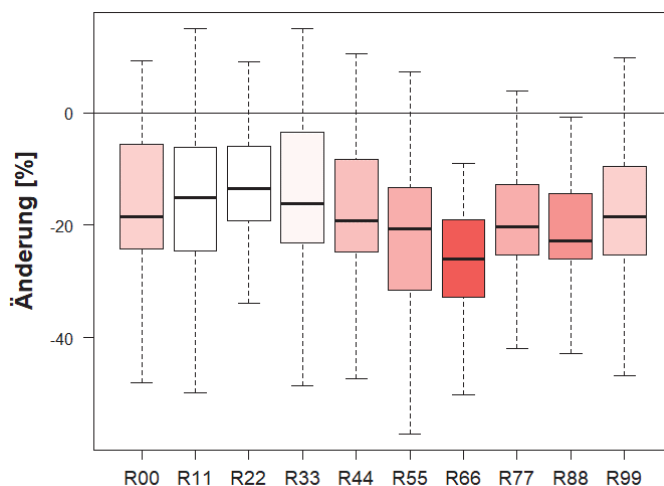


Abbildung 5-3: Änderungssignale im NM7Q für den Z3-Zeitraum in Niedersachsen geschätzt mit den 10 WETTREG2010-Realisationen anhand eines statistischen Prognosemodells

Tabelle 5-2: Ausgewählte WETTREG-Realisationen

| Kategorie | WETTREG2006 | WETTREG2010 |
|-----------|-------------|-------------|
| trocken   | R10         | R66         |
| mittel    | R06         | R99         |
| nass      | R09         | R22         |

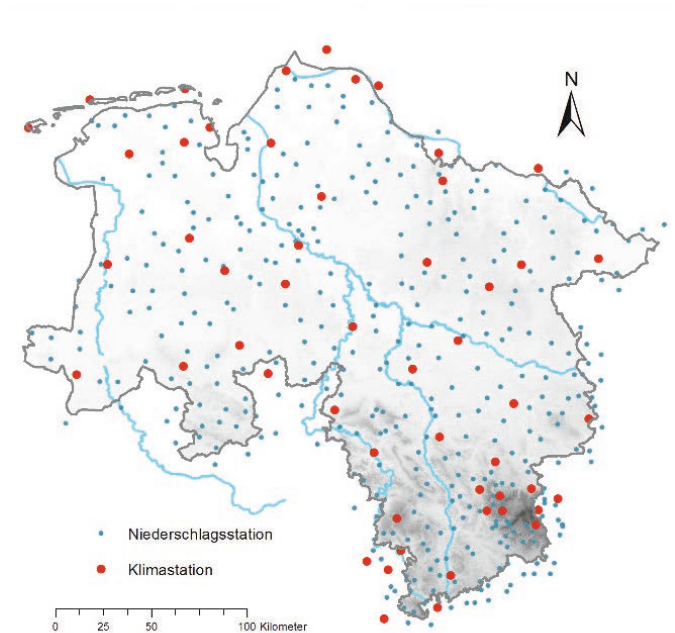
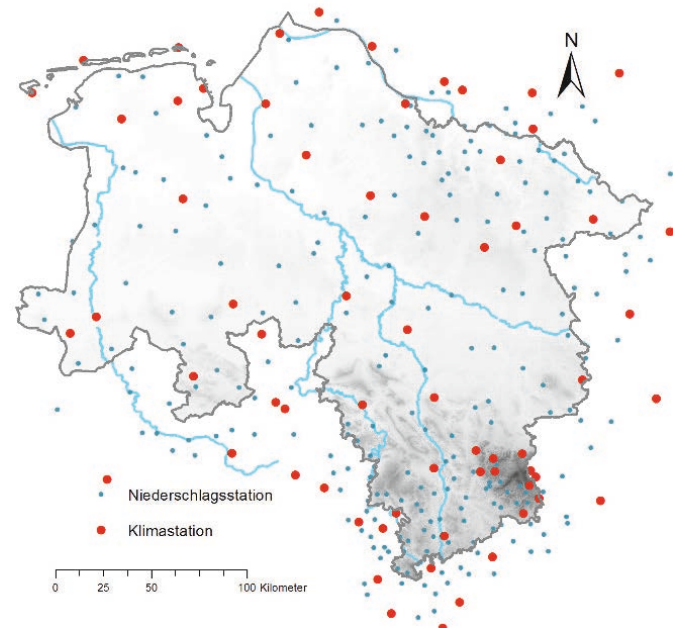


### 5.3 Regionalisierung der Klimamodelldaten

Für die Simulation von klimatisch bedingten Veränderungen mittels Wirkmodellen 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. 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 5 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 5-4). 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 5-3 aufgeführt. Um aus den unregelmäßig verteilten Stützpunkten der Stationsdaten ein regelmäßiges Raster zu interpolieren, wurden je nach Klimavariablen die Interpolationsverfahren Ordinary Kriging (OK) und External Drift Kriging (EDK) angewendet. Die Verfahren wurden zuvor mittels Kreuzvalidierung hinsichtlich ihrer Interpolationsgüte anhand verschiedener Gütekriterien geprüft (vgl. Kapitel 3.1). Weitere Informationen hierzu sind in Haberlandt et al. (2015) zu finden. 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 5-4: Lage der Stationen mit Zeitreihendaten des Niederschlags (RR) bzw. verschiedener Klimagrößen (KL) vor der Regionalisierung (oben: WETTREG2006, unten: WETTREG2010)**

Tabelle 5-3: 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)

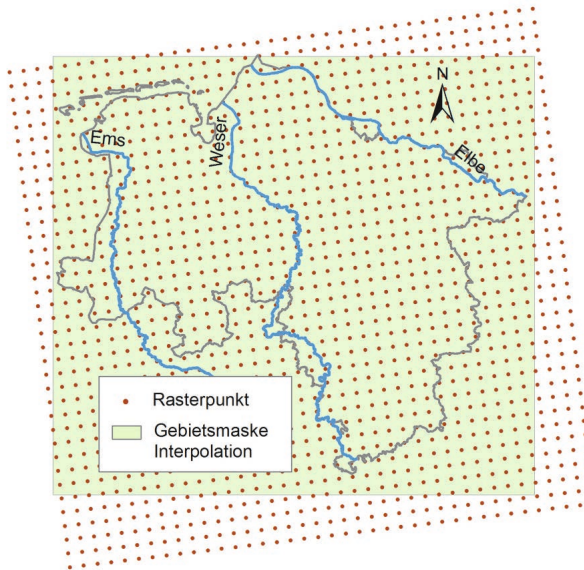
| Klimagröße               | Einheit | Interpolationsverfahren<br>WETTREG2006 | Interpolationsverfahren<br>WETTREG2010 |
|--------------------------|---------|--|--|
| Tagesniederschlagssumme  | mm/d    | OK                                     | OK                                     |
| Mittlere Tagestemperatur | °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

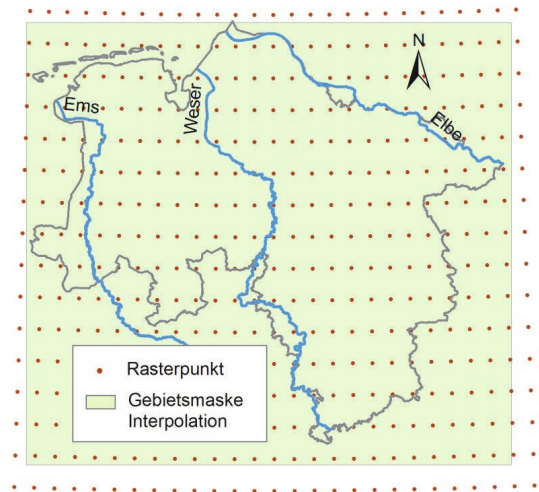
Die Daten der im Projekt verwendeten regionalen dynamischen Klimamodelle, d.h. der Modellketten aus Global- und Regionalmodell, liegen im Original in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen vor (vgl. Abbildung 5-5). Alle Datensätze weisen ein regelmäßiges Raster auf, dessen Rasterzellen jedoch je nach 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 In-

terpolation aller Datensätze und aller Klimavariablen auf Tageswertbasis über den Zeitraum 1971 bis 2100 auf ein 10x10 km Raster (s. Abbildung 5-5). 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 5-6). 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 3.1 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.

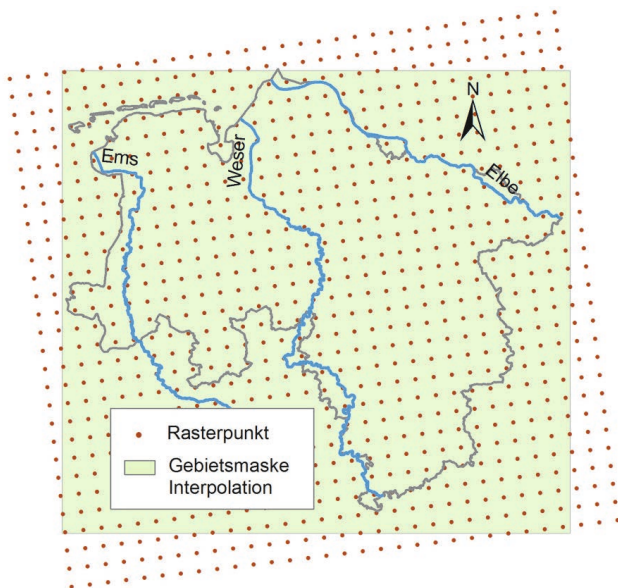
Raster ECH5\_REMO



Raster ECH5\_CLM



Raster EURO-CORDEX



Raster nach Interpolation

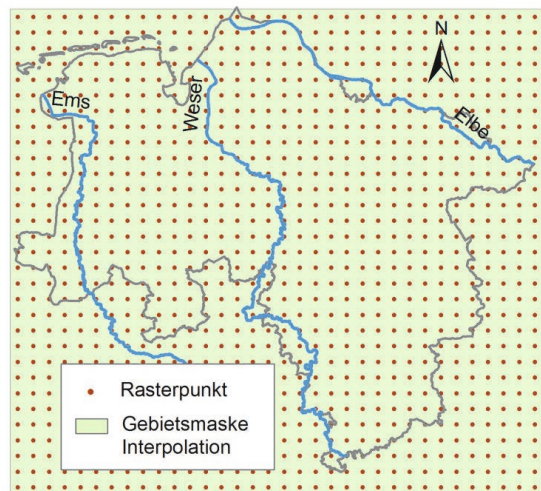


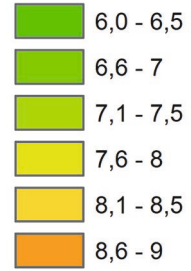
Abbildung 5-5: Lage der Gitterpunkte der regionalen dynamischen Klimamodelle (oben links: ECHAM5/REMO auf rotiertem 10x10 km Raster, oben rechts: ECHAM5/CLM auf nicht-rotiertem 18x18 km Raster, unten links: EURO-CORDEX Modellläufe auf rotiertem 12,5x12,5 km Raster, unten rechts: Lage der Gitterpunkte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



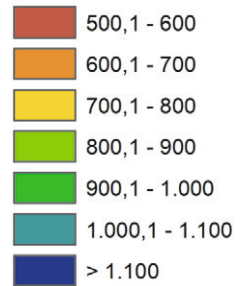
Raster original

Raster interpoliert

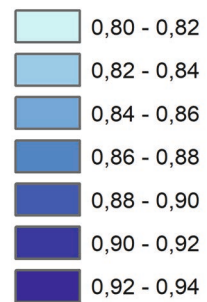
**Temperatur  
[Grad Celsius]**



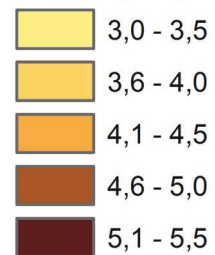
**Niederschlag  
[mm]**



**Relative Feuchte [%]**



**Sonnenschein-  
dauer [std]**



**Windgeschwindig-  
keit [m/s]**

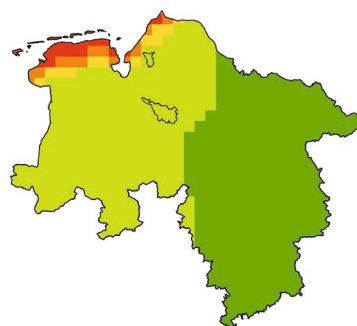
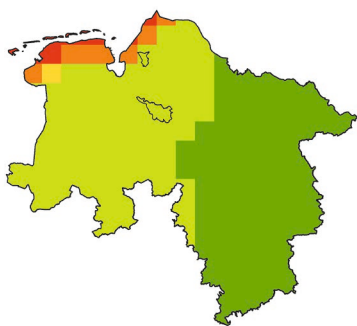
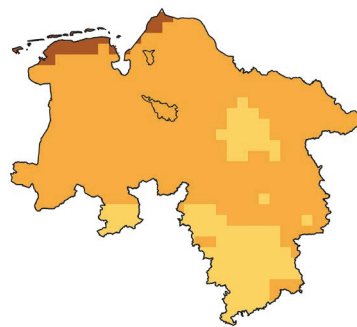
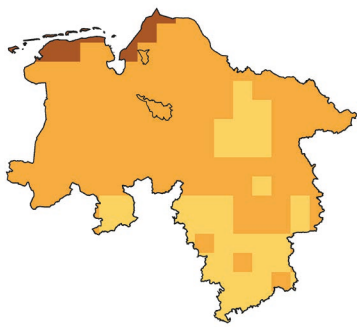
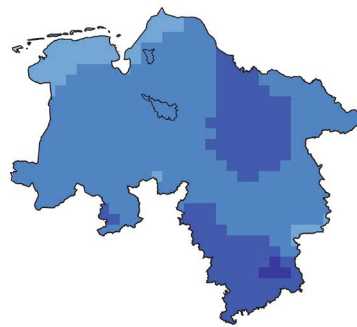
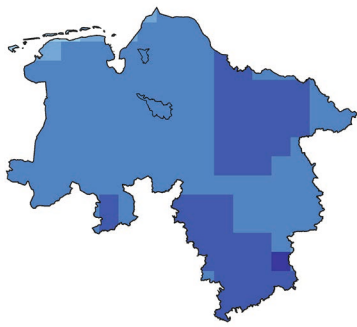
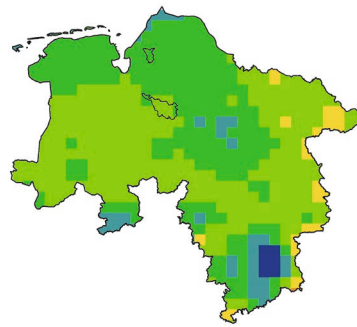
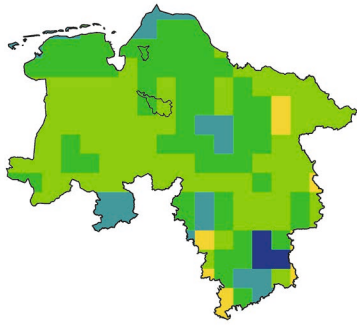
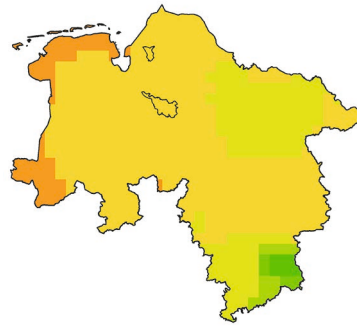
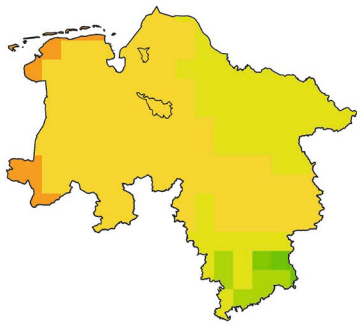
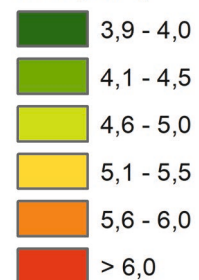


Abbildung 5-6: Plausibilisierung der interpolierten Klimamodelldaten am Beispiel der Modellkette ECHAM5-Lauf1\_CLM (SRES); alle Klimagrößen gemittelt über den Zeitraum 1971-2000



## 5.4 Validierung der Klimamodelldaten anhand von Beobachtungsdaten

Die Verlässlichkeit der Ergebnisse aus der Wirkmodellierung, sei es für gegenwärtige oder für 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 Klimamodell, 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., 2017).

### 5.4.1 Methodik

Der Vergleich der Klimamodelldaten mit 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 Gebietsmittelzeitreihe für jedes der sieben betrachteten Einzugsgebiete (vgl. 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 (Kapitel 6.2). Der Vergleich von Beobachtung und Modell fand auf Basis von Mittelwerten für das Gesamtjahr und die einzelnen Jahreszeiten statt. Für die Validierung der Niederschlagskenngrößen wurden beobachtete Zeitreihen ohne Richter-Korrektur verwendet, da auch in der hydrologischen Modellierung Niederschlagsdaten ohne Richter-Korrektur verwendet wurden. Die analysierten klimatischen Kenngrößen sind in Tabelle 5-4 dargestellt.

## 5.4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Validierung sind für das RCP8.5-Ensemble für die Gebietsmittel-Zeitreihen der sieben Einzugsgebiete in Abbildung 5-7 bis Abbildung 5-10 dargestellt. Da die einzelnen Jahreszeiten ähnliche Abweichungen aufweisen, sind hier stellvertretend die Ergebnisse für das Gesamtjahr gezeigt. Alle Klimamodellketten des SRES A1B-Ensembles wurden bereits in KliBiW Phase 4 validiert. Die Ergebnisse sind im Gesamtbericht Hochwasser (NLWKN, 2017) veröffentlicht und werden daher hier nicht aufgeführt.

Beim Vergleich der mittleren Temperatur ( $T_{av}$ ) über das Gesamtjahr zeigt sich, dass der Großteil der RCP8.5-Ensemblemitglieder die Beobachtung unterschätzt (Cold BIAS). Die Abweichungen betragen zwischen 0 und  $-1,7^{\circ}\text{C}$ , wobei die Modellläufe MPI-r1\_REMO und MPI-r2\_REMO die mittlere Temperatur mit Abweichungen zwischen 0 und  $+0,7^{\circ}\text{C}$  leicht überschätzen. Insgesamt geben die mit dem Globalmodell MPI angetriebenen Regionalmodelle sowie HadGEM\_RCA4 und HadGEM\_CCLM die mittlere Temperatur am besten wieder (vgl. Abbildung 5-7).

Beim Vergleich der mittleren Niederschlagssumme ( $P_{sum}$ ) kann festgestellt werden, dass diese durch die Mitglieder des RCP8.5-Ensembles überwiegend überschätzt wird. Die Überschätzungen sind im Gesamtjahr mit teilweise über 60% bei den Modellketten mit dem Regionalmodell RCA4 besonders stark ausgeprägt. Die besten Ergebnisse zeigen die Klimamodellketten mit den Regionalmodellen CCLM und RACMO (vgl. Abbildung 5-8)

Analog zur Überschätzung der mittleren Niederschlagssummen wird die maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage ( $P_{xcdd}$ ) durch die Mitglieder des RCP8.5-Ensembles tendenziell unterschätzt. Die besten Ergebnisse zeigen sich auch hier bei den Klimamodellläufen mit den Regionalmodellen CCLM und RACMO. Die größten Abweichungen (bis  $-40\%$  im Gesamtjahr) weisen die Modellketten mit dem Regionalmodell RCA4 auf. Die Abweichungen sind bei der Anzahl der Trockentage ( $P_{ndd}$ ) grundsätzlich ähnlich, in ihrem Betrag jedoch etwas geringer (vgl. Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10).

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

| Klimakenngröße | Einheit            | Beschreibung  |
|----------------|--------------------|---|
| $T_{av}$       | $^{\circ}\text{C}$ | Mittlere Tagesmitteltemperatur  |
| $P_{sum1}$     | mm                 | Summe der Niederschläge für Tage mit $N \geq 1 \text{ mm/d}$            |
| $P_{xcdd}$     | d                  | Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage mit $N < 1 \text{ mm}$ |
| $P_{ndd}$      | d                  | Anzahl der Trockentage mit $N < 1 \text{ mm}$                           |

Mittlere Temperatur (Tav)

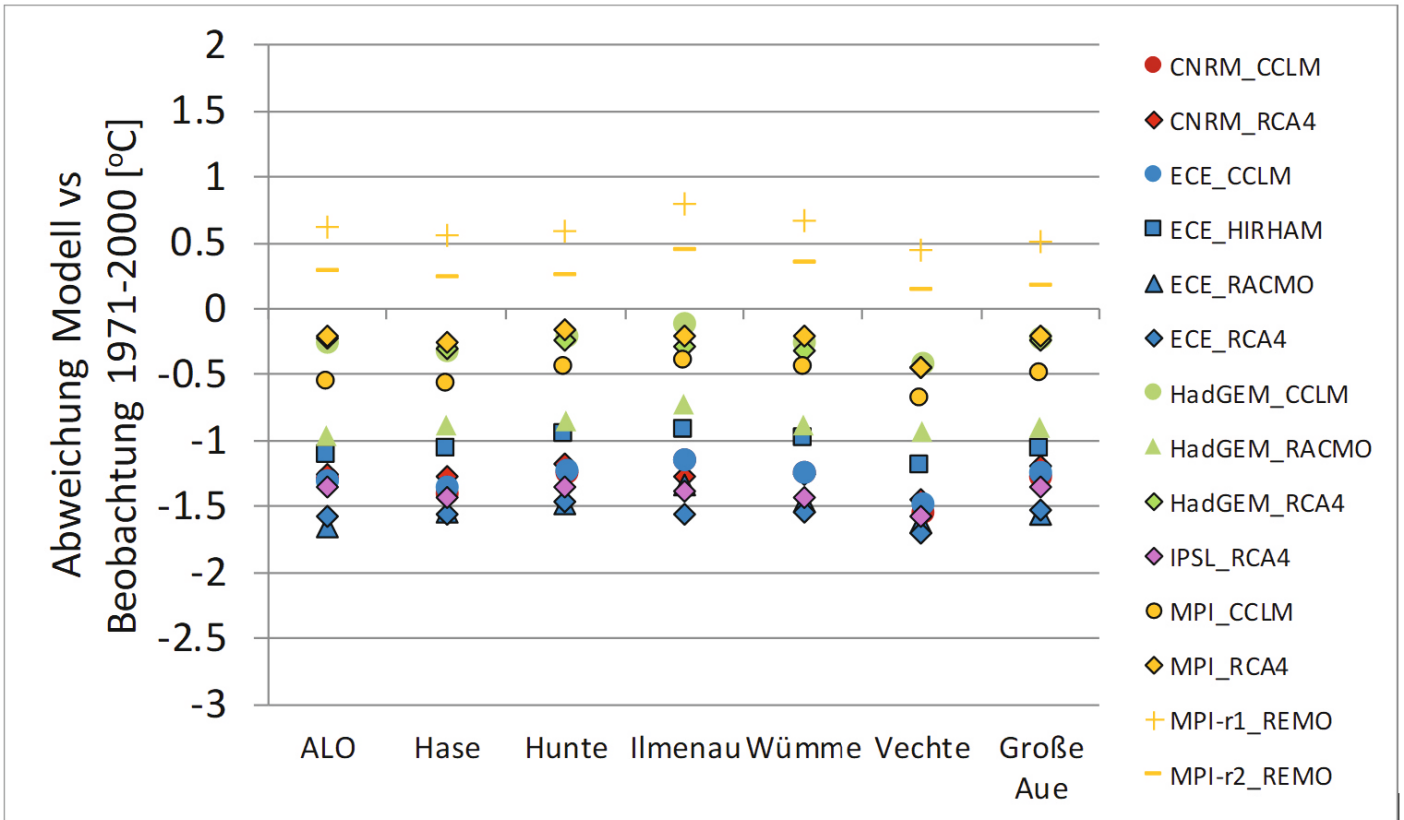


Abbildung 5-7: Abweichungen zwischen den betrachteten Klimamolldaten des RCP8.5-Ensembles und der Beobachtung für die Jahresmitteltemperatur auf Basis der Gebietsmittel der sieben Einzugsgebiete

Mittlerer Niederschlag (Psum)

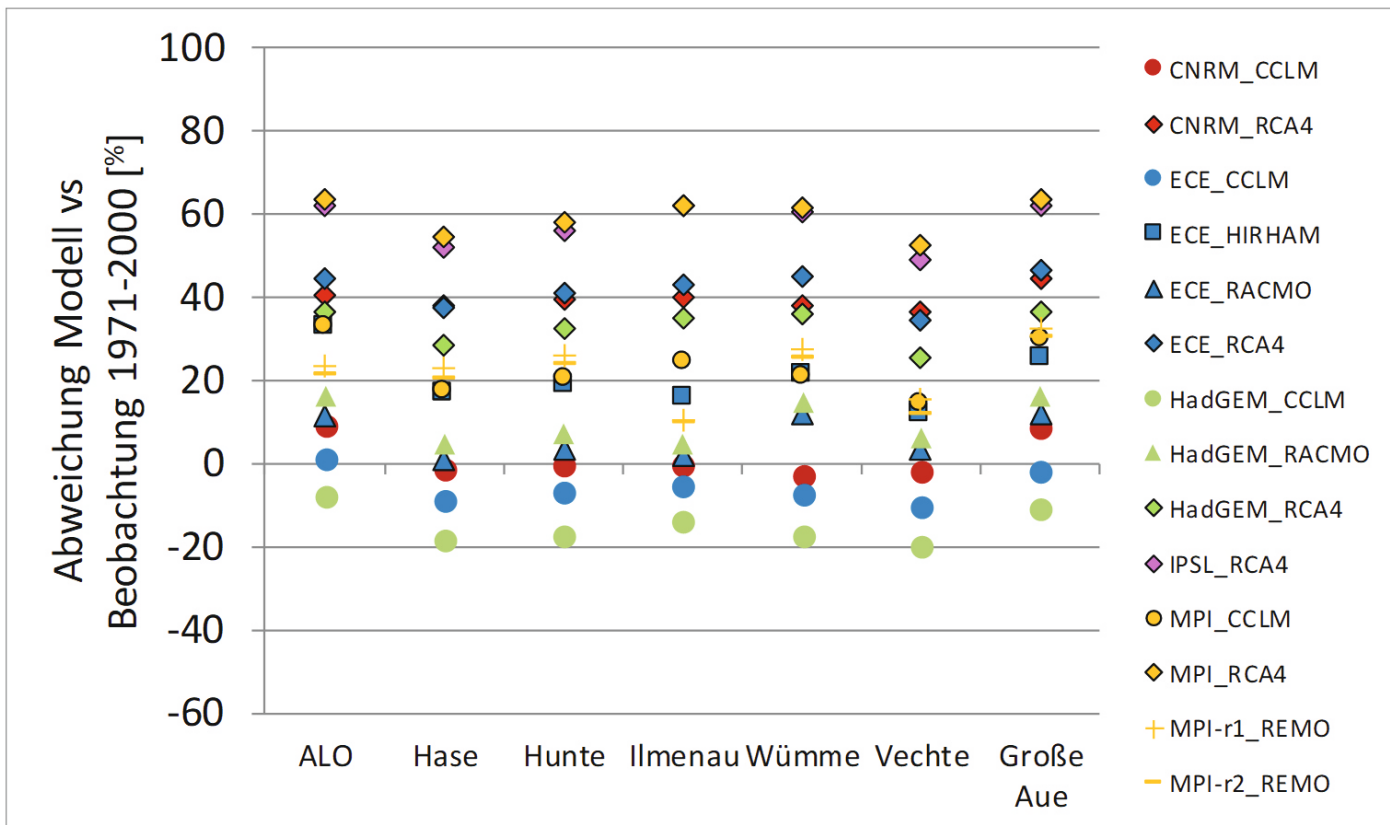


Abbildung 5-8: Abweichungen zwischen den betrachteten Klimamolldaten des RCP8.5-Ensembles und der Beobachtung für die mittlere Jahresniederschlagssumme auf Basis der Gebietsmittel der sieben Einzugsgebiete

Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Pxcdd)

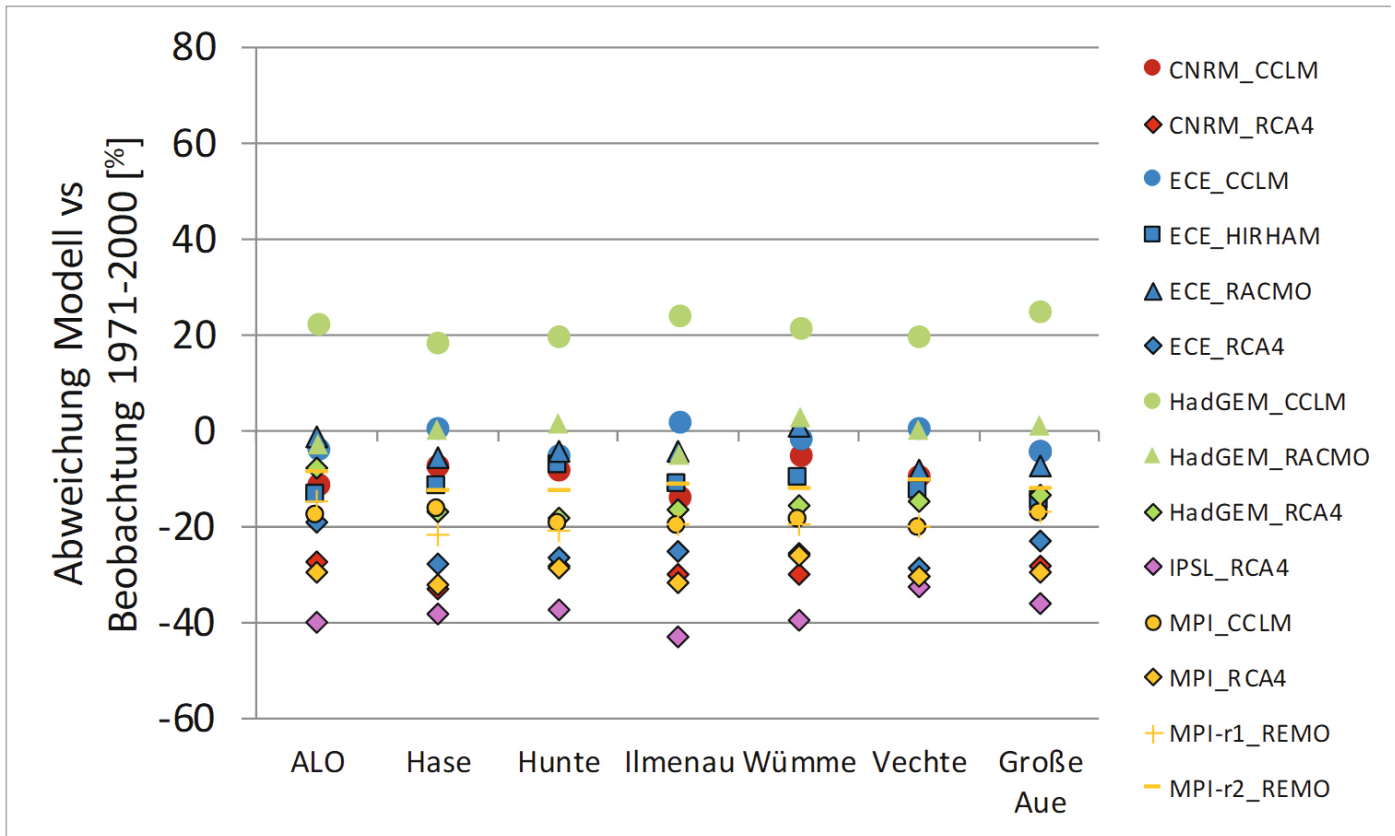


Abbildung 5-9: Abweichungen zwischen den betrachteten Klimamolldaten des RCP8.5-Ensembles und der Beobachtung für die maximale Anzahl der aufeinanderfolgender Trockentage im Gesamtjahr auf Basis der Gebietsmittel der sieben Einzugsgebiete.

Anzahl der Trockentage (Pnnd)

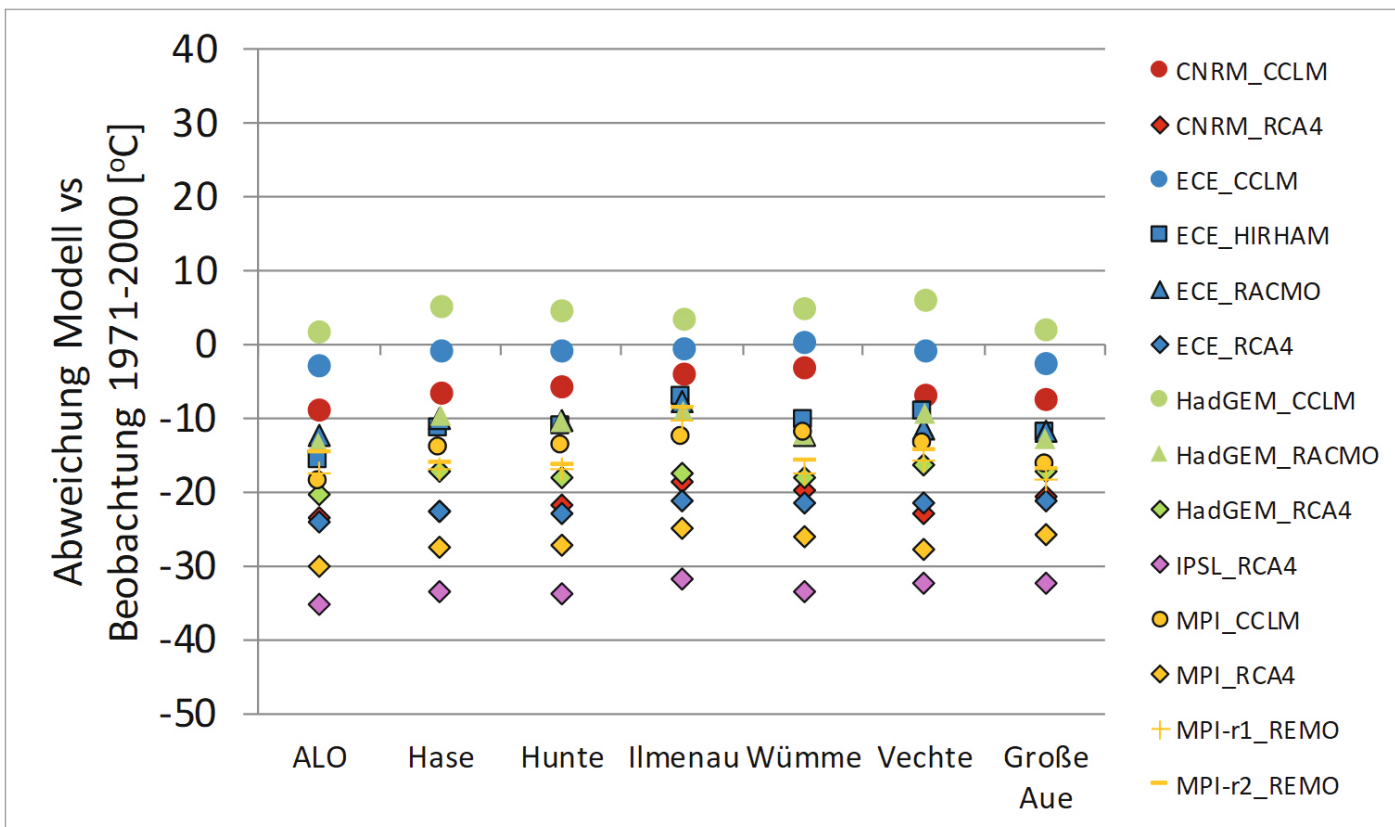


Abbildung 5-10: Abweichungen zwischen den betrachteten Klimamolldaten des RCP8.5-Ensembles und der Beobachtung für die Anzahl der Trockentage im Gesamtjahr auf Basis der Gebietsmittel der sieben Einzugsgebiete.

## 5.5 Anpassung der Klimamodelldaten an die Beobachtung (Bias-Adjustierung)

### 5.5.1 Methodik

Aufgrund der im Rahmen der Validierung festgestellten Abweichungen der Modellergebnisse von der Beobachtung, wurde entschieden, für die relevanten Klimavariablen der in Tabelle 5-4 aufgeführten Kenngrößen eine BIAS-Adjustierung durchzuführen.

Die Anpassung der Klimamodelldaten erfolgte dabei über den einfachen Ansatz des Linear Scalings. 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. Bei diesem Vorgehen wird davon ausgegangen, dass sich die Abweichungen des Modells von der Beobachtung in ähnlicher Weise auch in Zukunft fortsetzen.

$$P_{sim}^*(d) = P_{sim}(d) \quad \text{Formel 5-1}$$

$$* \left[ \frac{\bar{P}_{obs,ref}(m)}{\bar{P}_{sim,ref}(m)} \right]$$

$$T_{sim}^*(d) = T_{sim}(d) \quad \text{Formel 5-2}$$

$$+ [\bar{T}_{obs,ref}(m) - \bar{T}_{sim,ref}(m)]$$

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  $\bar{P}_{obs,ref}(m)$  bzw.  $\bar{T}_{obs,ref}(m)$  den Monatsmittelwert der Beobachtung über den Referenzzeitraum und  $\bar{P}_{sim,ref}(m)$  bzw.  $\bar{T}_{sim,ref}(m)$  den Monatsmittelwert des Klimamodells über den Referenzzeitraum.

Die Vorteile dieses Linear Scalings sind:

- Die Methode ist einfach umsetzbar.
- Die Mittelwerte der angepassten Klimagrößen stimmen anschließend mit den beobachteten Verhältnissen sehr gut überein.
- Es erfolgt keine wesentliche 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 5-5). Hierzu wurden die Referenzdaten der Beobachtung, die auf ein 1x1 km Raster interpoliert worden waren (vgl. Kapitel 3.1), auf die entsprechenden Rastergrößen umgerechnet.

### 5.5.2 Ergebnisse

Abbildung 5-11 veranschaulicht die Wirkung des Linear Scalings auf den BIAS der Klimamodelldaten.

Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen zwischen den Beobachtungs- und Modelldaten für die Größen mittlere Temperatur und mittlere Niederschlagssumme über alle betrachteten Gebietsmittel auf nahezu null reduziert wurden. Bei der Anzahl der Trockentage sowie der maximal aufeinanderfolgenden Anzahl von Trockentagen wurden die Abweichungen durch die Bias-Adjustierung mittels Linear-Scaling zumindest verringert.

Dadurch ergibt sich ein größeres Vertrauen in die Ergebnisse der Impaktmodelle, die die entsprechenden Klimamodelldaten als Eingangsdaten für die Simulation der zukünftigen (Niedrigwasser-)Abflussverhältnisse nutzen (siehe Kapitel 7).



ohne BIAS-Adjustierung

mit BIAS-Adjustierung

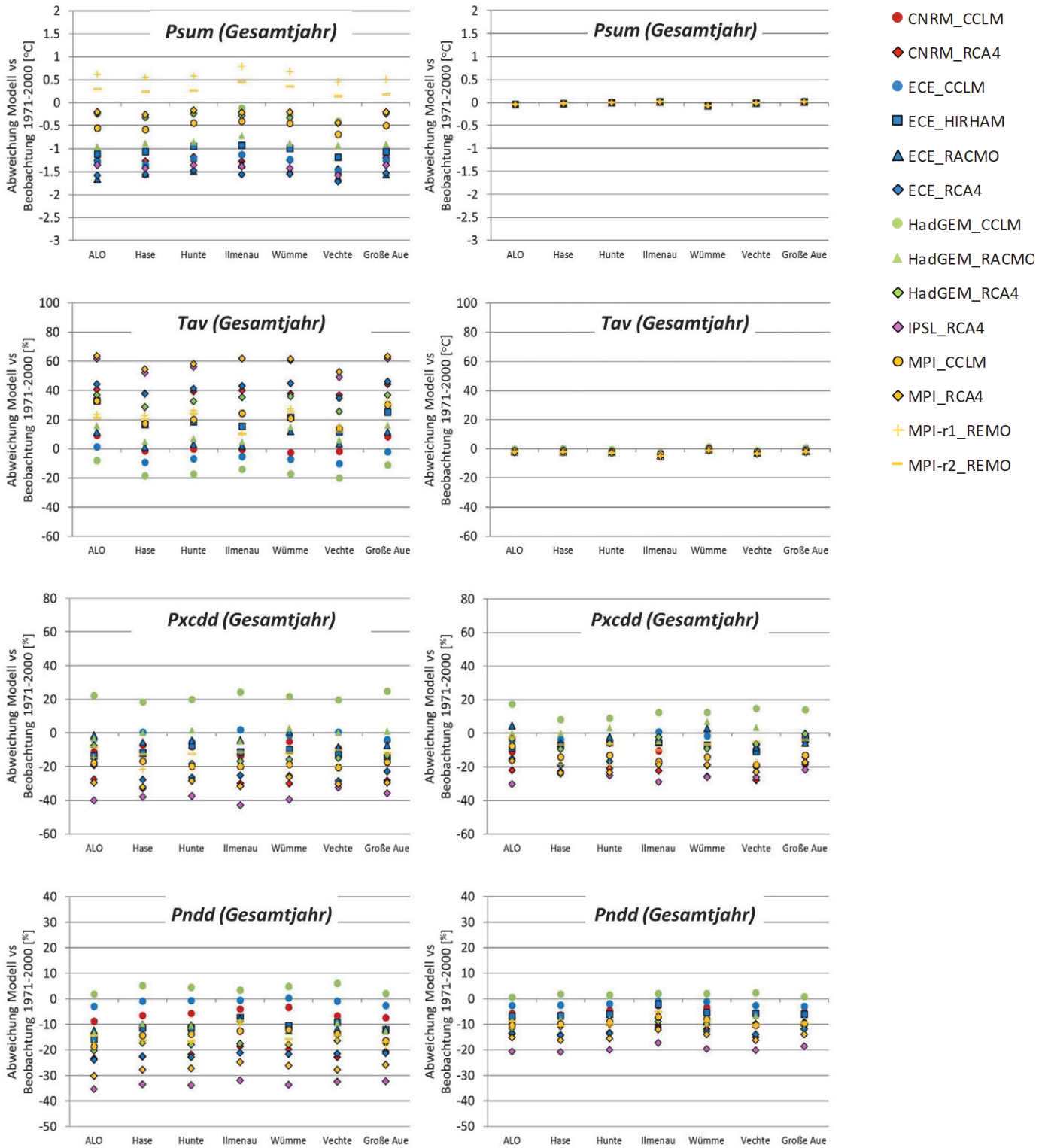


Abbildung 5-11: Abweichung der Klimamodelldaten (RCP8.5-Modelle) gegenüber der Beobachtung für die vier Klimagrößen Tagesmitteltemperatur (Tav), mittlere Niederschlagssumme (Psum), maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Pxcd) und Anzahl der Trockentage (Pnnd), jeweils für das Gesamtjahr, basierend auf den Gebietsmittelzeitreihen der sieben betrachteten Einzugsgebiete, gemittelt über den Zeitraum 1971-2000; links: ohne BIAS-Adjustierung, rechts: mit BIAS-Adjustierung (Linear Scaling)

## 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 erscheint, je kleiner die Bandbreite der Klimaänderung ausfällt. Große Bandbreiten deuten auf große Unsicherheiten hin. Erlaubt eine Ergeb-

nisdarstellung 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, basierend auf den Einzel-Signalen der Ensemble-Mitglieder. Die statistische Signifikanz eines Klimaänderungssignals wurde anhand verschiedener statistischer Tests nach den Empfehlungen aus den Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten (Linke et al., 2017) bestimmt (vgl. Abbildung 6-1). Das mittlere Signal wurde als Median aus allen Klimaprojektionen des jeweiligen Ensembles ermittelt.

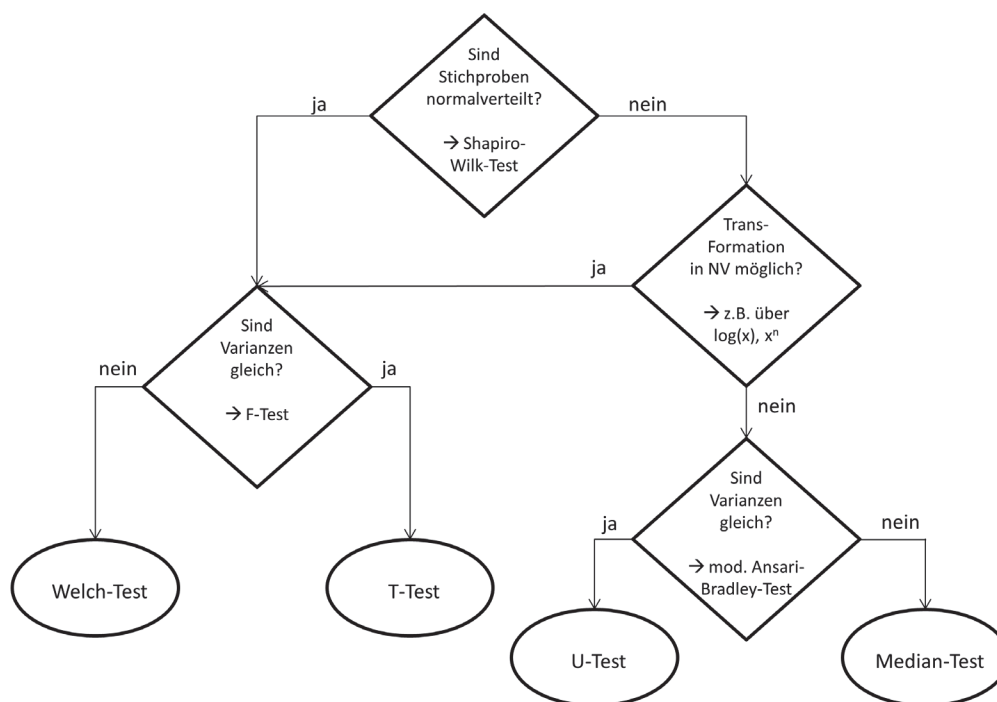


Abbildung 6-1: Entscheidungsbaum für Signifikanztests zur Identifikation der Robustheit von Klimasignalen (NLWKN, 2017)

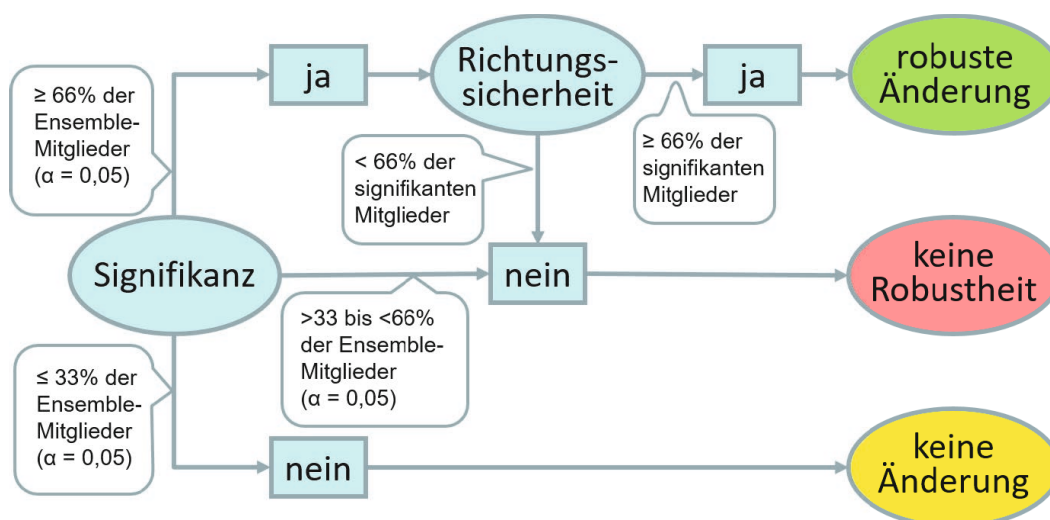


Abbildung 6-2: Schema zur Klassifizierung der Robustheit von Klimaänderungssignalen (NLWKN, 2017)

Es wurden drei Stufen der Robustheit unterschieden (vgl. Abbildung 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: 10 von 14 Ensemblemitgliedern zeigen eine statistisch signifikante Änderung an. Von den 10 signifikanten Signalen haben 7 ein positives Vorzeichen und 3 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: 10 von 14 Ensemblemitgliedern zeigen eine statistisch signifikante Änderung an. Von den 10 signifikanten Signalen haben 6 ein positives Vorzeichen und 4 ein negatives Vorzeichen.

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

Beispiel RCP8.5: 6 von 14 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: 10 von 14 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.

## 6.2 Analyse ausgewählter Trockenwetter-Indizes

Zur Charakterisierung der zukünftigen Klimaveränderungen auf Basis der Klimamodelldaten wurden verschiedene Kenngrößen analysiert (vgl. Tabelle 6-1). Neben spezifischen Trockenwetterindizes, die Auskunft über Intensität und Dauer von Trockenphasen geben, wurden auch mittlere Kenngrößen untersucht. In den Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten (Linke et al., 2017) wird empfohlen, bei der Betrachtung zukünftiger Änderungssignale Perioden einer Länge von mindestens 30 Jahren zu vergleichen. Als Referenzperiode (20C bzw. Z1) wird der Zeitraum 1971 bis 2000 definiert, als nahe Zukunft der Zeitraum 2021 bis 2050 (Z2) und als ferne Zukunft der Zeitraum 2071 bis 2100 (Z3). Zur Auswertung in KliBiW5 wurde für jede Kenngröße der Mittelwert des jeweiligen Zukunftszeitraumes mit dem Mittelwert der Referenzperiode verglichen. Dabei ergab sich das mittlere Änderungssignal des jeweiligen Klimamodellensembles (SRES A1B bzw. RCP8.5) als Median aus den Einzelergebnissen der 6 bzw. 14 Ensemblemitglieder. Bei den Niederschlagskenngrößen wurde die Änderung in Prozent ermittelt, bei der mittleren Temperatur in Grad Celsius und bei der maximalen Hitzewellendauer in Tagen (vgl. Tabelle 6-1). Neben den Änderungssignalen für das Gesamtjahr wurden auch die Signale für die vier meteorologischen Jahreszeiten Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August), Herbst (September, Oktober, November) und Winter (Dezember, Januar, Februar) analysiert. Die Ergebnisse der Klimasignalanalyse wurden flächendifferenziert für ganz Niedersachsen auf einem 10x10 km-Raster ausgegeben. Abbildung 6-3 zeigt flächendifferenzierte Änderungssignalkarten für die mittlere Temperatur, getrennt nach Zeitscheibe und nach zugrunde liegendem Klimamodellensemble. Farblich dargestellt ist das mittlere Änderungssignal (= Median der einzelnen Ensemblemitglieder) für die jeweilige Rasterzelle. Die Schraffur gibt Auskunft über die Robustheit des Signals (vgl. Kapitel 6.1). Da die Änderungssignale für die mittlere Temperatur als absolute Werte in °C angegeben sind, werden als Referenz auch Karten der beobachteten mittleren Temperatur im Referenzzeitraum 1971-2000 angegeben.

**Tabelle 6-1: Untersuchte Trockenwetterindizes in der Klimasignalanalyse**

| Index                          | Beschreibung   | Einheit | Änderung in |
|--------------------------------|--|---------|-------------|
| <b>Temperaturkenngrößen</b>    |  |         |             |
| Tav                            | Mittlere Tagesmitteltemperatur   | °C      | °C          |
| HWDmax                         | Maximale Hitzewellendauer: Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Tmax > dem tagesspezifischen 90%-Quantil | d       | d           |
| <b>Niederschlagskenngrößen</b> |  |         |             |
| Psum                           | Mittlere Niederschlagssumme für Tage mit N ≥ 1 mm/d  | mm      | %           |
| Pxcd                           | Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage mit N < 1 mm/d  | d       | %           |
| Pnnd                           | Anzahl der Trockentage mit N < 1 mm/d  | d       | %           |
| WSDmax                         | Maximale Niederschlagsdauer für Tage mit N ≥ 1 mm/d  | d       | %           |
| WSDmean                        | Mittlerer Niederschlagsdauer für Tage mit N ≥ 1 mm/d   | d       | %           |

### **Mittlere Temperatur (Tav):**

Die mittlere Temperatur weist in der nahen Zukunft Zunahmen von bis zu 2°C auf, die mit Ausnahme des Frühlings bei SRES A1B robust sind.

Der stärkste Temperaturanstieg ist im Herbst (RCP8.5) bzw. im Winter (SRES A1B) zu erwarten. In der fernen Zukunft erstrecken sich die Zunahmen der mittleren Temperatur von +1,5°C bis +4°C und sind durchweg robust. Die Zunahmen fallen im Frühling, Sommer und Herbst in beiden Zukunftszeiträumen beim „Weiter-wie-bisher“-Szenario um etwa ein Grad Celsius größer aus als beim gemäßigten Szenario. Insgesamt zeigt sich der stärkste Temperaturanstieg im Herbst und Winter.

### **Maximale Hitzewellendauer (HWDmax):**

Abbildung 6-4 zeigt die Klimaänderungssignale für die maximale Hitzewellendauer (HWDmax). Da die Änderungen als Absolutwerte in Tagen angegeben sind, werden auch hier Referenzkarten für die beobachtete maximale Hitzewellendauer im 20C-Zeitraum gezeigt. Es fällt auf, dass der beobachtete Wert im Gesamtjahr am höchsten ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich die HWDmax über Saisongrenzen hinweg erstreckt und in den einzelnen Jahreszeiten nicht komplett erfasst wird. Die Berechnung von Änderungssignalen wird durch diesen Effekt jedoch nur unwesentlich beeinträchtigt. Auf Basis beider Klimaszenarios kommt es in der nahen Zukunft zu einem Anstieg der maximalen Hitzewellendauer um bis zu 5 Tage. Bei A1B ist die Zunahme im Gesamtjahr und Winter am stärksten, bei RCP8.5 im Gesamtjahr und Herbst. Bei beiden Ensembles sind die Veränderungen im Frühling und Sommer am schwächsten ausgeprägt. In der fernen Zukunft kommt es zu deutlichen Zunahmen der maximalen Hitzewellendauern um bis zu +10 Tage, je nach Jahreszeit. In der Küstenregion können stellenweise noch stärkere Zunahmen verzeichnet werden. Die Veränderungen sind beim „Weiter-wie-bisher-Szenario“ etwas stärker ausgeprägt als beim gemäßigten Szenario. Die stärksten Zunahmen sind, wie auch in der nahen Zukunft, im Gesamtjahr und Winter (SRES A1B) bzw. im Gesamtjahr und Herbst (RCP8.5) zu erwarten, die schwächsten Veränderungen im Frühling.

Zusätzlich zur Ermittlung flächendifferenzierter Änderungssignale erfolgte eine Auswertung auf Basis einer Gebietsmittel-Zeitreihe für Niedersachsen. Die Ergebnisse wurden in Form von Boxplots grafisch aufbereitet. Ein Vorteil ist, dass neben dem Median auch die Spannbreite der projizierten Änderungen der einzelnen Ensemblemitglieder dargestellt wird. Abbildung 6-5 zeigt das mittlere Änderungssignal der Kenngrößen Tav und HWDmax für Niedersachsen für die vier Jahreszeiten und zwei Zeitscheiben. Wie bereits bei der Analyse der flächendifferenzierten Änderungssignalkarten deutlich wurde, zeigen sich die stärksten Zunahmen bei beiden Indizes im Herbst und Winter, während im Frühling, aber auch im Sommer weniger starke Zunahmen verzeichnet werden. In der nahen Zukunft sind die Bandbreiten der Änderungssignale bei Tav und HWDmax tendenziell eher gering. In der fernen Zukunft zeigt vor allem das SRES A1B-Ensemble bei der Änderung der maximalen Hitzewellendauer in allen Jahreszeiten bis auf den Sommer sehr große Bandbreiten. Im Gesamtjahr erstreckt sich die Bandbreite der projizierten Entwicklung von +5 Tage bis +12 Tage.



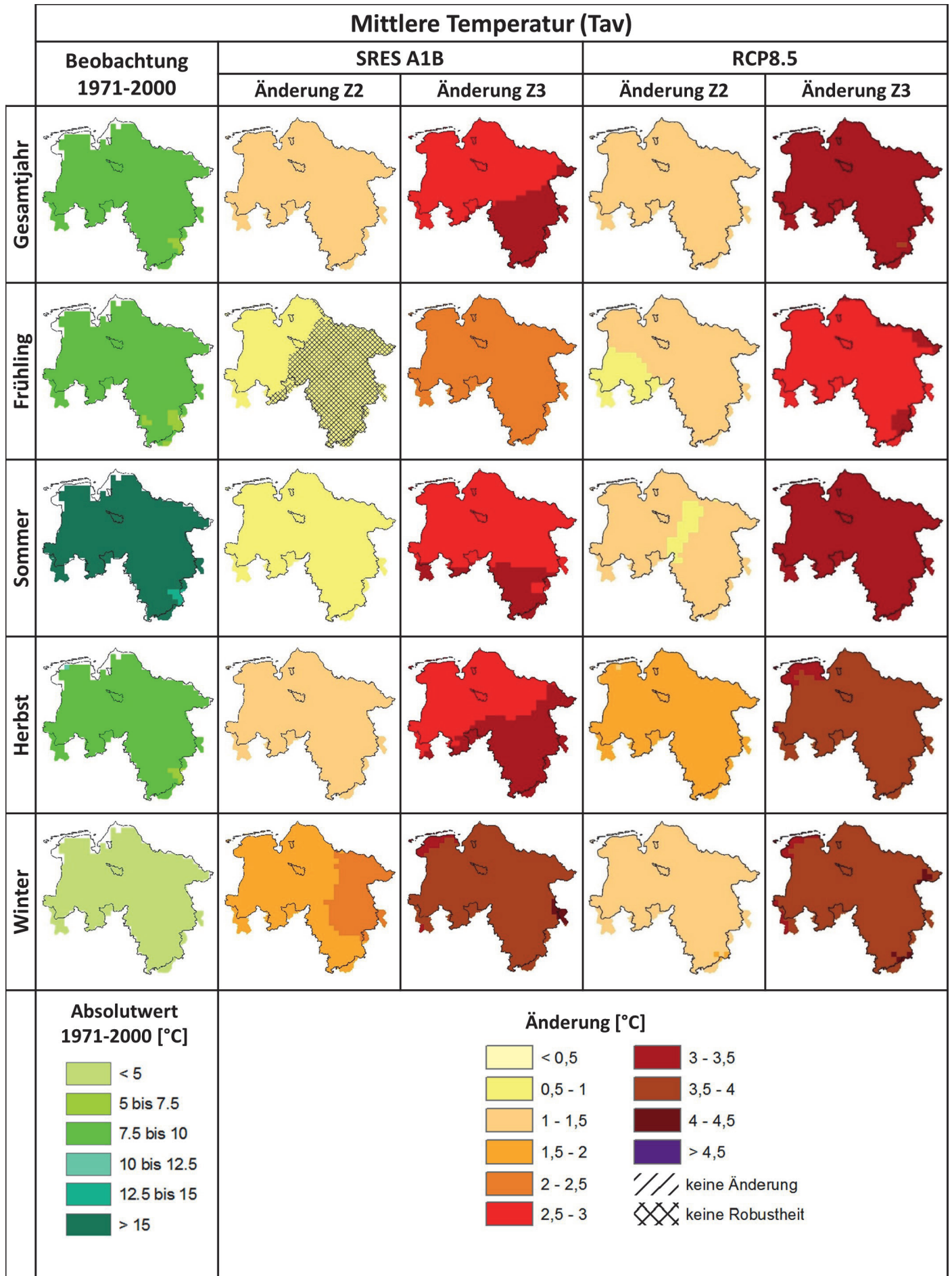


Abbildung 6-3: Projizierte Änderung der mittleren Temperatur in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100) gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5. Als Vergleichswert ist die mittlere beobachtete Temperatur im 20C-Zeitraum angegeben.

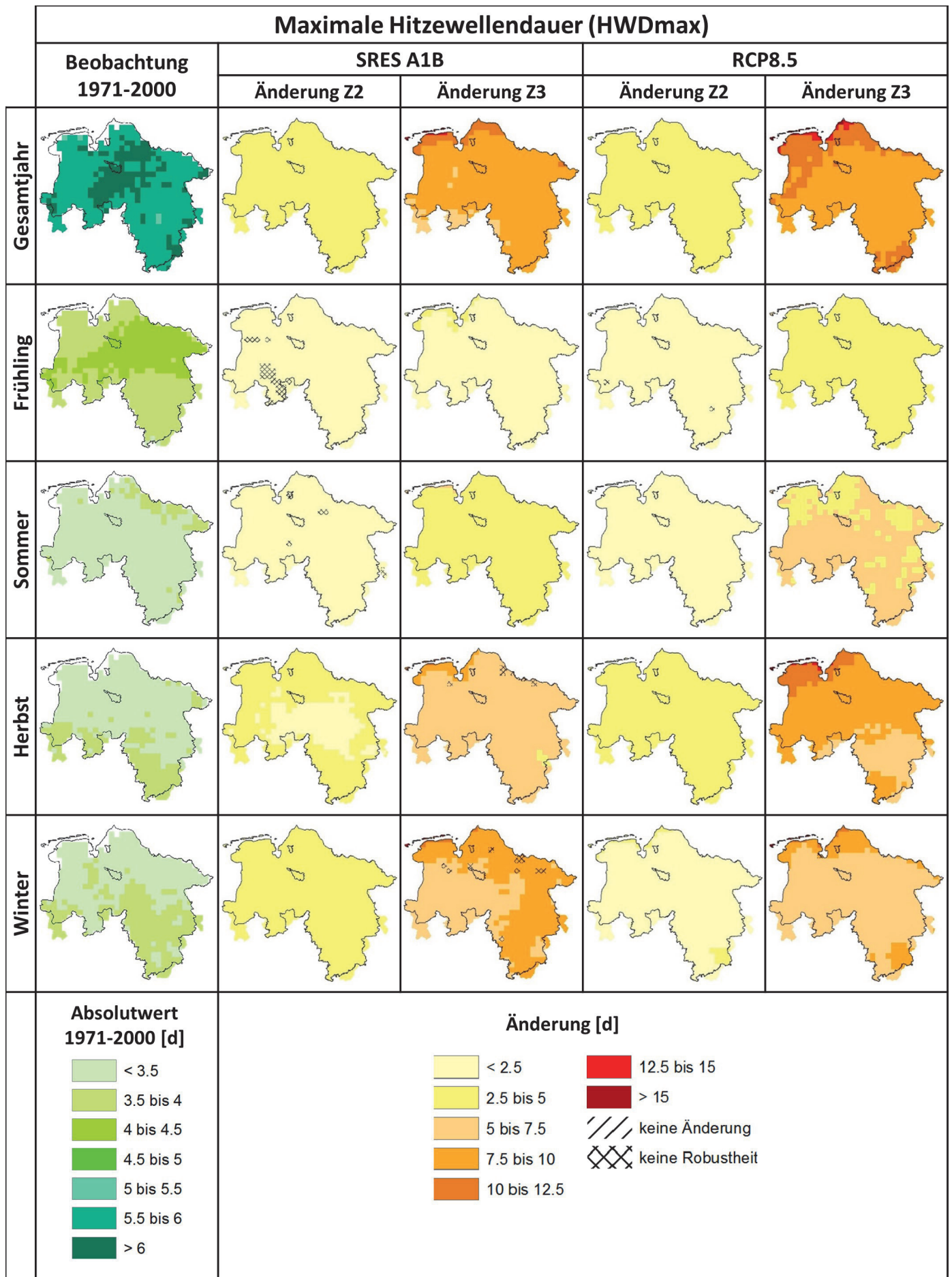
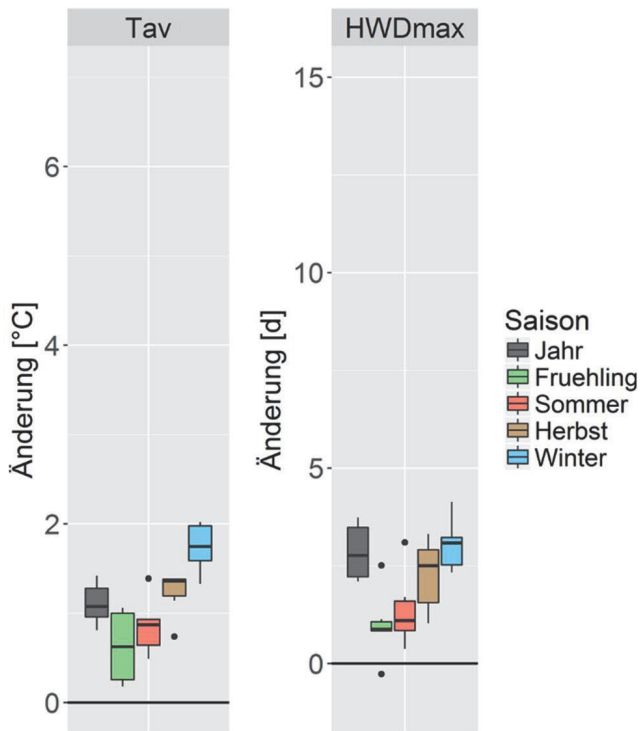
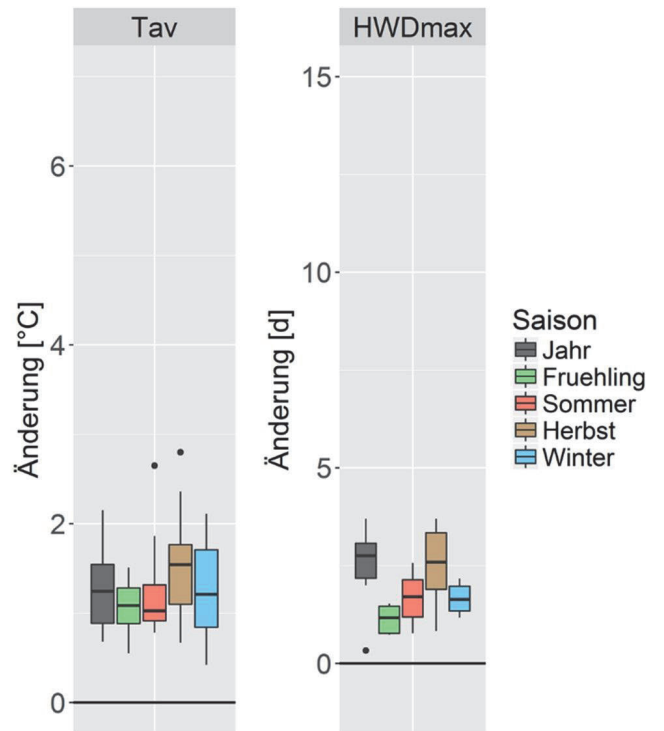


Abbildung 6-4: Projizierte Änderung der maximalen Hitzewellendauer in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100) gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5. Als Vergleichswert ist die maximale Hitzewellendauer im 20C-Zeitraum angegeben

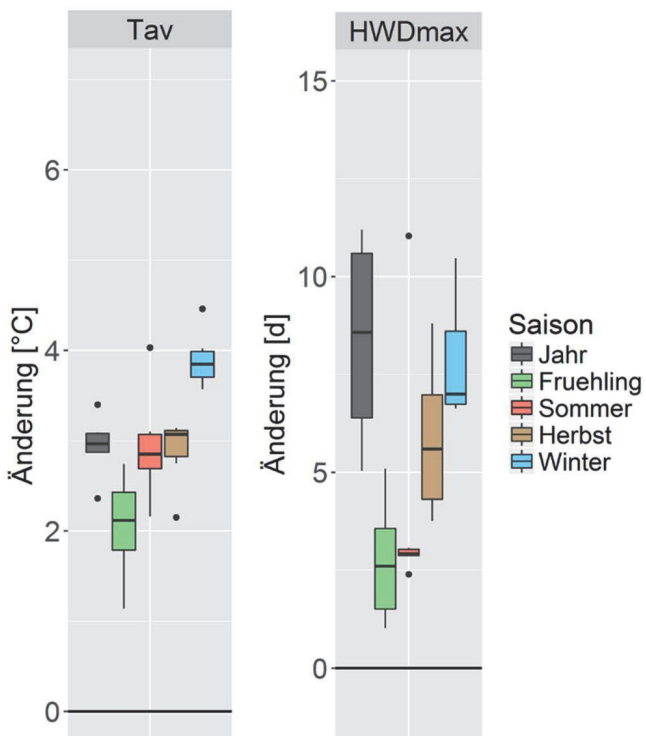
SRES A1B  $\Delta Z2$



RCP8.5  $\Delta Z2$



SRES A1B  $\Delta Z3$



RCP8.5  $\Delta Z3$

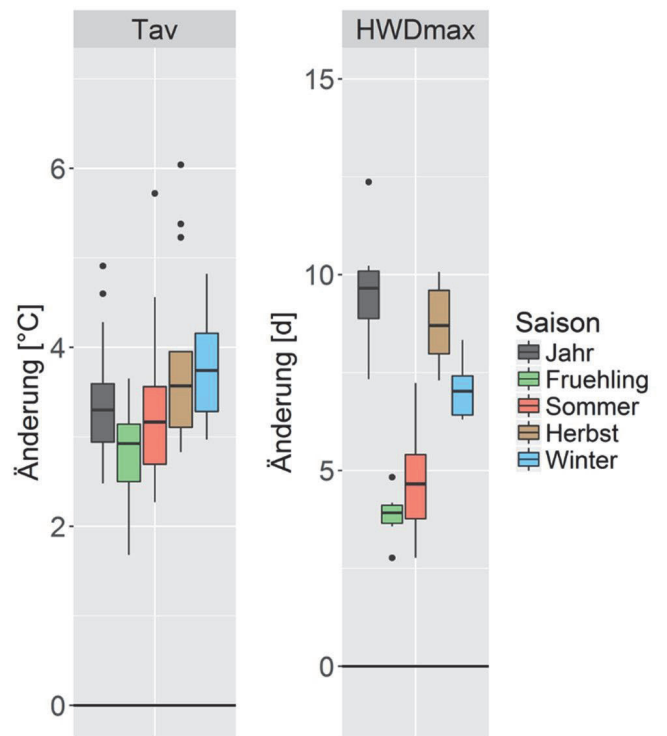


Abbildung 6-5: Projizierte Änderungssignale von trockenwetterspezifischen Temperaturkenngrößen in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) sowie in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100), jeweils gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000) ; oben links: Änderung in Z2 gegenüber 20C, basierend auf dem SRES A1B-Klimamodellensemble; oben rechts: Änderung in Z2 gegenüber 20C, basierend auf dem RCP8.5-Klimamodellensemble; unten links: Änderung in Z3 gegenüber 20C, basierend auf dem SRES A1B-Klimamodellensemble; unten rechts: Änderung in Z3 gegenüber 20C, basierend auf dem RCP8.5-Klimamodellensemble

### **Mittlere Niederschlagssumme (Psum):**

In der nahen Zukunft sind überwiegend keine robusten Veränderungen der mittleren Niederschlagssumme zu erwarten. In der fernen Zukunft kann es auf Basis des „Weiter-wie-bisher“-Szenarios im Gesamtjahr sowie im Frühling und Winter zu robusten Niederschlagszunahmen von +10 bis +30% kommen. Auf Basis des gemäßigten Szenarios sind Niederschlagszunahmen lediglich im Winter zu verzeichnen. Hier zeigt sich ein ausgeprägtes Nord-Süd-Gefälle mit Zunahmen von +30 bis +40% in der Küstenregion, +20% bis +30% im zentralen Niedersachsen und im Harz sowie +10 bis +20% im südlichen Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet. In den Sommermonaten hingegen kann es unter Betrachtung des A1B-Szenarios zu Niederschlagsabnahmen von -10 bis zu -30% kommen. Das RCP8.5-Szenario zeigt hier keine robusten Signale.

### **Mittlere Niederschlagsdauer (WSDmean):**

Bei beiden Ensembles kommt es im Frühling und im Herbst in der nahen Zukunft zu einer flächendeckenden, statistisch nicht signifikanten Zunahme. In der fernen Zukunft zeigen sich bei A1B ähnliche Tendenzen, mit einigen nicht signifikanten Abnahmen, u.a. im südlichen Vechte-EZG. Auf Basis des RCP8.5-Ensembles können in beiden Zukunftszeiträumen leichte, nicht signifikante Zunahmen festgestellt werden. Eine Ausnahme bildet der Sommer, in dem es in der fernen Zukunft zu einer leichten Abnahme kommen kann (bis etwa -20%), die jedoch statistisch ebenfalls nicht signifikant ist.

### **Maximale Niederschlagsdauer (WSDmax):**

Die maximale Niederschlagsdauer zeigt ähnliche Änderungssignale wie die mittlere Niederschlagsdauer. In der nahen Zukunft werden keine statistisch signifikanten Veränderungen projiziert. In der fernen Zukunft kommt es auf Basis des A1B-Ensembles im Sommer zu signifikanten Abnahmen der maximalen Niederschlagsdauern um -10 bis -30%. Das RCP8.5-Ensemble deutet im Sommer ebenfalls auf Abnahmen hin, die jedoch in vielen Bereichen statistisch nicht signifikant („keine Änderung“) und, vor allem im westlichen Niedersachsen und an der Küste, nicht robust sind. In allen anderen Jahreszeiten ist wenig Veränderung in der maximalen Dauer von Niederschlagsereignissen zu erwarten.

### **Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Pxcdd):**

Unter Betrachtung des gemäßigten Szenarios kann es in der fernen Zukunft zu deutlichen Zunahmen der maximalen Trockendauer von +20 bis +40% kommen. Auf Basis des RCP8.5 Ensembles sind keine robusten Veränderungen zu verzeichnen.

### **Anzahl der Trockentage (Pndd):**

Unter der Betrachtung beider Klimamodellensembles kommt es in der nahen Zukunft zu einer leichten Zunahme der Trockentage im Sommer und regional im Herbst sowie zu einer leichten Abnahme der Trockentage in den übrigen Jahreszeiten. Diese Veränderungen sind jedoch überwiegend statistisch nicht signifikant, im Winter ist das Signal bei A1B kaum robust. In der fernen Zukunft zeigen die beiden Klimamodellensembles unterschiedliche Signale. Bei A1B kommt es im Sommer zu einer deutlichen Zunahme der Anzahl der Trockentage um +15 bis +20%, an der Nordseeküste und im äußersten Osten des Landes etwas weniger. Im Winter zeigt sich eine robuste Abnahme der Anzahl der Trockentage um -10 bis -15% im nördlichen Niedersachsen sowie im Harz und im Bereich Osnabrück. Das RCP8.5-Ensemble projiziert für den Herbst und den Sommer mittlere Zunahmen der Trockentage von 0 bis +10%, regional etwas höher, die jedoch durchweg nicht robust sind. Im Winter zeigt sich eine leichte Abnahme der Trockentage, die aber in einigen Regionen unsicher und in anderen nicht signifikant ist. In den Übergangsjahreszeiten kann weder bei RCP8.5 noch bei A1B eine robuste Veränderung der Trockentage festgestellt werden.



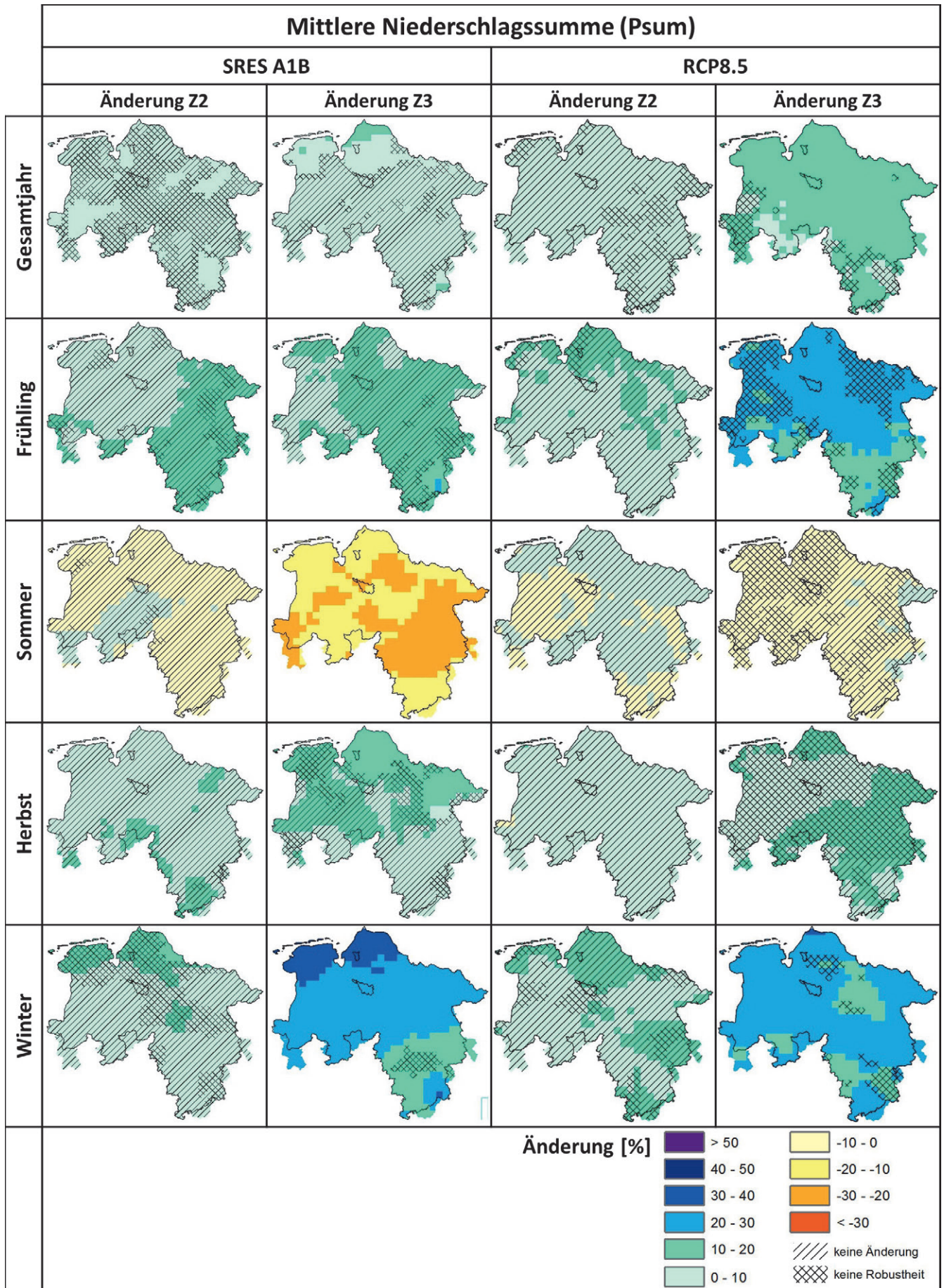


Abbildung 6-6: Projizierte Änderung der mittleren Niederschlagssumme in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100) gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.



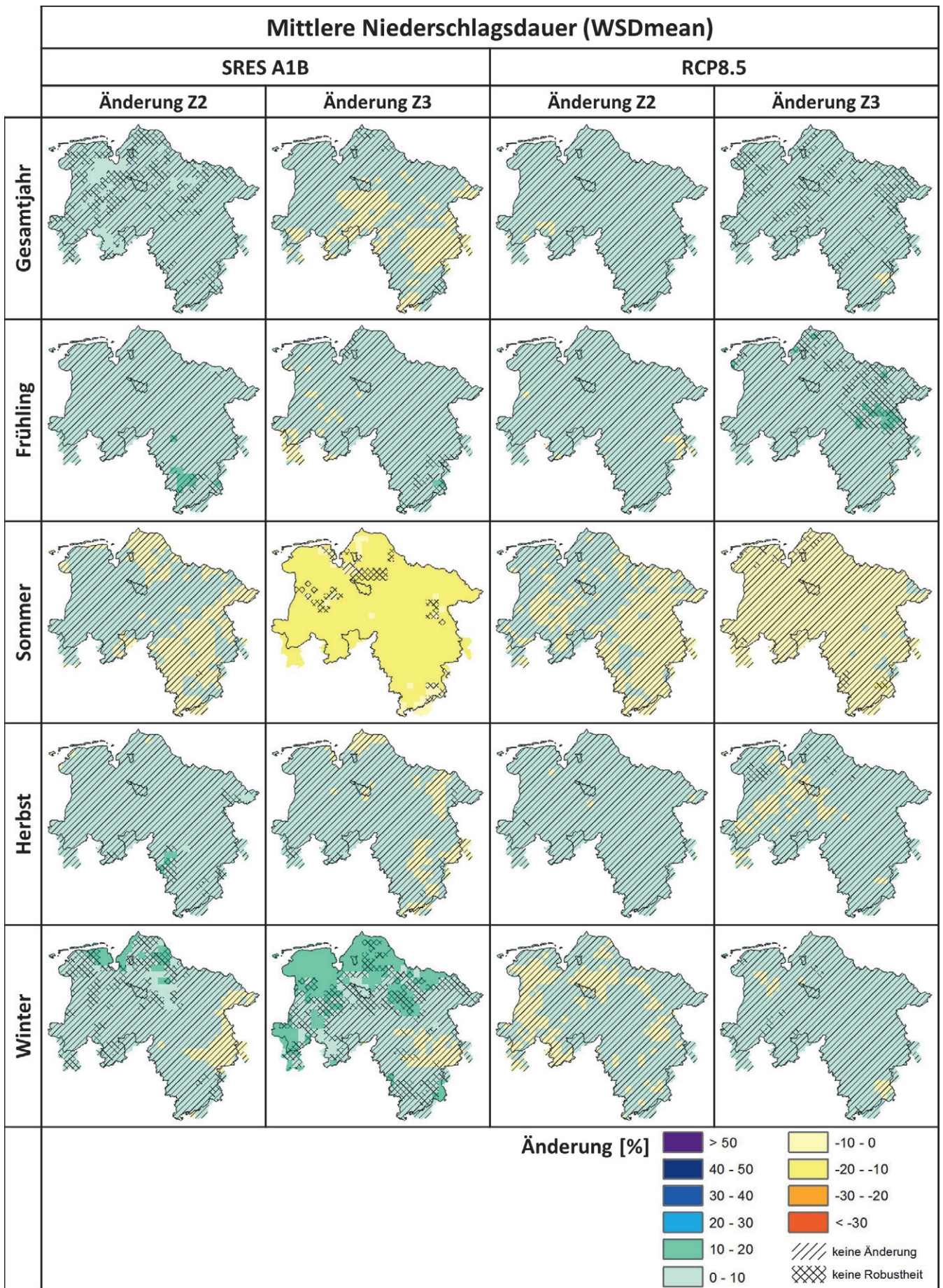


Abbildung 6-7: Projizierte Änderung der mittleren Niederschlagsdauer in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der ferneren Zukunft Z3 (2071-2100) gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.



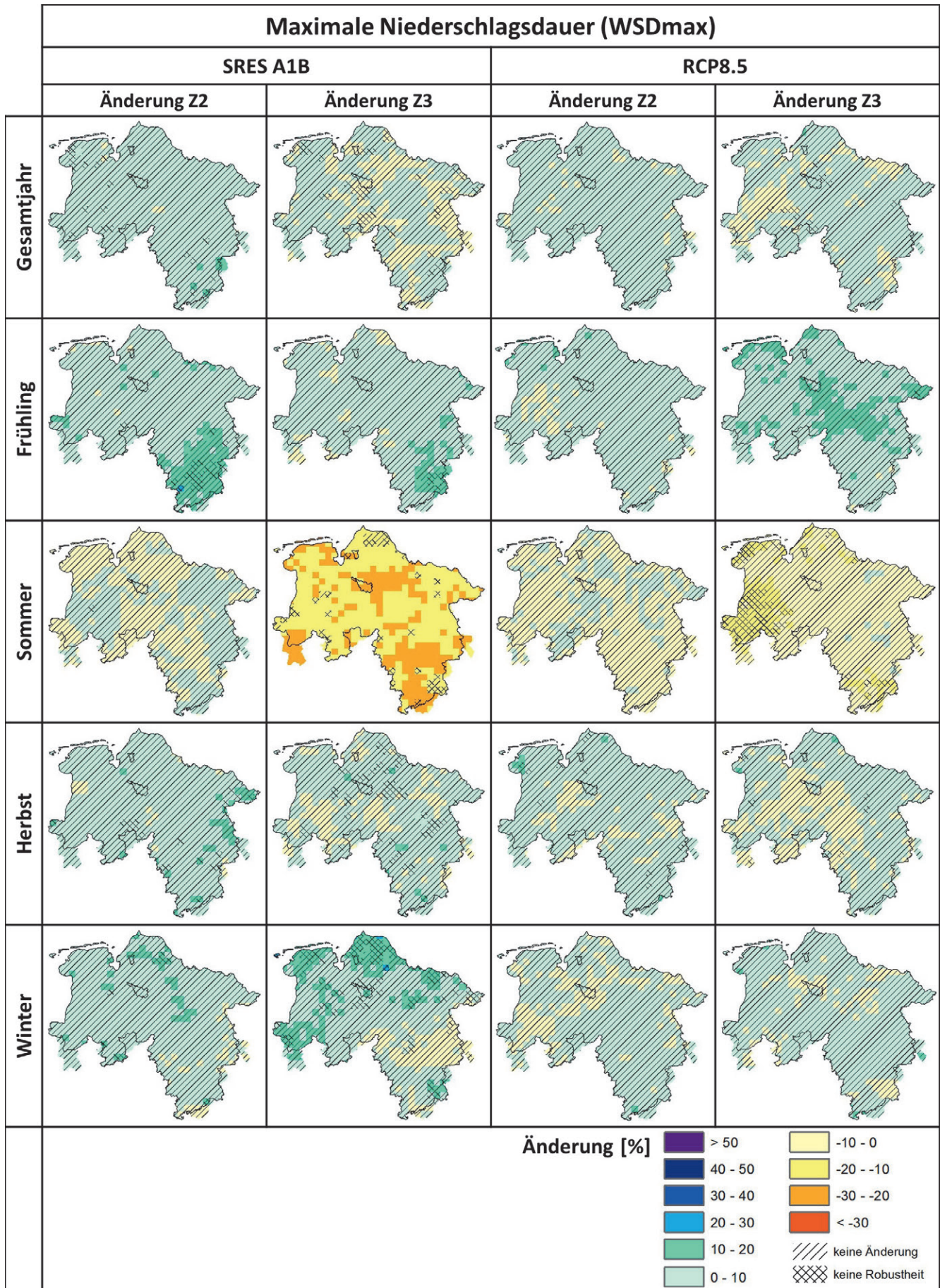


Abbildung 6-8: Projizierte Änderung der maximalen Niederschlagsdauer in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100) gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.



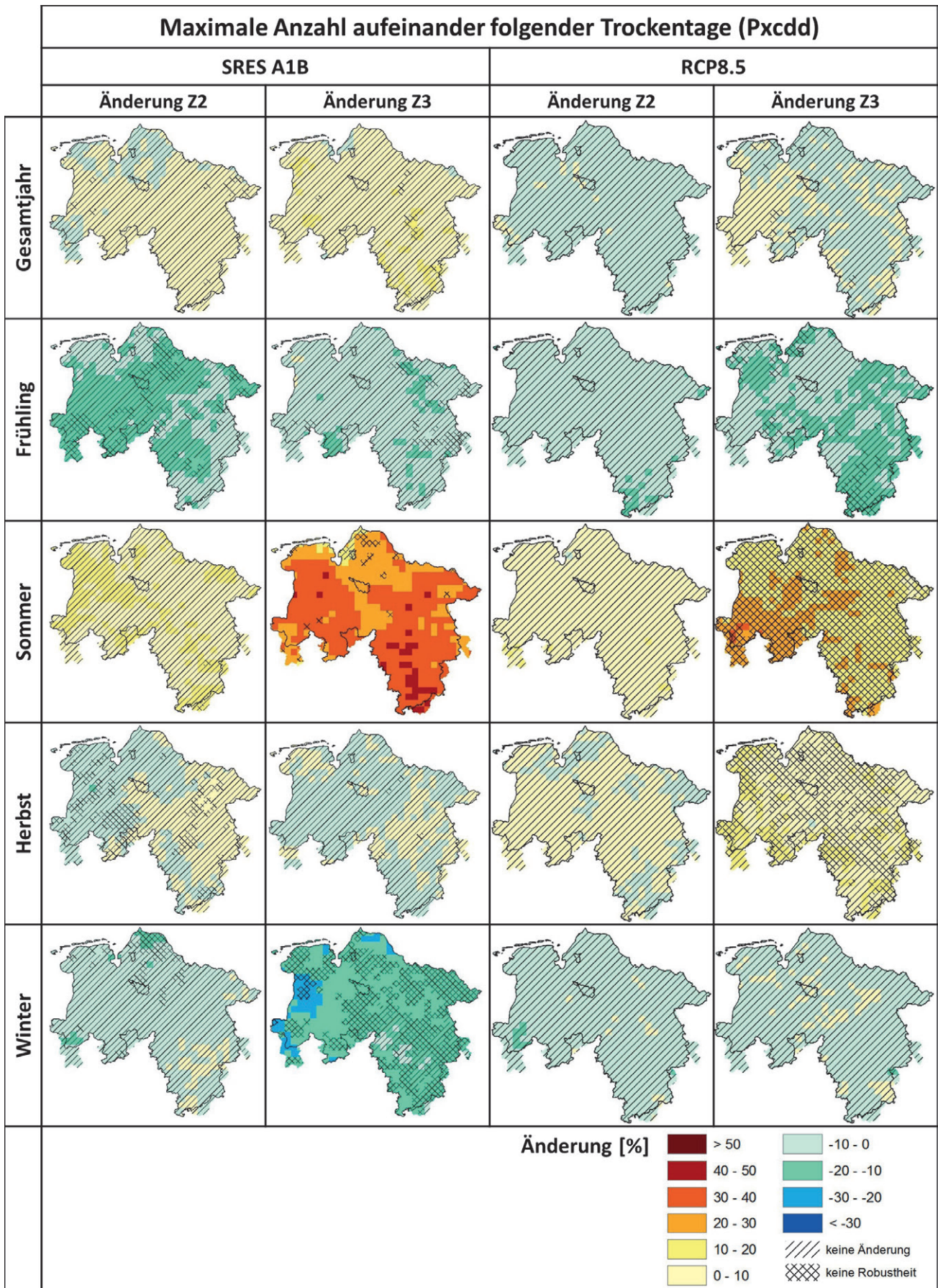


Abbildung 6-9: Projizierte Änderung der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100) gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.



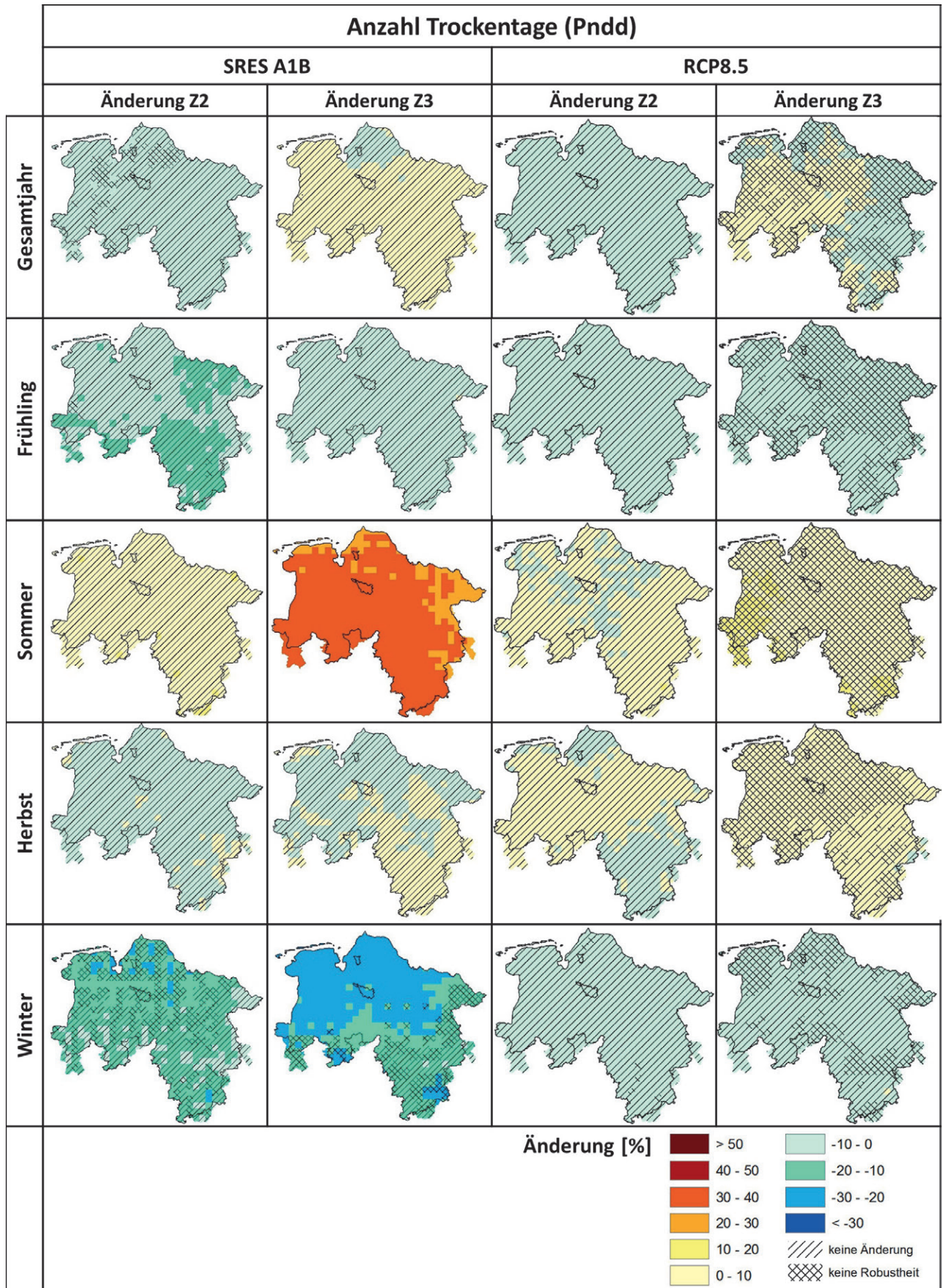


Abbildung 6-10: Projizierte Änderung der Anzahl der Trockentage in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100) gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.

Auch für die Niederschlagskenngrößen wurde neben den flächendifferenzierten Klimasignalkarten eine Gebietsmittelzeitreihe für Niedersachsen ausgewertet, um Bandbreite und Verteilung der einzelnen Klimamodellketten innerhalb eines Ensembles darzustellen. Für die nahe Zukunft sind die mittleren Änderungssignale für Niedersachsen in Abbildung 6-11 dargestellt, für die ferne Zukunft in Abbildung 6-12.

In der nahen Zukunft (2021-2050) zeigen sich bei beiden Klimamodellensembles ähnliche Änderungssignale und Bandbreiten. Dies spiegelt sich auch in den Klimasignalkarten (Abbildung 6-6 bis Abbildung 6-10) wider, die ähnliche Tendenzen bezüglich Stärke sowie Robustheit der Änderungen aufweisen.

In der fernen Zukunft (2071-2100) sind Unterschiede zwischen den von den beiden Ensembles projizierten Änderungssignalen festzustellen. Bei SRES A1B sind die Bandbreiten insgesamt deutlich geringer als bei RCP8.5, das heißt die einzelnen Modelle innerhalb des Ensembles stimmen in ihren Aussagen stärker überein. Das ist auch darauf zurückzuführen, dass alle im A1B-Ensemble betrachteten Regionalmodelle von demselben Globalmodell angetrieben werden. Die Modelübereinstimmung wird besonders im Sommer deutlich. Hier deuten die Mitglieder des A1B-Ensembles einstimmig auf trockenere zukünftige Verhältnisse hin, was sich auch in den flächendifferenzierten Klimasignalkarten in Abbildung 6-6 bis Abbildung 6-10 zeigt. Innerhalb des RCP8.5-Ensembles hingegen gibt es im Sommer bei allen niederschlagsbasierten Trockenwetterindizes eine deutliche Bandbreite. Maximum und Minimum der Einzelsignale erstrecken sich immer vom positiven bis hin zum negativen Bereich. Auch wenn häufig der Großteil der Ensemblemitglieder trockenere Verhältnisse projiziert, wie beispielsweise bei der maximalen Trockendauer oder der maximalen Niederschlagsdauer, ist das Signal häufig nicht robust, wie die Schraffur in der jeweiligen Änderungssignalkarte zeigt.

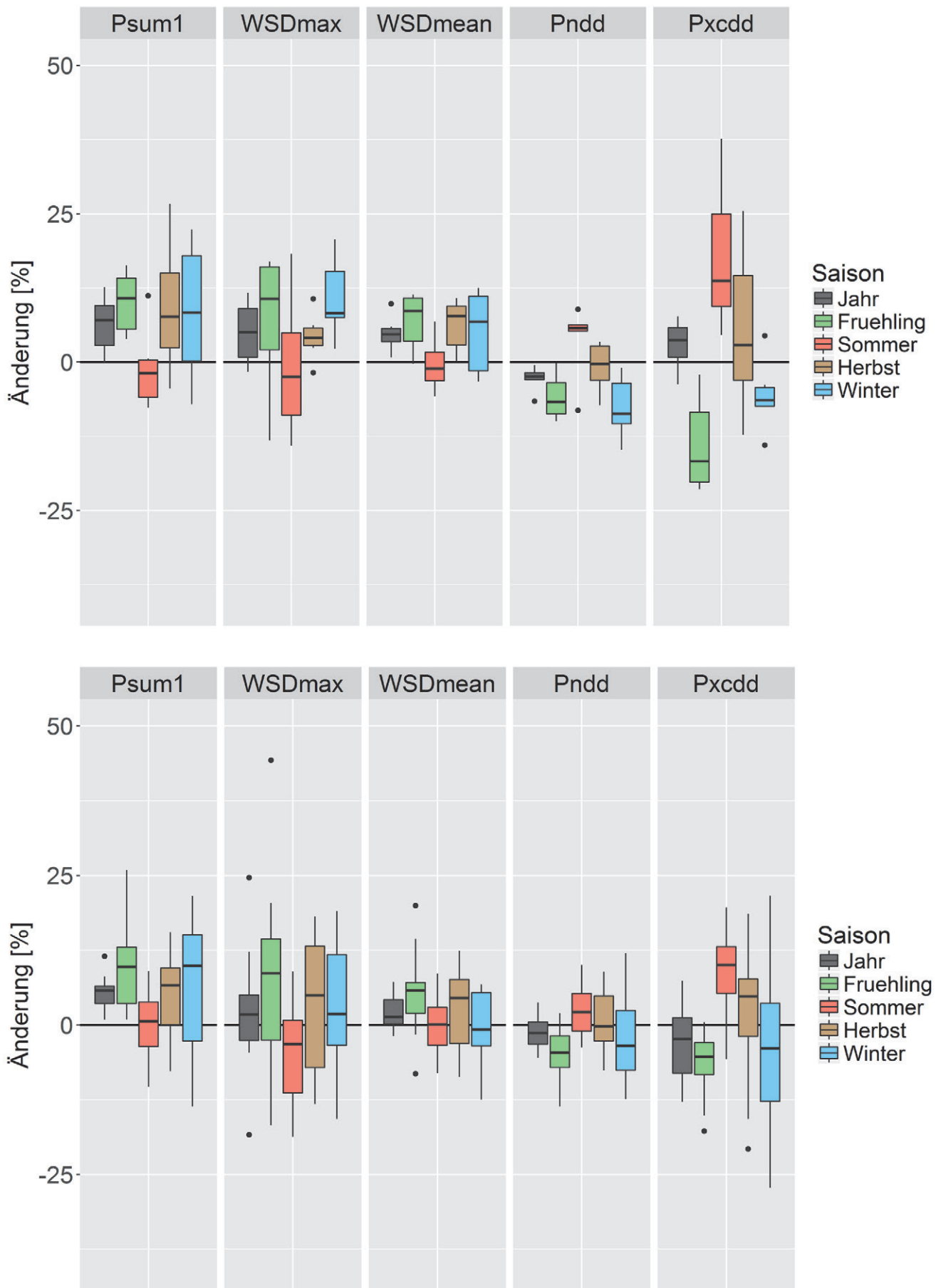


Abbildung 6-11: Projizierte Änderungssignale von trockenwetterspezifischen Niederschlagskenngrößen, basierend auf dem SRES A1B-Klimamodellensemble (oben) und dem RCP8.5-Szenario (unten) in Z2 (2021-2050) gegenüber 20C (1971-2000)

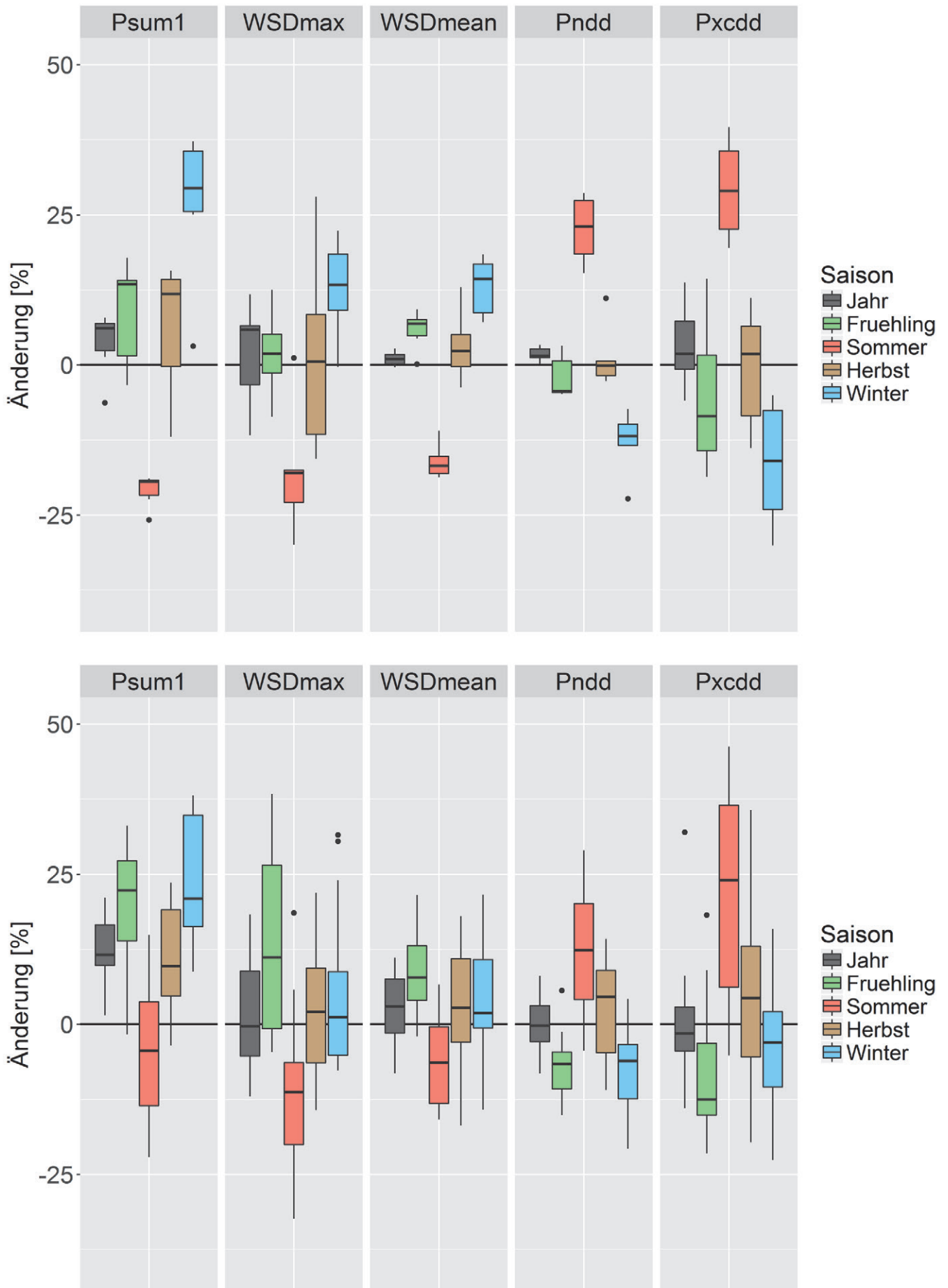


Abbildung 6-12: : Projizierte Änderungssignale von trockenwetterspezifischen Niederschlagskenngrößen, basierend auf dem SRES A1B-Klimamodellensemble (oben) und dem RCP8.5-Szenario (unten) in Z3 (2071-2100) gegenüber 20C (1971-2000)



### 6.3 Analyse der möglichen Starkregenverhältnisse der Zukunft

Die Einschätzung zukünftiger Starkregenverhältnisse in Niedersachsen erfordert die Analyse der Niederschlagszeitreihen von Klimamodell­daten. Das bisherige Klimamodell­daten-Ensemble für KliBiW umfasst grundsätzlich Niederschlagszeitreihen auf Tagesbasis, die nicht für die Starkregenanalyse kurzer Dauerstufen geeignet sind (siehe Kapitel 3.3). Es kann allerdings auf stündliche Niederschlagszeitreihen aus vier Klimamodellreihen zurückgegriffen werden. Den Klimamodell­daten:

- ECH5-r1\_CLM 1 (hier: CLM1) [h]
- ECH5-r2\_CLM 2 (hier: CLM2) [h]
- ECH5-r1\_REMO-UBA (hier: REMO\_UBA) [h]
- ECH5-r2\_REMO BfG (hier: REMO\_BfG) h]

liegen das Globalmodell ECHAM5 sowie die Regionalmodelle REMO und COSMO-CLM zugrunde. Alle vier Klimamodellketten sind dem SRES A1B-Ensemble zuzuordnen. Die Ableitung von Änderungssignalen für die Zukunft geht immer mit Unsicherheiten einher. Diese Unsicherheiten setzen sich aus Unsicherheiten aus dem Regionalisierungsverfahren sowie u.a. aus Unsicherheiten durch die Klimamodell­daten zusammen. Um die Unsicherheiten aus den Klimamodell­daten beurteilen zu können, wurde die daraus abgeleitete regionale Starkregenstatistik zunächst für den Zeitraum von 1951 bis 2016 evaluiert.

Um die Ergebnisse der regionalen Starkregenanalysen zwischen den Beobachtungen und den Klimamodell­daten vergleichbar zu machen, wurde die Datenverfügbarkeit der Beobachtung auf die Klimamodell­daten auf­ge­prägt. Dafür wurde jeder Niederschlagsstation jeweils die Zeitreihe der Rasterzelle aus den Klimamodell­daten, in dem die Niederschlagsstation platziert ist, zugeordnet. Zudem werden nur Zeiträume aus den Klimamodell­daten verwendet, an denen an der jeweiligen Niederschlagsstation eine Beobachtung vorliegt. Anschließend wird eine regionale Starkregenstatistik (siehe Kapitel 3.3.2) für die angepassten Klimamodell­daten mit dem Index-Verfahren erstellt. Durch dieses Vorgehen können im Anschluss die Abweichungen der regionalen Starkregenstatistik zwischen Beobachtung und Klimamodell­daten für alle vier Klimamodell­daten sowie verschiedene Dauerstufen und Jährlichkeiten bestimmt werden. Die Abweichungen wurden jeweils an den 19 Stationen mit langen Niederschlagszeitreihen ermittelt. Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 zeigen die maximale Abweichung der regionalen Starkregenstatistik zwischen Beobachtung und Klimamodell­daten für die Dauerstufen 1 h, 6 h und 18 h für die Jährlichkeiten 10 a und 100 a.

Die Ergebnisse zeigen, dass aus den vorliegenden Klimamodell­daten in stündlicher Auflösung ausschließlich der Modelllauf ECH5 r1\_CLM ohne weitere Anpassung die regionale Starkregenstatistik der Gegenwart zufriedenstellend abbilden kann. Eine Korrektur der Niederschlagszeitreihen mit stündlicher Auflösung, in Anlehnung an die Vorgehensweise der Bias-Adjustierung der Tageswert-Zeit­reihen (s. Kapitel 5.5), erscheint nicht zielführend, da das angewendete Korrekturverfahren des Linear-Scaling nicht auf die Anpassung der Daten

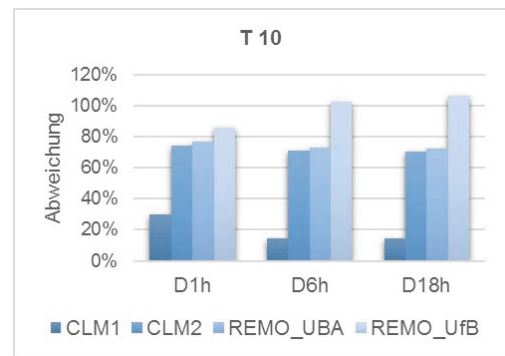


Abbildung 6-13: Abweichungen der regionalen Starkregenstatistik zwischen Beobachtung und Klimamodell­daten für ausgewählte Dauerstufen und die Jährlichkeit 10 a

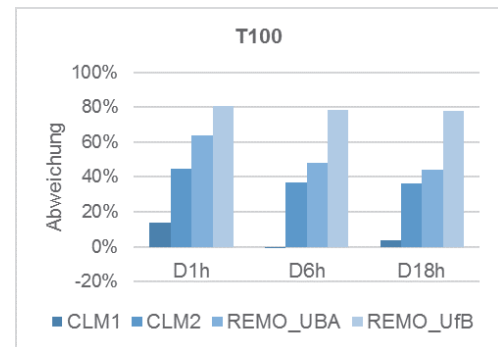


Abbildung 6-14: Abweichungen der regionalen Starkregenstatistik zwischen Beobachtung und Klimamodell­daten für ausgewählte Dauerstufen und die Jährlichkeit 100 a

im Extrembereich fokussiert ist. Weitere Verfahren zur BIAS-Adjustierung wurden im Zuge von KliBiW 5 nicht betrachtet. Es können derzeit somit noch keine zuverlässigen Zukunftsprognosen für Starkregenverhältnisse in Niedersachsen aus dem aktuellen Klimamodell-Ensemble abgeleitet werden.

### 6.4 Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse der Analyse der möglichen zukünftigen Klimaverhältnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

#### Nahe Zukunft:

- Es kann zu einer leichten Zunahme der mittleren Niederschlagssumme und Niederschlagsdauer in allen Jahreszeiten bis auf den Sommer kommen.
- Die maximale Trockendauer kann im Sommer leicht zunehmen.
- Es ist ein Anstieg der mittleren Temperatur um 0,5 bis 2 °C, je nach Jahreszeit, zu erwarten.
- Die maximale Hitzewellendauer kann um 1 bis 3 Tage zunehmen.

#### Ferne Zukunft:

- Es kann zu einer deutlichen Zunahme der mittleren Winterniederschläge kommen.
- Es wird eine Zunahme der maximalen Trockendauer im Sommer projiziert, vor allem durch SRES A1B
- Es ist eine Zunahme der mittleren Temperatur um 2 bis 4 °C, je nach Jahreszeit, zu erwarten.
- Die maximale Hitzewellendauer kann um 3 bis 10 Tage zunehmen.

## 7 Analyse der möglichen hydrologischen Verhältnisse der Zukunft

### 7.1 Ermittlung veränderter zukünftiger Niedrigwasserverhältnisse mit einem statistischen Prognosemodell

Bei der Einschätzung zukünftiger Niedrigwasserverhältnisse auf Basis projizierter Klimaänderungen können statistische Ansätze genutzt werden, um Richtung und Grad möglicher Änderungen zu bestimmen. Im Gegensatz zur prozessbasierten hydrologischen Modellierung können Modelle entwickelt werden, die eine direkte Schätzung von Niedrigwasserindizes lediglich auf Basis einer Reihe klimatischer Kenngrößen ermöglichen. Das Vorgehen hat zum Ziel, die direkte Verbindung zwischen meteorologischen und hydrologischen Ereignissen zu nutzen. Demnach hat ein Niedrigwasserereignis – in anthropogen unbeeinflusstem Zustand – stets eine meteorologische Ursache. Daher ist anzunehmen, dass sich unterschiedliche Merkmale des Ereignisses, wie Stärke, Dauer oder Intensität, durch Merkmale der vorangegangenen meteorologischen Verhältnisse abbilden lassen. Die Verwendung von Kombinationen unterschiedlicher Charakteristika verschiedener klimatischer Größen kann dabei u.U. zu annehmbaren Schätzungen hydrologischer Indizes führen. Die simplifizierte Modellstruktur ermöglicht zudem eine einfache und schnelle Anwendung über eine Vielzahl von Einzugsgebieten und somit eine flächendeckende Abschätzung regionaler Änderungssignale im Niedrigwasserverhalten.

#### 7.1.1 Modellbeschreibung

Der statistische Modellansatz soll eine direkte Schätzung jährlicher Niedrigwasserindizes (NWI) auf Basis vorhergegangener Trockenwetterindizes (TWI) ermöglichen. Die Anwendung mit abgeleiteten TWI aus Klimamodell-daten bringt somit eine grundlegende Abschätzung zukünftiger Niedrigwasserverhältnisse hervor. Als generelles Verfahren für die statistische Modellierung wird die multiple lineare Regression (MLR) gewählt.

Es werden zwei Ansätze für das statistische Prognosemodell getestet: a) die individuelle Anpassung von zeitlichen Modellen zur Prognose jährlicher NWI an Pegeln mit langjähriger Beobachtung des Abflusses (Stationsmodelle) und b) die gemeinsame Anpassung eines zeitlichräumlichen Modells über mehrere Gebiete zur regionalen Prognose jährlicher NWI an beobachteten und unbeobachteten Pegeln (regionale Modelle). Der Vorteil der Stationsmodelle liegt in ihrer Genauigkeit, d.h. die Anpassungsgüte der lokal angepassten Modelle ist erwartungsweise höher als bei Modellen, die für ganze Regionen gelten und zeitliche und räumliche Schätzung kombinieren. Neben der Möglichkeit der Schätzung von NWI in unbeobachteten Gebieten bzw. an Pegeln mit geringer Aufzeichnungslänge ist bei den regionalen Modellen die große Anzahl an Freiheitsgraden von Vorteil, d.h. aufgrund der enormen Datenmenge, die auf regionaler Ebene für die Modellanpassung zur Verfügung steht, können Modellparameter robuster bestimmt werden und eine Überanpassung wird ausgeschlossen. Mit Überanpassung (engl. „overfitting“) ist gemeint, dass auf Basis kleiner Stichproben und Modelle mit vielen Parametern letztere nicht robust geschätzt werden, da Werte ange-

nommen werden, die explizit zur Stichprobe passen, aber nicht darüber hinaus anwendbar sind. Zudem wird erwartet, dass Regionalmodelle die räumliche Konsistenz im Niedrigwasserverhalten bewahren, die bei individueller Modellanpassung u.U. verloren geht.

Für die Anpassung der Stationsmodelle stehen für jeden Pegel eine Vielzahl potentieller erklärender Variablen zur Verfügung, während die Zeitreihen der Zielgrößen, d.h. der verschiedenen Niedrigwasserindizes, begrenzt sind. Um eine Überanpassung der Modelle im kurzen Kalibrierungszeitraum zu vermeiden, was zu nicht-robusten Schätzungen der Modelle für die Zukunft führen kann, und um Wechselwirkungen zwischen den Regressoren gering zu halten, wird vor Anpassung der linearen Regressionsmodelle eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Diese kombiniert eine Vielzahl erklärender Variablen zu einer geringen Anzahl orthogonaler Hauptkomponenten, d.h. die Anzahl der Prädiktoren im Regressionsmodell wird reduziert und die Korrelation zwischen den Regressoren minimiert.

Für die regionalen Modelle wird eine Paneldatenregression durchgeführt, d.h. es erfolgt eine gemeinsame Anpassung der Modelle über eine große Anzahl beobachteter Pegel. Das Regressionsproblem erweitert sich somit von einer rein zeitlichen zu einer zeitlichräumlichen Schätzung. Folglich werden auch die Zielvariablen, d.h. die Niedrigwasserindizes, über die Einheiten Zeit und Raum im Modell berücksichtigt. Da alle Zeitreihen der beobachteten Pegel für die Modellanpassung kombiniert werden und somit eine große Anzahl an Freiheitsgraden zur Verfügung steht, ist eine Überanpassung der Modelle unproblematisch. Statt Hauptkomponenten werden die meteorologischen Indizes direkt als Regressoren im Modell verwendet. Um die räumliche Schätzung des Modells zu ermöglichen und Unterschiede zwischen verschiedenen Gebieten und Flussabschnitten abzubilden, werden zusätzlich zu den meteorologischen Indizes physiografische Einzugsgebietseigenschaften in das Modell inkludiert, die über die Zeit unverändert bleiben.

#### 7.1.2 Modellanpassung

Insgesamt stehen für das Gebiet Niedersachsen 268 Abflussstationen mit unterschiedlicher Reihenlänge zur Verfügung. 162 Pegel weisen dabei eine ausreichende

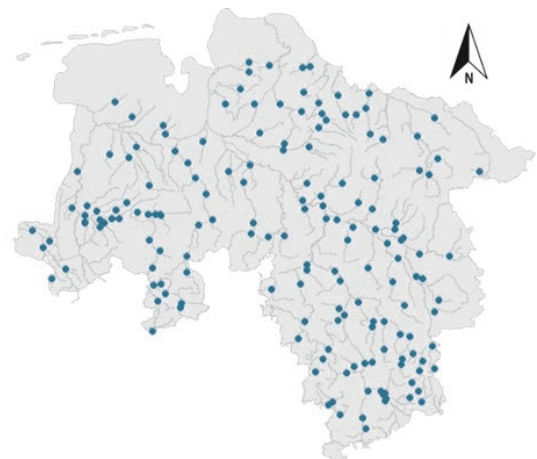


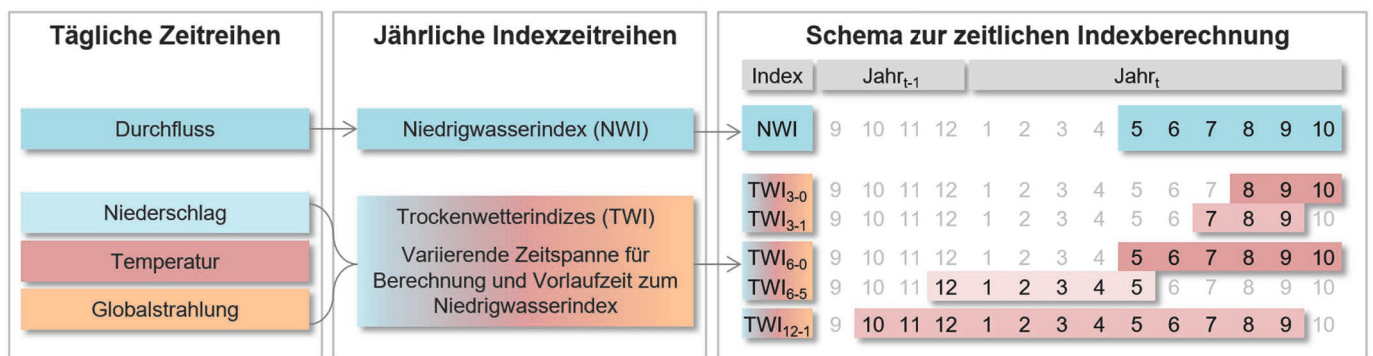
Abbildung 7-1: Verfügbare Pegel zur Kalibrierung der statistischen Modelle

Reihenlänge für die Kalibrierung der statistischen Modelle auf (vgl. Abbildung 7-1). Als Input für Kalibrierung und Validierung der Regressionsmodelle wurden die interpolierten beobachteten Klimagrößen (vgl. Kapitel 3.1) für den Zeitraum 1951-2017 genutzt. Zur Schätzung der zukünftigen Verhältnisse wurden die in Kapitel 5 beschriebenen Klimamodellensembles herangezogen. Aus den Zeitreihen des täglichen mittleren Abflusses wurden die unterschiedlichen Niedrigwasserindizes (s. Kapitel 2.4) extrahiert. Dabei wurde pro Jahr ein Wert berechnet. Aus den Tageszeitreihen des Niederschlags, der mittleren, minimalen und maximalen Lufttemperatur, sowie der Globalstrahlung (Beobachtungs- und Klimamodelldaten) wurde eine Vielzahl an meteorologischen Indizes berechnet, die sowohl trockene, als auch nasse Verhältnisse charakterisieren. Eine Übersicht findet sich

in Tabelle 7-1. Vor Extraktion der Indizes wurden die Klimagrößen über das gesamte, dem jeweiligen Abflusspegel zugehörige Einzugsgebiet gemittelt. Die Berechnung der meteorologischen Indizes erfolgte dann, im Gegensatz zu den Niedrigwasserindizes, für unterschiedliche Zeiträume, d.h. jeder Index wurde für 1 bis 12 Monate berechnet. Diese Vorgehensweise beruht auf der Annahme, dass aufgrund der großen Bandbreite von Einzugsgebietsgrößen im Untersuchungsgebiet unterschiedliche Reaktionszeiten zwischen Niedrigwasserperioden und meteorologischen Auslösern zu erwarten sind. Da das zeitliche Auftreten der Niedrigwasserindizes im Jahr nicht bekannt ist bzw. variiert, wurden die Zeiträume, für die die klimatischen Größen berechnet wurden, monatsweise verschoben. Eine Übersicht zur Berechnung der meteorologischen Indizes ist in Abbildung 7-2 dargestellt.

**Tabelle 7-1: Liste der verwendeten meteorologischen Indizes**

| Index   | Einheit | Beschreibung  |
|---|---------|---|
| $P_{\text{mean}}$   | mm/d    | Mittlerer Tagesniederschlag   |
| $P_x$   | mm/d    | Quantile der täglichen Niederschlagssummen  |
| SPI   | -       | Standardized Precipitation Index: standardisierte Abweichung akkumulierter monatlicher Niederschlagssummen vom Normalwert (Mckee et al., 1993)                                  |
| $DSD_{\text{mean}}$<br>$DSD_{\text{max}}$                 | d       | Mittlere und maximale Trockendauer:<br>Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Niederschlagssummen <1mm/d  |
| $WSD_{\text{mean}}$<br>$WSD_{\text{max}}$                 | d       | Mittlere und maximale Regendauer:<br>Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Niederschlagssummen >1mm/d  |
| $T_{\text{min}}$<br>$T_{\text{mean}}$<br>$T_{\text{max}}$ | °C      | Minimale, mittlere und maximale Tagesmitteltemperatur   |
| $HWD_{\text{mean}}$<br>$HWD_{\text{max}}$                 | d       | Mittlere und maximale Hitzewellendauer:<br>Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Maximaltemperaturen größer als das tagesspezifische 90%-Quantil der Maximumtemperaturen         |
| $ETP_{\text{mean}}$                                       | mm/d    | Mittlere tägliche potenzielle Evapotranspiration berechnet nach Turc-Wendling   |
| $P-ETP_{\text{mean}}$                                     | mm/d    | Mittlere klimatische Wasserbilanz   |
| SPEI  | -       | Standardized Precipitation Evaporation Index: standardisierte Abweichung akkumulierter monatlicher klimatischer Wasserbilanzwerte vom Normalwert (Vicente-Serrano et al., 2010) |



**Abbildung 7-2: Schema zur Berechnung der jährlichen Indexzeitreihen und zur Länge und zeitlichen Verschiebung bei der Berechnung der meteorologischen Indizes.**



Für die regionalen Modelle werden zusätzlich für jedes Einzugsgebiet physiografische Gebietseigenschaften berechnet. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 7-2.

Für die stationsweise Modellanpassung wird der Beobachtungszeitraum des jeweiligen Pegels in Kalibrierungs- und Validierungszeitraum unterteilt. Das Aufstellen der multiplen linearen Regressionsmodelle erfolgt anhand des Kalibrierungszeitraumes nach dem Einschussverfahren. Dementsprechend werden Regressoren in das Modell aufgenommen, wenn sie zu einem Gewinn an Information beitragen. Der Informationsgewinn wird mithilfe des Bayesschen Informationskriterium (BIC) überprüft, welches für das optimale Modell minimiert wird. In jeder Iteration wird zusätzlich überprüft, ob das Entfernen bereits vorhandener Regressoren aus dem Modell das BIC weiter verringert. Ist dies der Fall, wird das Modell reduziert. Die Modellgüte wird anhand des Bestimmtheitsmaßes und des mittleren Fehlers im Validierungszeitraum evaluiert. Die Erfüllung der Modellprämissen (z.B. Homoskedastizität, Normalverteilung) wird im Nachhinein mithilfe der Residuen getestet und konnte für den Großteil der aufgestellten Modelle akzeptiert werden.

Für die Aufstellung der regionalen Modelle wurden zunächst für jeden Index homogene Regionen identifiziert. Innerhalb solcher Regionen sind hydrologische Prozesse ähnlich, was die Modellanpassung erleichtert. Im Falle der regionalen Regressionsmodelle müssen so weniger Regressoren verwendet werden, um physiographische Unterschiede zwischen den Flussabschnitten zu modellieren. Die Regionen wurden mithilfe eines gewichteten k-means-Verfahrens bestimmt, bei dem die Einzugsge-

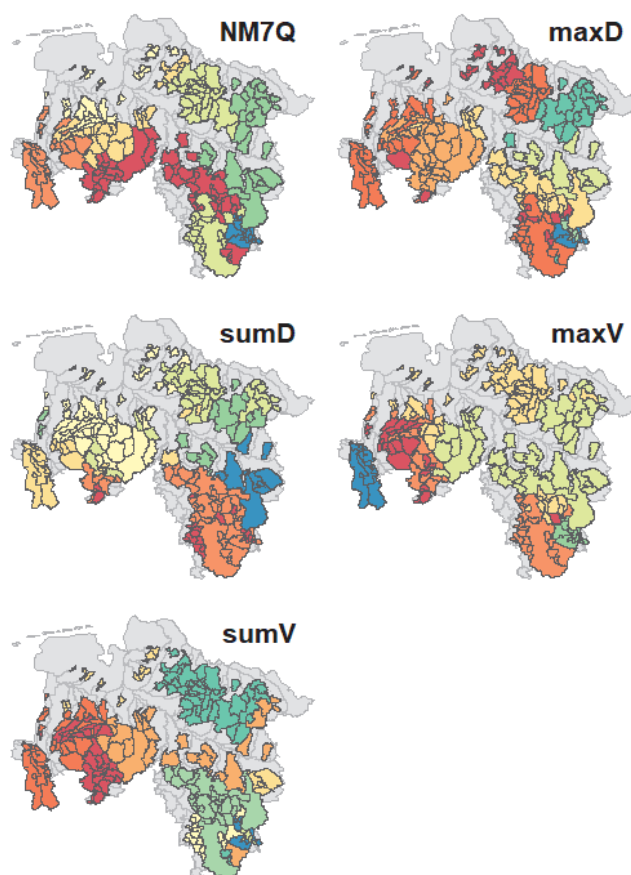
bietseigenschaften zunächst anhand ihres Zusammenhangs mit dem jeweiligen Niedrigwasserindex gewichtet werden. Im nächsten Schritt werden dann anhand dieser Eigenschaften Gruppen mit ähnlichem Verhalten identifiziert. Abbildung 7-3 zeigt die homogenen Regionen für die einzelnen Indizes.

Zur Einschätzung der Modellgüte der regionalen Modelle wird eine kombinierte Split- und Kreuzvalidierung durchgeführt. Ziel dabei ist, sowohl die zeitliche, als auch die räumliche Prognosefähigkeit der Modelle evaluieren zu können. Die Validierung wird folgendermaßen durchgeführt: Es wird schrittweise ein beobachteter Pegel aus dem Datensatz entfernt. Die beobachtete Zeitreihe wird in einen Kalibrierungs- und einen Validierungszeitraum geteilt. Anhand der restlichen, im Datensatz verbleibenden Stationen wird nun im Kalibrierungszeitraum ein regionales Modell angepasst, mit dessen Hilfe die Zielgröße im Validierungszeitraum der ausgelassenen Station geschätzt wird. Es wird also eine Schätzung an unbeobachteten Orten und unbeobachteten Zeitschritten simuliert. Wieder werden der mittlere Fehler und das Bestimmtheitsmaß zur Beurteilung der Modellgüte herangezogen.

Die Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse für den NM7Q sind vergleichsweise für die Stations- und regionalen Modelle in Abbildung 7-4 dargestellt. Es ist eindeutig erkennbar, dass die Gütekriterien der Stationsmodelle im Kalibrierungszeitraum wesentlich besser ausfallen als im Validierungszeitraum. In der Kalibrierung werden für das Bestimmtheitsmaß und den absoluten Fehler im Mittel über alle Stationen Werte von 0,69 und 1,96 % erzielt, in der Validierung Werte von 0,42 und 19,18 %. Trotz der

**Tabelle 7-2: Liste der verwendeten physiographischen Einzugsgebietseigenschaften**

| Einzugsgebietseigenschaft             | Einheit           |
|---------------------------------------|-------------------|
| Einzugsgebietsfläche                  | km <sup>2</sup>   |
| Minimale, mittlere, maximale Höhe     | m                 |
| Minimale, mittlere, maximale Steigung | %                 |
| Effektive Steigung                    | m/km <sup>2</sup> |
| Nutzbare Feldkapazität                | mm                |
| Feldkapazität                         | mm                |
| Luftkapazität                         | mm                |
| Gesamtporenvolumen                    | mm                |
| Tongehalt                             | %                 |
| Schluffgehalt                         | %                 |
| Sandgehalt                            | %                 |
| Anteil urbaner Fläche                 | %                 |
| Anteil landwirtschaftlicher Fläche    | %                 |
| Anteil Wald                           | %                 |
| Anteil poröser Grundwasserleiter      | %                 |
| Anteil Kluftgrundwasserleiter         | %                 |
| Anteil Geringleiter                   | %                 |
| Hydraulische Leitfähigkeit            | m/s               |
| Flussnetzdicke                        | -                 |
| Umfang/Fläche                         | -                 |
| Position im Hauptfluss                | km                |



**Abbildung 7-3: Homogene Regionen für die Anpassung regionaler Modelle für verschiedene Indizes**



Verwendung von Hauptkomponenten kommt es scheinbar zur Überanpassung der Modelle in der Kalibrierung. Beim regionalen Modell sind die Unterschiede zwischen Kalibrierung und Validierung gering, d.h. 0,48 gegenüber 0,48 im Bestimmtheitsmaß und 26,18 % gegenüber 25,41 % im mittleren absoluten Fehler. Die Modellanpassung im Kalibrierungszeitraum ist folglich geringer als bei den Stationsmodellen, die Ähnlichkeit der Gütekriterien zwischen den Perioden zeigt aber, dass eine Überanpassung vermieden wird. Auch wenn die mittleren Abweichungen zur Beobachtung im regionalen Modell generell größer sind, weist das Bestimmtheitsmaß, das in der Validierung bessere Ergebnisse erzielt als bei den Stationsmodellen, darauf hin, dass der generelle Verlauf des NM7Qs gut wiedergegeben wird und somit Änderungssignale in der Zukunft mithilfe des regionalen Modells sicher ableitbar sind. Auch für die Simulation der anderen Niedrigwasserindizes zeigen die regionalen Modelle die gleichen Vorteile. Somit werden lediglich die regionalen Modelle für die Prognose verwendet und weiter betrachtet. Um möglichst verlässliche Prognosen zu erzielen, werden die zukünftigen Niedrigwasserindizes nur in Gebieten geschätzt, wo in der Validierung Werte im Bestimmtheitsmaß über 0,5 erzielt werden.

### 7.1.3 Simulation ausgewählter Niedrigwasserkenngrößen

Mithilfe der regionalen Modelle werden unter Eingang meteorologischer Indizes, abgeleitet aus Klimamodell-daten, Niedrigwasserindizes für drei Zeiträume simuliert: den Referenzzeitraum von 1971-2000 (Z1), die nahe Zukunft von 2021-2050 (Z2) und die ferne Zukunft von 2071-2100 (Z3). Die 14 Läufe des RCP8.5 und die 6 Läufe des A1B-Szenarios werden dabei separat betrachtet.

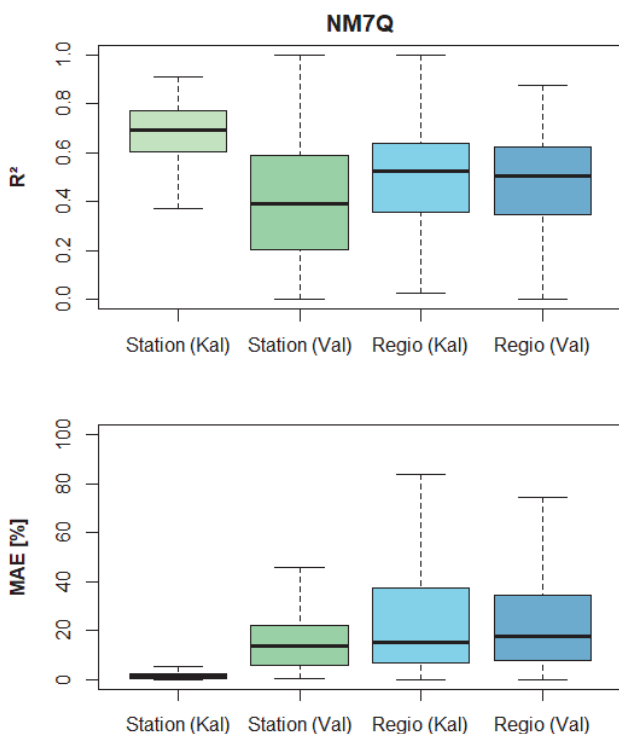


Abbildung 7-4: Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse in Form des Bestimmtheitsmaßes (oben) und des mittleren absoluten Fehlers (unten) für Stations- (grün) und regionale Modelle (blau) des NM7Q.

Die Schätzung der Indizes im Referenzzeitraum (Z1) mithilfe der Klima- und Wirkmodelle ermöglicht zunächst den Vergleich mit der Beobachtung und lässt mögliche systematische Fehler erkennen. Der Vergleich mit simulierten Indexwerten aus dem regionalen Wirkmodell, die unter Eingang von beobachteten meteorologischen Indizes erstellt wurden, lässt gesondert auf Abweichungen schließen, die durch die Verwendung der Klimamodell-daten entstehen. Abbildung 7-5 zeigt diese Abweichungen der geschätzten Werte zur Beobachtung (Z1-obs) und Simulation (Z1-sim) für alle Indizes und beide Klimaszenarien. Es ist zu erkennen, dass es durch Anwendung des regionalen Wirkmodells und der Klimamodell-daten zu einer leichten Unterschätzung der Beobachtungsdaten kommt. Demnach wird der NM7Q als zu trocken, die restlichen Indizes als zu nass simuliert. Die Abweichungen im RCP8.5-Szenario fallen dabei etwas höher aus als im A1B-Szenario. Der größte Fehler ist dabei beim sumV zu sehen mit -24,7 % im Mittel. Der Anteil des Fehlers, der sich auf die Klimamodell-daten zurückführen lässt, variiert dabei von Index zu Index und ist beim NM7Q, maxV und sumV vergleichsweise gering. Die meteorologischen Indizes, die zur Schätzung dieser Indizes verwendet werden, können also präzise durch die Klimamodell-daten nachgebildet werden. Die Spannweite dieser Fehler ist bei den Indizes maxD und sumD wesentlich größer, was darauf hindeutet, dass die benötigten meteorologischen Indizes weniger genau von den Klimamodell-daten reproduziert werden. Eine Prognose für die Zukunft könnte für diese Indizes ungenauer sein.

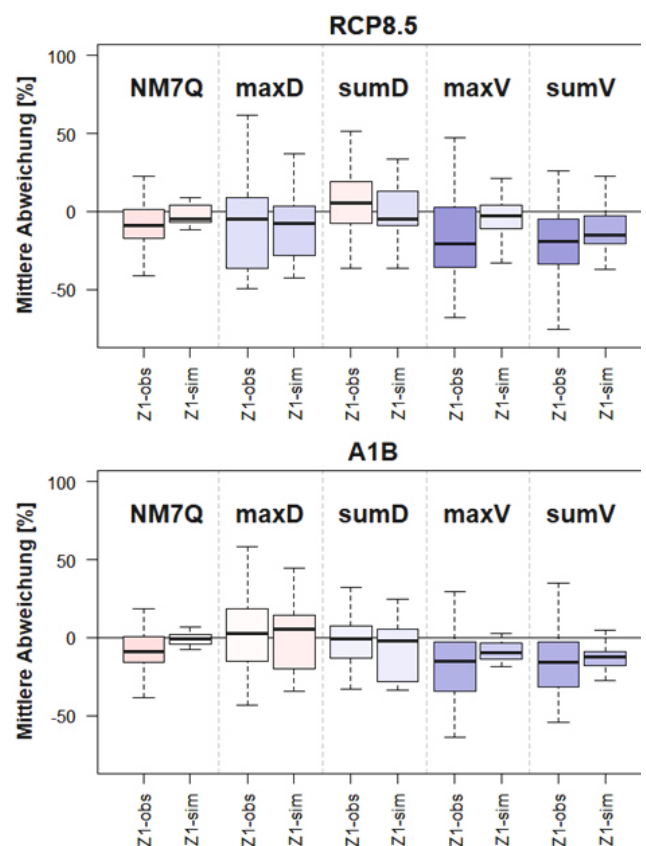
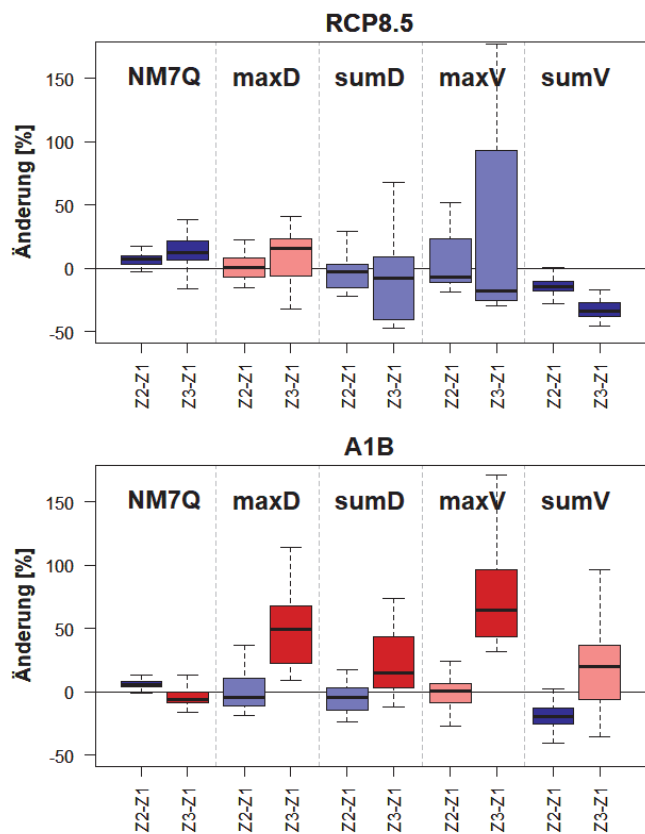


Abbildung 7-5: Mittlere Abweichung der mithilfe der Klimamodellensembles geschätzten Niedrigwasserindizes von der Beobachtung (Z1-obs) und von der mit beobachteten Klimadaten geschätzten Indizes (Z1-sim) im Referenzzeitraum; dargestellt sind die Ensemblemediane für alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (oben) und das A1B-Szenario (unten)

Die Änderungssignale für die beiden Zukunftszeiträume sind für die Niedrigwasserindizes in Abbildung 7-6 als Bandbreite der Mediane der Klimamodellensembles über alle Stationen in Niedersachsen dargestellt. Für das RCP8.5-Szenario ist erkennbar, dass sich die Niedrigwassersituation in der nahen und besonders in der fernen Zukunft im Median entschärft. Der einzige Index, bei dem Zunahmen in der Trockenheit prognostiziert werden, ist das maxD. Eindeutig sind die Änderungen jedoch nur beim NM7Q (+12.88 % in Z3) und beim sumV (-33.15 % in Z3), alle anderen Indizes zeigen große Bandbreiten von positiven und negativen Änderungen.



**Abbildung 7-6:** Änderungssignale der mittleren Niedrigwasserindizes für die nahe (Z2-Z1) und die ferne Zukunft (Z3-Z1); dargestellt sind die Ensemblemediane für alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (oben) und das A1B-Szenario (unten)

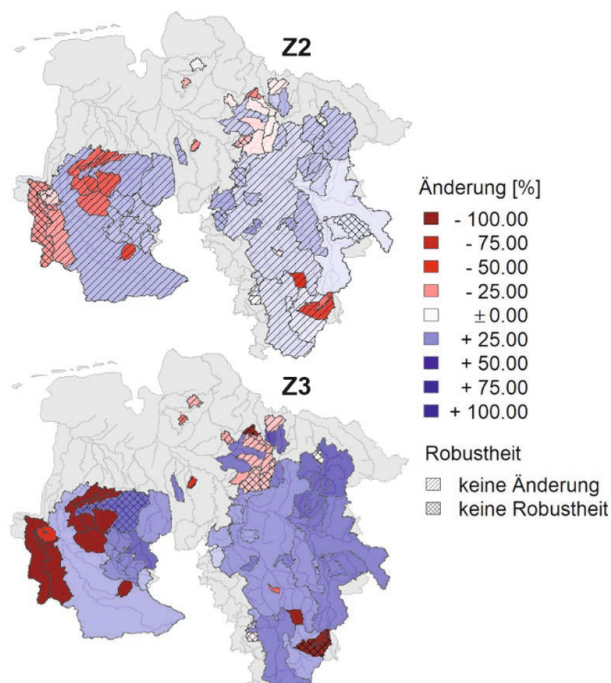
Zudem sind die Änderungssignale teilweise schwächer als die Fehler im Referenzzeitraum. Beim maxV variieren die Änderungen insgesamt zwischen 36.0 % bis +177.3 %. Die großen Bandbreiten weisen auf räumliche Unterschiede, aber auch auf mögliche Unsicherheiten bei den zukünftigen Aussagen hin.

In Abbildung 7-7 ist in der räumlichen Darstellung der Klimaprojektionen zu sehen, dass es beim maxV vereinzelte Gebiete mit sehr starken Zunahmen gibt. Diese Gebiete zeigen keinerlei räumlichen Zusammenhang. Abbildung 7-3 zeigt, dass diese Gebiete Teil einer nicht-zusammenhängenden homogenen Region sind (dargestellt in rot). Die Gruppierung dieser Pegel zu einer homogenen Region erfolgt möglicherweise auf Basis außergewöhnlichen Verhaltens des Vmax, das schwer durch die Einzugsgebietseigenschaften erklärt wird, etwa durch anthropogene Eingriffe in das Abflussgeschehen. Das Ausmaß der

Veränderungen in diesen Gebieten lässt darauf schließen, dass es hier zu starken Überschätzungen kommt, die durch fehlerhafte Anpassung des statistischen Wirkmodells verursacht werden. Die Zunahmen im Harz und im Vechte-Gebiet stimmen jedoch mit den Projektionen der anderen Indizes überein und werden als plausibel betrachtet.

Beim A1B-Szenario sind vor allem die eindeutigen Zunahmen der Trockenheiten in der fernen Zukunft auffällig, die für alle Indizes beobachtet werden. Diese belaufen sich im Median auf 5,6 % beim NM7Q und bis zu +64,4 % beim maxV. Für die nahe Zukunft sind die Änderungen uneindeutig und wesentlich geringer. Nur beim NM7Q und sumV gibt es eindeutige Abnahmen der Trockenheit.

Um die Bandbreiten der Modellensembles der zwei Klimaszenarien einschätzen zu können, sind in Abbildung 7-8 beispielhaft für den NM7Q, die Projektionen der einzelnen Modellketten dargestellt. Besonders für die ferne Zukunft wird der Unterschied zwischen den Modellensembles ersichtlich. Während im RCP8.5-Szenario der Großteil der Modelle eine Zunahme im NM7Q projiziert, deuten alle Modellketten im A1B-Szenario auf eine Abnahme hin. Besonders groß sind die Änderungen in den statistischen regionalen Klimamodellen WETTREG2010 und WETTREG2006. Das RCP8.5-Szenario liefert alleine auf Basis der größeren Anzahl an verschiedenen globalen und regionalen Klimamodellen eine größere Bandbreite. Im A1B-Szenario wird lediglich ein Globalmodell betrachtet, weshalb es weniger repräsentativ für mögliche Unsicherheiten ist. Die Tatsache, dass das gemäßigte A1B-Szenario Verschärfungen der zukünftigen Niedrigwassersituation aufzeigt, während das RCP8.5 mit stärkeren Zunahmen in der Temperatur Abnahmen der Trockenheiten schätzt, lässt sich im Rahmen der verfügbaren Modellensembles auf die starke Zunahme der Niederschläge in letzterem Ensemble zurückführen, besonders im Winter.



**Abbildung 7-7:** Räumliche Verteilung der Änderungssignale im mittleren maxV als Ensemblemediane des RCP8.5-Szenarios in der nahen (oben) und fernen Zukunft (unten)

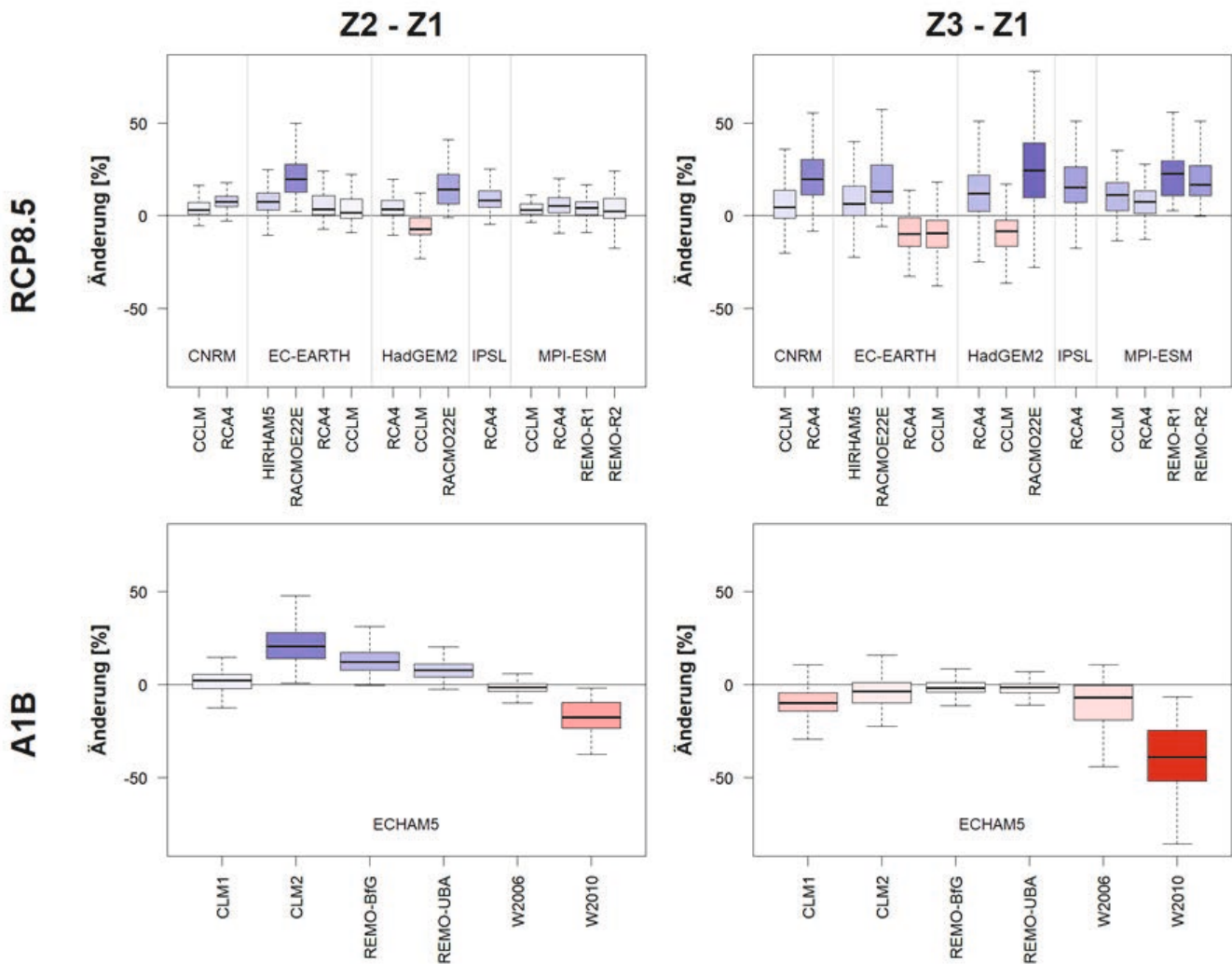


Abbildung 7-8: Änderungssignale im mittleren NM7Q für die nahe (links) und die ferne Zukunft (rechts) über alle verfügbaren Stationen und die einzelnen Modellketten im RCP8.5- (oben) und A1B-Szenario (unten).

#### 7.1.4 Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse der statistischen Niedrigwasserprognose lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die betrachteten Niedrigwasserindizes lassen sich mit akzeptabler Präzision als lineare Funktion beobachteter meteorologischer Indizes abbilden.
- Regional angepasste Modelle, die eine gleichzeitige zeitliche und räumliche Schätzung der Niedrigwasserindizes ermöglichen, stellen sich als vorteilhaft gegenüber individuell angepassten Stationsmodellen heraus.
- Die Verwendung der statistischen Wirkmodelle in Kombination mit meteorologischen Indizes aus Klimamodelldaten führt im Referenzzeitraum zu Unterschätzungen der Niedrigwasserindizes.
- Das Modellensemble des RCP8.5-Szenarios zeigt für den Großteil Niedersachsens eine Abnahme der Trockenheit in beiden Zukunftszeiträumen. Die Änderungssignale zeigen jedoch große Bandbreiten in Richtung und Stärke, was u.a. auf die Vielzahl von verwendeten Global- und Regionalmodellen zurückzuführen ist.
- Im A1B-Szenario werden eindeutig trockenere Bedingungen für die ferne Zukunft prognostiziert, während die Änderungen für die nahe Zukunft weniger eindeutig sind. Die klare Richtung der Änderungen ist u.U. bedingt durch die Verwendung eines limitierten Modellensembles mit nur einem Globalmodell als Antrieb.



## 7.2 Modellierung zukünftiger Niedrigwasserverhältnisse mit dem hydrologischen Modellsystem PANTA RHEI

Für die Analyse möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserkenngrößen wurden in KliBiW Phase 5 kontinuierliche Wasserhaushaltssimulationen für sieben Einzugsgebiete in Niedersachsen mit dem hydrologischen Modellsystem PANTA RHEI durchgeführt. Dieses Modellsystem wurde von der Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau an der TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wassermanagement IfW GmbH entwickelt (LWI-HYWAG und IFW, 2017). Es bietet eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten und wird beispielsweise in der operationellen Hochwasservorhersage, bei der Berechnung von Bemessungsabflüssen sowie in der Klimafolgenforschung eingesetzt (z.B. NLWKN, 2015; Kreye et al., 2017).

### 7.2.1 Modellbeschreibung

PANTA RHEI ist ein deterministisches, semidistributives Modell mit einer räumlichen Disaggregation in 3 Ebenen: Gesamteinzugsgebiet, Teileinzugsgebiete und Hydrotope. Hydrotope stellen die kleinsten Recheneinheiten dar. Innerhalb eines Teileinzugsgebiets weisen sie gleichartige hydrologische Eigenschaften auf und werden aus der Verschneidung von Teileinzugsgebiets-, Boden- und Landnutzungsdaten erstellt (vgl. schematische Darstellung in Abbildung 7-9). Für die Ableitung von Höhe und Gefälle eines Teileinzugsgebiets wird ein digitales Geländemodell benötigt. Der interne Rechenzeitschritt bei der Abflusssimulation beträgt eine Stunde.

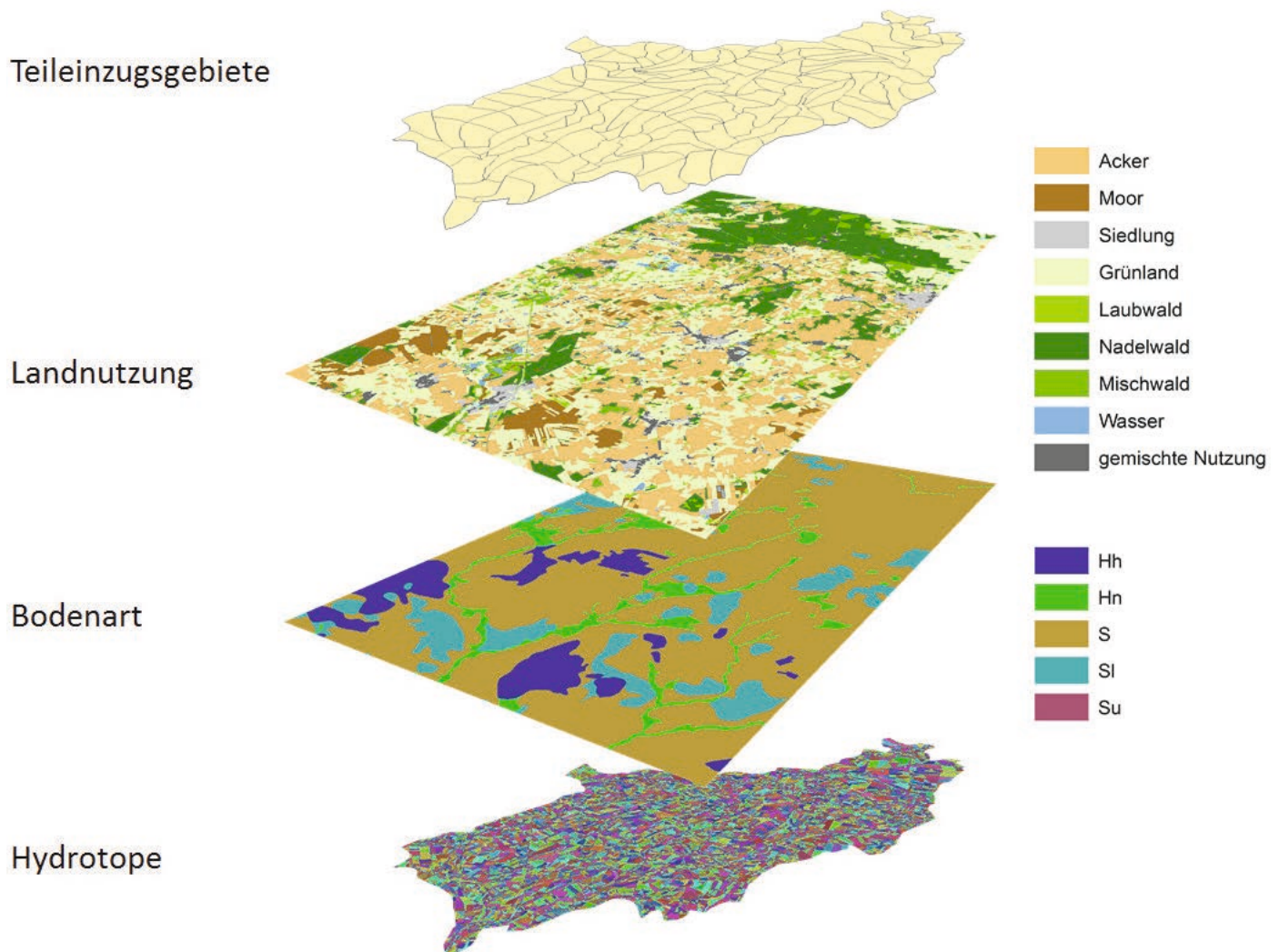


Abbildung 7-9: Schematische Darstellung der Überlagerung von Teileinzugsgebiets-, Landnutzungs- und Bodenkarte zur Erstellung einer Hydrotopkarte am Beispiel des Pegelinzugsgebiets Lauenbrück B75.



Im Rahmen des Projektes KliBiW wurden Tagesmittelwerte der klimatischen Variablen als Eingangsdaten verwendet. Auch die Auswertung geschah auf Basis von Tagesmittelwerten.

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.

### 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 5 die Simulation des Wasserhaushaltes mit Fokus auf Niedrigwasserereignissen. Im Folgenden werden diejenigen Modellansätze beschrieben, welche im Rahmen dieser Projektphase verwendet wurden.

Auf der Ebene der Hydrotöpfe werden die Prozesse der Abflussbildung berechnet. Hierzu zählen Schneeakkumulation und -schmelze, Evapotranspiration, Interzeption, Infiltration, sowie Perkolation und Grundwasserneubildung.

Die Abflusskonzentration und das Abflussrouting werden auf der Ebene der Teileinzugsgebiete berechnet.

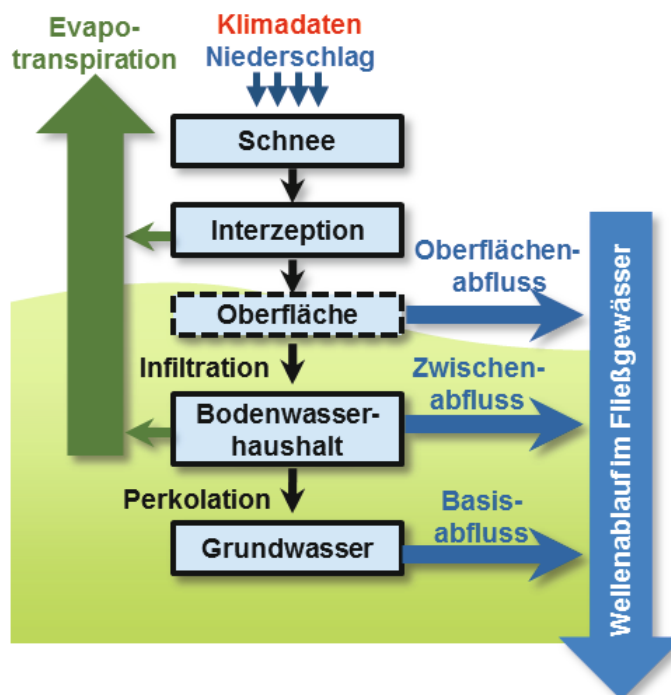


Abbildung 7-10: Schematische Darstellung der hydrologischen Prozesse in PANTA RHEI. Es wird zwischen vertikalen Teilprozessen (Abflussbildung) und lateralen Abflussprozessen (Abflusskonzentration und Wellenablauf) unterschieden.

Eine Skizze der von PANTA RHEI simulierten hydrologischen Prozesse zeigt Abbildung 7-10.

Für die Berechnung von **Schneeakkumulation und -schmelze** wurde das erweiterte Grad-Tag-Verfahren verwendet (LWI-HYWAG und IFW, 2017). 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.

Die **potenzielle Evapotranspiration** wird nach dem Ansatz von Penman-Monteith (Penman, 1948, Monteith, 1965) berechnet. Die für diesen Ansatz benötigten Pflanzenparameter werden durch ein neu entwickeltes Vegetationsmodul dynamisch berechnet. Für die Berechnung der **aktuellen Evapotranspiration** wird der ermittelte Wert der potenziellen Verdunstung in Abhängigkeit des Matrixpotentials des Bodens reduziert.

Der **Bodenwasserhaushalt** wird mit dem Modul DYVESOM (Dynamic Vegetation Soil Model) (Kreye, 2015) simuliert. Der vertikale Wasseraustausch in der ungesättigten Zone mit den Prozessen Infiltration, Perkolation, kapillarem Aufstieg und Grundwasserneubildung wird u.a. durch die Verwendung der matrixpotentialabhängigen Darcy-Buckingham Beziehung realisiert (vgl. z.B. Jury und Horton, 2004). Es werden drei horizontale Bodenspeicher unterschieden, wobei der Zustand der obersten Bodenschicht ausschlaggebend für die Infiltrationsrate ist. Die Parametrisierung des Bodenmodells erfolgt nicht durch einen „effektiven“ Parametersatz, sondern berücksichtigt die natürliche räumliche Subgrid-Variabilität durch mehrere parallel rechnende Bodenmodelle mit unterschiedlichen Parametersets (siehe Kreye und Meon, 2016). Der Aufbau des Bodenmoduls ist in Abbildung 7-11 dargestellt. In Abhängigkeit der Matrixpotenzialgehalte der einzelnen Bodenschichten wird der abflusswirksame Teil des Niederschlags berechnet.

Die **Abflusskonzentration** beschreibt durch Retention des abflusswirksamen Niederschlags die Bildung der vier Teilströme Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss (Interflow), Grundwasserabfluss und Basisabfluss. Diese werden in PANTA RHEI 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.

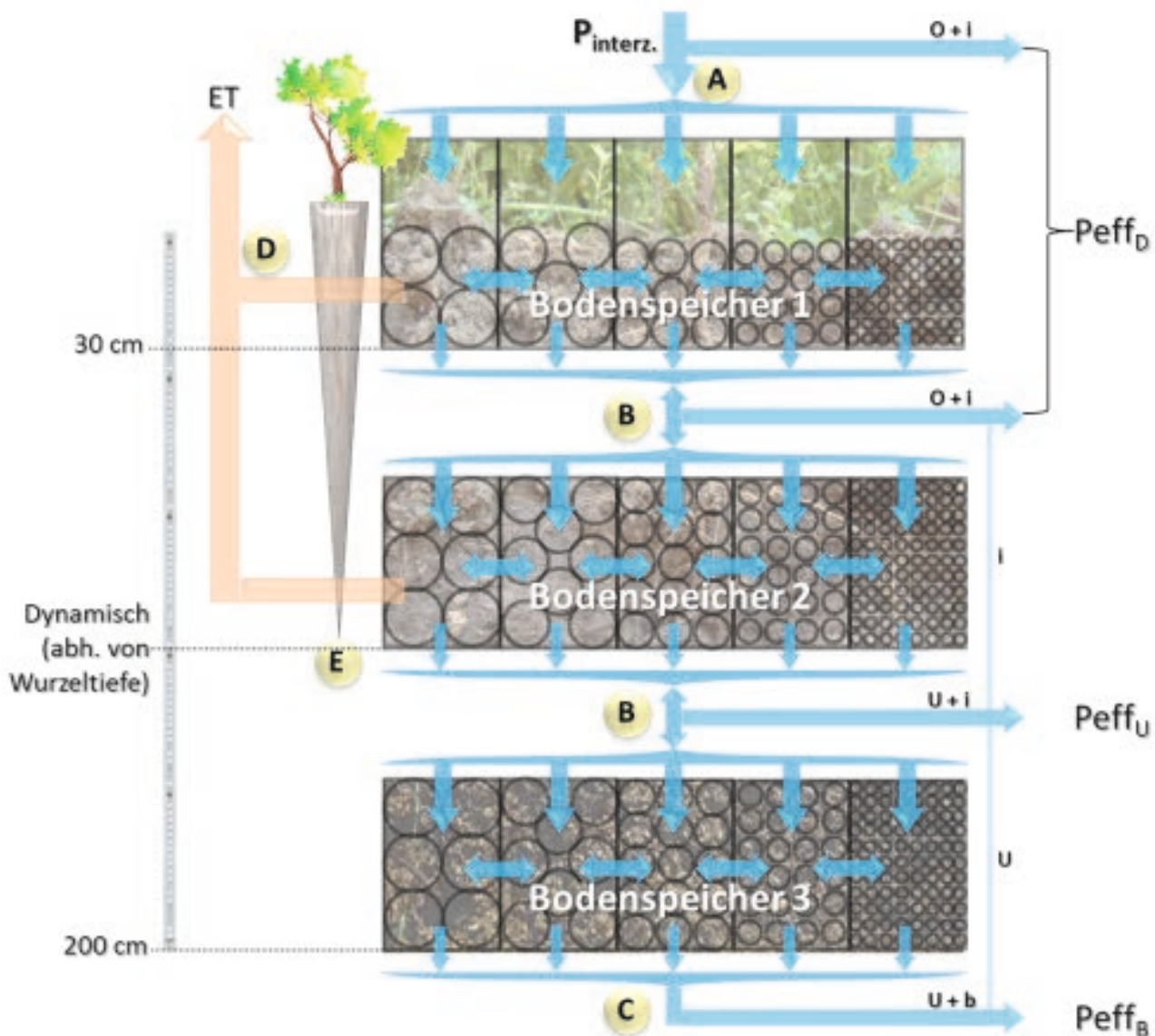


Abbildung 7-11: Bodenmodell DYVESOM. A = Aufteilung Direktabfluss/Infiltration. B = Perkolation/kapillarer Aufstieg sowie laterale Abflusskomponente. C = Ausfluss aus unterstem Speicher, Grundwasserneubildung. D = Evapotranspiration mit dynamischen Anteil aus Speicher 1 und 2, abhängig vom GSI (Growing Season Index). E = mittlere Durchwurzelungstiefe, abhängig von der Landnutzung.

## 7.2.2 Modellerweiterungen

### Vegetationsmodul

Die vorhandene Berechnungsprozedur des Pflanzenwachstums, welche landnutzungsabhängige Pflanzenparameter in Abhängigkeit des Growing Season Index GSI (Jolly et al., 2005) bestimmt (Förster et al., 2012), wurde erweitert, um das Pflanzenwachstum auf landwirtschaftlichen Flächen detaillierter abbilden zu können. 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. In der erweiterten Prozedur wird der Beginn des Pflanzenwachstums auf Ackerflächen gesteuert durch kulturspezifische Minimumwerte des GSI und der Lufttemperatur. Nach Wachstumsbeginn wird das Wachstum durch den Wärmesummenansatz bestimmt. Hierzu werden die Tagesmitteltemperaturen oberhalb eines Temperaturschwellwertes aufsummiert. Ist eine bestimmte, kulturspezifische Wärmesumme erreicht, wird die Ernte eingeleitet.

Der Minimalwert des GSI, welcher für den Beginn des Pflanzenwachstums erreicht sein muss, wird für jede Kulturart individuell bestimmt, sodass der mittlere Wachstumsbeginn mit dem Mittel langjähriger Beobachtungen übereinstimmt. Hierzu wurden die berechneten Werte mit der Phänologiestatistik des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für Niedersachsen abgeglichen. Ebenso wird mit der kulturspezifischen Wärmesumme vorgegangen. Das berechnete mittlere Erntedatum wird mit Literaturwerten bzw. der DWD-Phänologiestatistik abgeglichen. Als Vergleichszeitraum wurde aufgrund der Verfügbarkeit der Phänologiedaten der Zeitraum 1984-2015 verwendet.

Die kulturspezifischen Pflanzenparameter wie maximaler Blattflächenindex, maximale Pflanzenhöhe, Stomatawiderstand, Albedo und maximaler Vegetationsbedeckungsgrad sind der Literatur entnommen (z.B. Breuer et al., 2003). Die tagesaktuellen Pflanzenparameter werden berechnet nach dem vereinfachten Ansatz des Feldskala Modellsystems EPIC (Erosion / Productivity Impact Calculator) (Sharpley und Williams, 1990) in Abhängigkeit der aktuellen und der benötigten Wärmesumme.

Alle nicht-landwirtschaftlichen Flächen werden in Abhängigkeit des GSI berechnet. Die Simulation des Pflanzenwachstums in Abhängigkeit des GSI für nicht-Ackerflächen beziehungsweise des GSI und der Wärmesumme für Ackerflächen ermöglicht es, potenziell zukünftige Änderungen der Vegetationsperiode (früherer Vegetationsbeginn, längere Vegetationsperiode, frühere Ernte) in Modellläufen mit Klimamodelldaten zu berücksichtigen. Durch eine detailliertere Simulation von Pflanzenparametern wird eine plausiblere Berechnung der Evapotranspiration ermöglicht. Diese wiederum beeinflusst maßgeblich das Abflussgeschehen vor allem während Niedrigwasserperioden.

### Bewässerungsmodul

In Regionen mit intensiver landwirtschaftlicher Bewässerung ist vor allem während Niedrigwasserphasen in Zukunft möglicherweise mit Veränderungen des Abflussgeschehens zu rechnen, da sich der Bewässerungsbedarf durch den Klimawandel ändern könnte. Dies ist vor allem dann zu erwarten, wenn das Wasser zur Bewässerung aus dem Grundwasser entnommen wird.

Um die Prozesse der Bewässerung in PANTA RHEI abbilden zu können und potenzielle Änderungen der Bewässerungspraxis und deren Wirkung während Niedrigwasserphasen abbilden zu können, wurde in dieser Projektphase ein Bewässerungsmodul entwickelt.

Generell wird Bewässerung nur auf landwirtschaftlichen Flächen simuliert und auch nur in Zeiten des Pflanzenbewuchses. Zwischen Erntedatum und dem Beginn des erneuten Pflanzenwachstums, beides simuliert durch das Vegetationsmodul, findet keine Bewässerung statt. Im Zeitraum potenziell notwendiger Bewässerung geschieht die Steuerung in Abhängigkeit des Matrixpotenzials in der aktuell durchwurzelter Bodentiefe. Entscheidend hierbei sind zwei festzulegende Schwellwerte für das Matrixpotential: Wird der Schwellwert S1 unterschritten, beginnt die Bewässerungsgabe. Diese dauert so lange an bis Schwellwert S2 überschritten ist. Hierbei gilt:  $S1 < S2$ . Durch Anpassung der Schwellwerte ist es möglich, sowohl die Bewässerungsmenge als auch die Dauer und die Häufigkeit der Bewässerungsgaben zu beeinflussen und eine realitätsnahe Anpassung vorzunehmen.

In der ersten Version des Bewässerungsmoduls wird von einer Bewässerung mittels Sprinkleranlagen und einer Entnahme aus dem Grundwasser ausgegangen. Hierzu wird zu Beginn der Simulation ein mittlerer Grundwasserstand angenommen. Bei Grundwasserentnahme wird dieser entsprechend abgesenkt. Nach der Bewässerungsgabe wird aus den Prozessen Abflussbildung und Abflusskonzentration ein Zufluss zum Grundwasser berechnet, bis der ursprüngliche Grundwasserstand wieder erreicht ist.

Durch die zeitliche Limitierung dieser Projektphase war es nicht möglich, die Wirkung des Bewässerungsmoduls hinsichtlich der Grundwasserentnahme vollständig zu validieren. Daher wird die Simulation der Änderungssignale für die Niedrigwasserkennwerte ohne das Bewässerungsmodul durchgeführt. Die Entwicklung des Moduls wird jedoch weiterverfolgt, sodass es in zukünftigen Untersuchungen angewandt werden kann.



### 7.2.3 Modellaufbau der untersuchten Einzugsgebiete

Für die sieben betrachteten Einzugsgebiete wurde jeweils ein eigenes Modell aufgebaut. Der grundlegende Modellaufbau wurde aus den vorherigen Projektphasen übernommen. Die räumlichen Daten für Niedersachsen, welche für den Aufbau der Modelle verwendet wurden, sind in Tabelle 7-3 aufgelistet. Für die Bereiche außerhalb Niedersachsens wurden entsprechende Datensätze aus anderen Bundesländern bzw. den Niederlanden (Einzugsgebiet Vechte) oder bundesweit verfügbare Datensätze verwendet.

**Tabelle 7-3: Für den Modellaufbau verwendete räumliche Eingangsdaten der Gebietsanteile in Niedersachsen**

| Datensatz                               | Beschreibung   |
|---|--|
| ATKIS                                   | Amtliches Topografisch-Kartographisches Informationssystem (Landnutzungsdaten)                       |
| InVeKoS                                 | Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem der Agrarausgaben der EU (Kulturarten auf Ackerflächen) |
| 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  |

In dieser Projektphase wurden einige Anpassungen im Modellaufbau vorgenommen, die aufgrund der verwendeten Ansätze, welche sich teilweise von denen aus Projektphase 4 unterscheiden, notwendig waren. Die Verwendung unterschiedlicher Ansätze liegt in der Fokussierung der Projektphasen (Phase 4: Hochwasser, Phase 5: Niedrigwasser) begründet.

Aus dem digitalen Geländemodell (DGM) wurden die Hangneigung und der Topographische Index auf Ebene der Hydrotope berechnet. Diese Parameter werden für das Bodenmodul DYVESOM benötigt. Die Landnutzung wurde weiter differenziert, indem auf Basis der InVeKoS-Daten eine Unterscheidung von Anbaukulturen auf landwirtschaftlichen Flächen vorgenommen wurde. Dies war notwendig für die Verwendung des erweiterten Vegetationsmoduls.

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)

Die Ackerflächen wurden weiter untergliedert anhand der InVeKoS Daten für das Jahr 2005. Hierbei werden folgende Kulturarten unterschieden:

- Wintergetreide
- Silomais
- Körnermais
- Kartoffeln
- Sommergetreide
- Zuckerrüben
- Hülsenfrüchte
- Raps
- Futtergras

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 km<sup>2</sup> auf 2,9 km<sup>2</sup> reduziert. Die durchschnittliche Größe der Hydrotope beträgt 0,3 km<sup>2</sup>.

Die Steuerung der Harz-Talsperren im Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet ist in Form von Lamellenplänen im Modell implementiert, welche jahreszeitenabhängige Steuerungsregeln beinhalten. Die Abgaberegulungen der Talsperren wurden im Rahmen von KliBiW Phase 2 mit dem damaligen Projektpartner Harzwasserwerke GmbH abgestimmt (NLWKN, 2012). Sechs Talsperren sind im Modell implementiert: Innerste-, Grane-, Oker-, Ecker-, Söse-, und Odertalsperre. Das Hochwasserrückhaltebecken Salzderhelden an der Leine wird über ein Puls-Verfahren im Modell berücksichtigt.

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

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

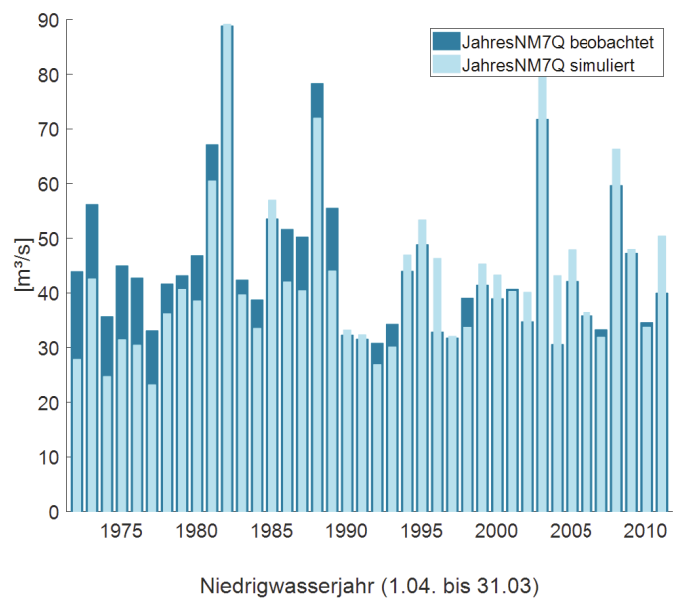


Da der Fokus dieses Teilprojektes auf der Ermittlung von zukünftigen Änderungen von Niedrigwasserkenngrößen lag, wurde auf die Nachbildung von Niedrigwasserphasen bei der Kalibrierung und Validierung besonderen Wert gelegt. Hierfür wurden die simulierten und beobachteten Werte des NM7Q sowie des 5%-Perzentils der Dauerlinie 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. Letztere wurde zum einen aus den Zeitreihen des Abflusses (E) sowie aus den logarithmierten Zeitreihen des Abflusses (Elog) berechnet. Die Modelleffizienz  $E_{log}$  ist hierbei vor allem bei der Evaluierung der Simulationsergebnisse von Mittel- und Niedrigwasserperioden zielführend, da sie nicht so sensitiv gegenüber Hochwasserereignissen ist wie die Modelleffizienz E. Der Wertebereich von E und  $E_{log}$  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., 2017 sowie Kreye, 2015). Die einzelnen Schritte unterscheiden sich hinsichtlich der zu optimierenden Parameter, der Zielfunktionen und der angewandten Algorithmen. Im ersten Schritt wurden das Abflussvolumen (Zielfunktion: Minimierung des Volumenfehlers) und die Ganglinie (Zielfunktion: Maximierung der Modelleffizienz E) angepasst. In Schritt zwei erfolgte die Annäherung der langjährigen Monatsmittelwerte (Zielfunktion: Minimierung der gemittelten Beträge aus den langjährigen monatlichen Abweichungen). Im dritten Schritt wurden die Niedrigwasserkenngrößen optimiert. Als Zielfunktion wurde die Maximierung der Modelleffizienz aus logarithmierten Zeitreihen  $E_{log}$  verwendet. Als weitere Zielfunktion wurde die Minimierung der mittleren Abweichung sowohl des 5%-Perzentils der Dauerlinie als auch der NM7Q-Werte verwendet. Für den ersten Schritt wurde das Brent-Verfahren (Brent, 2002) verwendet. Für die Optimierung wurde der ableitungsfreie Downhill-Simplex-Algorithmus (Nelder und Mead, 1965) verwendet.

Eine Übersicht über die erzielten Modellgüten an den Referenzpegeln für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum gibt Tabelle 7-4. Die Modelleffizienz E liegt für beide Zeiträume für die meisten Referenzpegel im Bereich zwischen 0,7 und 0,9 mit einem Mittelwert von 0,84 für die Kalibrierung und 0,86 für die Validierung, was einer guten bis sehr guten Modellanpassung entspricht.

Für die Modelleffizienz aus logarithmierten Zeitreihen  $E_{log}$  wird im Mittel ein Wert von 0,82 im Kalibrierungszeitraum und 0,86 im Validierungszeitraum erzielt. Auch hier liegen die meisten Pegel im Bereich zwischen 0,7 und 0,9 für beide Zeiträume.



**Abbildung 7-13: Gegenüberstellung von beobachteten und simulierten NM7Q-Werten für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für den Pegel Rethem.**

Eine deutlich geringere Modellgüte in Bezug auf  $E_{log}$  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. Bei der Interpretation der Änderungssignale für das Einzugsgebiet der Ilmenau sollte die vergleichsweise geringe Modellgüte mitberücksichtigt werden.

Eine Gegenüberstellung von NM7Q-Werten aus der Beobachtung und der Simulation für den Pegel Rethem (an der Aller) zeigt Abbildung 7-13. Insgesamt werden die jährlichen NM7Q-Werte durch die Simulation gut wiedergegeben, wobei diese im Kalibrierungszeitraum meist eher unterschätzt und im Validierungszeitraum mehrheitlich leicht überschätzt werden.

Abbildung 7-14 zeigt einen Vergleich der gemittelten NM7Q-Werte im Gesamtzeitraum (Kalibrierungs- und Validierungszeitraum) als Abflussspenden. Die unterschiedliche Höhe der Abflussspenden für die einzelnen Pegel kann durch das Modell gut abgebildet werden.



Tabelle 7-4: Referenzpegel mit den Ergebnissen aus Kalibrierung und Validierung für die Modelleffizienz aus logarithmierten Zeitreihen (Elog), den Volumenfehler (VF) sowie die mittlere monatliche Abweichung (MMA) der langjährigen Monatsmittelwerte. \*Flächengröße nach der Umleitung des Bornbachs.

| Einzugsgebiet    | Pegel           | Fließgewässer       | Fläche [km <sup>2</sup> ] | Kalibrierung |                      |        |         | Validierung |                      |        |         |
|------------------|-----------------|---------------------|---------------------------|--------------|----------------------|--------|---------|-------------|----------------------|--------|---------|
|                  |                 |                     |                           | E [-]        | E <sub>log</sub> [-] | VF [%] | MMA [%] | E [-]       | E <sub>log</sub> [-] | VF [%] | MMA [%] |
| Aller-Leine-Oker | Reckershausen   | Leine               | 321                       | 0,80         | 0,84                 | 6,84   | 5,87    | 0,81        | 0,86                 | 9,18   | 11,05   |
|                  | Göttingen       | Leine               | 633                       | 0,79         | 0,82                 | -8,88  | 7,68    | 0,82        | 0,87                 | 9,34   | 11,70   |
|                  | Northeim        | Rhume               | 1176                      | 0,84         | 0,86                 | -4,84  | 5,04    | 0,85        | 0,88                 | 4,72   | 6,18    |
|                  | Poppenburg      | Leine               | 3463                      | 0,91         | 0,92                 | -3,53  | 3,41    | 0,90        | 0,94                 | 2,78   | 4,42    |
|                  | Derneburg       | Nette               | 309                       | 0,88         | 0,92                 | -4,97  | 5,23    | 0,80        | 0,85                 | 6,11   | 7,11    |
|                  | Heinde          | Innerste            | 897                       | 0,92         | 0,93                 | 0,78   | 2,17    | 0,91        | 0,94                 | 2,27   | 4,11    |
|                  | Herrenhausen    | Leine               | 5304                      | 0,93         | 0,95                 | -2,28  | 2,76    | 0,95        | 0,96                 | 2,71   | 4,78    |
|                  | Wunstorf        | Westaue             | 588                       | 0,86         | 0,83                 | -2,81  | 8,43    | 0,86        | 0,82                 | 3,04   | 9,55    |
|                  | Ohrum           | Oker                | 813                       | 0,89         | 0,84                 | -0,29  | 3,93    | 0,87        | 0,87                 | 2,24   | 3,31    |
|                  | Glentorf        | Schunter            | 296                       | 0,80         | 0,80                 | 1,82   | 5,17    | 0,77        | 0,81                 | 0,65   | 5,94    |
|                  | Groß Schwülper  | Oker                | 1734                      | 0,86         | 0,88                 | -2,34  | 5,74    | 0,88        | 0,91                 | 1,31   | 4,80    |
|                  | Brenneckenbrück | Aller               | 1638                      | 0,78         | 0,74                 | -7,52  | 10,06   | 0,82        | 0,77                 | 9,02   | 13,87   |
|                  | Celle           | Aller               | 4374                      | 0,87         | 0,85                 | -3,25  | 7,50    | 0,91        | 0,88                 | 2,98   | 5,71    |
|                  | Marklendorf     | Aller               | 7209                      | 0,85         | 0,79                 | -7,81  | 9,84    | 0,85        | 0,82                 | 13,21  | 13,24   |
|                  | Brock           | Böhme               | 285                       | 0,82         | 0,83                 | 0,12   | 5,79    | 0,74        | 0,80                 | 2,58   | 6,03    |
| Rethem           | Aller           | 14730               | 0,92                      | 0,89         | -5,40                | 6,58   | 0,94    | 0,94        | 5,09                 | 6,25   |         |
| Wümme            | Lauenbrück B75  | Wümme               | 248                       | 0,83         | 0,82                 | -0,73  | 11,06   | 0,85        | 0,88                 | 7,64   | 8,75    |
|                  | Hellwege        | Wümme               | 908                       | 0,85         | 0,86                 | -2,62  | 7,65    | 0,88        | 0,90                 | 5,90   | 8,23    |
| Ilmenau          | Niendorf II S   | Stederau            | 285                       | 0,62         | 0,48                 | -9,25  | 13,69   | 0,72        | 0,69                 | 11,32  | 12,31   |
|                  | Bienenbüttel    | Ilmenau             | 1434                      | 0,64         | 0,41                 | -10,15 | 10,77   | 0,73        | 0,68                 | 10,85  | 12,23   |
| Gr. Aue          | Heide OP        | Große Aue           | 1016                      | 0,67         | 0,68                 | -2,66  | 12,18   | 0,74        | 0,77                 | 6,43   | 12,62   |
| Hunte            | Bohmte          | Hunte               | 168                       | 0,80         | 0,78                 | 0,79   | 13,17   | 0,89        | 0,88                 | 3,99   | 6,16    |
|                  | Schäferhof      | Hunte               | 388                       | 0,90         | 0,83                 | 1,00   | 4,92    | 0,89        | 0,87                 | 4,47   | 9,72    |
|                  | Düste           | Wagenfelder Aue     | 199                       | 0,72         | 0,80                 | -3,27  | 15,16   | 0,75        | 0,71                 | 2,60   | 11,12   |
|                  | Hoopen          | Hunte               | 756                       | 0,87         | 0,71                 | -3,92  | 9,62    | 0,90        | 0,76                 | 2,35   | 8,21    |
|                  | Colnrade OP     | Hunte               | 1302                      | 0,86         | 0,87                 | -2,14  | 9,81    | 0,92        | 0,91                 | 2,54   | 5,56    |
|                  | Huntlosen II    | Hunte               | 1698                      | 0,86         | 0,85                 | -4,55  | 9,33    | 0,92        | 0,92                 | 5,18   | 6,19    |
| Hase             | Wissingen       | Wierau              | 63                        | 0,85         | 0,86                 | -3,16  | 8,47    | 0,80        | 0,86                 | 4,47   | 9,01    |
|                  | Lüstringen      | Hase                | 209                       | 0,86         | 0,84                 | -0,57  | 8,83    | 0,92        | 0,91                 | 2,14   | 4,77    |
|                  | Wersen          | Düte                | 222                       | 0,86         | 0,89                 | -1,30  | 4,41    | 0,87        | 0,92                 | 1,84   | 3,58    |
|                  | Bramsche        | Hase                | 674                       | 0,89         | 0,88                 | -1,36  | 4,67    | 0,93        | 0,93                 | 1,34   | 2,82    |
|                  | Addrup          | Fladderkanal        | 228                       | 0,84         | 0,80                 | -4,62  | 8,74    | 0,89        | 0,86                 | 7,51   | 6,96    |
|                  | Lodbergen       | Löninger Mühlenbach | 70                        | 0,78         | 0,83                 | 4,30   | 4,99    | 0,79        | 0,74                 | -1,85  | 9,25    |
|                  | Bunnen          | Große Hase          | 1771                      | 0,89         | 0,88                 | -2,96  | 8,27    | 0,92        | 0,93                 | 4,75   | 6,52    |
|                  | Herzlake        | Hase                | 2236                      | 0,89         | 0,89                 | -2,52  | 8,44    | 0,92        | 0,93                 | 2,01   | 5,18    |
|                  | Haselünne       | Hase                | 2542                      | 0,90         | 0,91                 | -4,44  | 7,72    | 0,92        | 0,94                 | 3,28   | 5,72    |
| Vechte           | Ohne            | Vechte              | 393                       | 0,85         | 0,86                 | -2,20  | 10,33   | 0,90        | 0,90                 | 4,05   | 11,35   |
|                  | Wehr Neuhaus    | Vechte              | 702                       | 0,85         | 0,85                 | -3,86  | 8,43    | 0,89        | 0,88                 | -1,48  | 7,72    |
|                  | Lage 1          | Dinkel Umflut       | 484                       | 0,77         | 0,73                 | -5,01  | 11,99   | 0,83        | 0,78                 | 1,71   | 8,13    |
|                  | Lage Gesamt     | Alte Dinkel         | 611                       | 0,79         | 0,75                 | -4,11  | 13,73   | 0,84        | 0,78                 | 1,38   | 15,78   |
|                  | Emlichheim      | Vechte              | 1731                      | 0,90         | 0,90                 | -1,48  | 6,98    | 0,93        | 0,90                 | 1,32   | 6,63    |

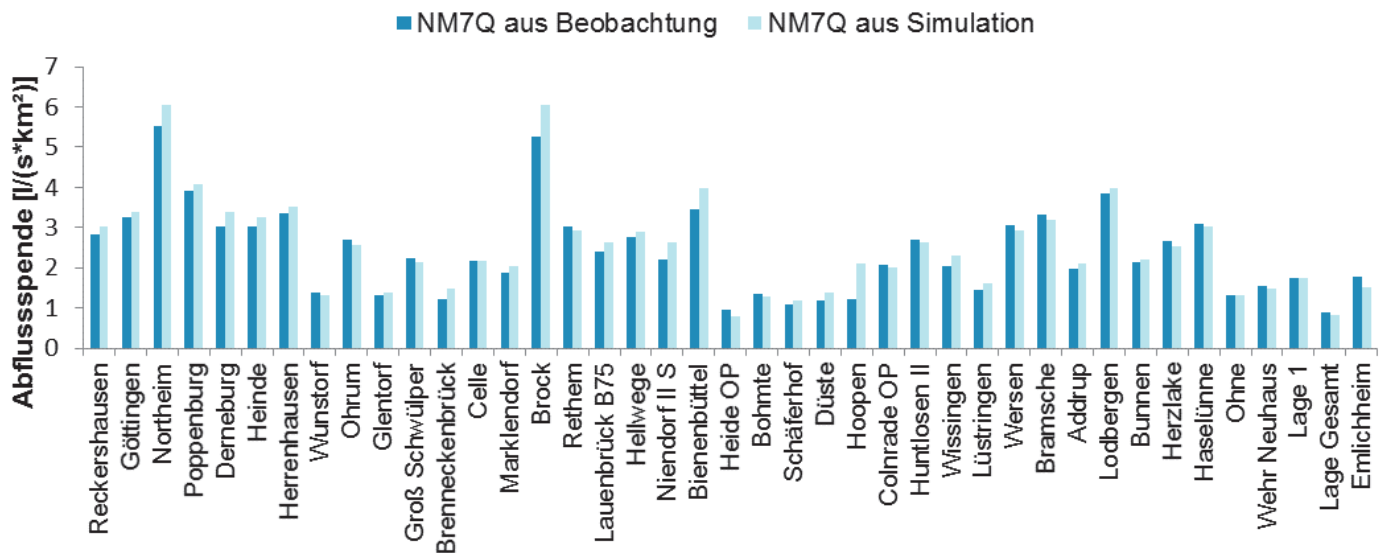


Abbildung 7-14: Gemittelte NM7Q-Werte als Abflusspende für Simulation und Beobachtung für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für die Referenzpegel.

### 7.2.5 Simulationen mit Klimamodelldaten

Für die Ermittlung der möglichen zukünftigen Veränderungen von Niedrigwasserkenngrößen wurden Langzeitsimulationen für den Zeitraum 1970-2100 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 Biasadjustierten und interpolierten Klimamodelldaten (s. Kapitel 5) 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 24 Klimamodellläufen durchgeführt, wobei die jeweils drei Realisationen von WETTREG2006 bzw. WETTREG2010 für die Auswertungen durch Bildung des Mittelwertes aggregiert wurden (vgl. Kapitel 5.2). Somit wurden auf diese Weise 20 Klimamodellketten unterschieden. Hiervon sind 6 Läufe dem SRES A1B-Ensemble und 14 Läufe dem RCP8.5-Ensemble zuzuordnen (vgl. Kapitel 5.1). 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 1970-2100 die Modellversion verwendet, welche nach der Bornbachumleitung gültig ist (siehe Kapitel 7.2.3). Somit basieren die berechneten Änderungssignale lediglich auf sich ändernden klimatischen Randbedingungen. Wasserwirtschaftliche Eingriffe, die in der Vergangenheit stattfanden, haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

### Auswertung der Modellläufe für die Referenzperiode

Die aus den Simulationsläufen mit den Klimamodelldaten für die Referenzperiode 01.04.1970 - 31.03.2000 ermittelten Abflusskenngrößen wurden mit denjenigen der Referenzläufe verglichen. Als Referenzlauf wird die Simulation des Modells PANTA RHEI mit beobachteten Klimadaten bezeichnet. Der Vergleich des Referenzlaufes mit den Klimamodellläufen ermöglicht die Analyse von Abweichungen der Abflusskenngrößen, welche lediglich auf Abweichungen der Klimamodelldaten gegenüber beobachteten Klimadaten zurückzuführen sind. Die Abweichungen, die aus dem hydrologischen Modell resultieren, werden hingegen nicht berücksichtigt. Die Auswertungen werden exemplarisch für den Referenzpegel Rethem (Aller) gezeigt, da dieser der Pegel mit dem größten Einzugsgebiet ist.

In Abbildung 7-15 ist die Abweichung der NM7Q-Werte aus den Klimamodellläufen zu den NM7Q-Werten aus dem Referenzlauf dargestellt.

Mit den Klimamodelldaten werden teils höhere, teils niedrigere NM7Q-Werte simuliert. Die höchste Abweichung gegenüber dem Referenzlauf weisen die beiden Läufe mit dem Regionalmodell CLM des SRES A1B-Ensembles auf.

In Abbildung 7-16 sind die langjährigen Monatsmittelwerte des Abflusses für die Referenzperiode aus den Referenzläufen und den Klimamodellläufen 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 dem Referenzlauf für beide Ensembles.

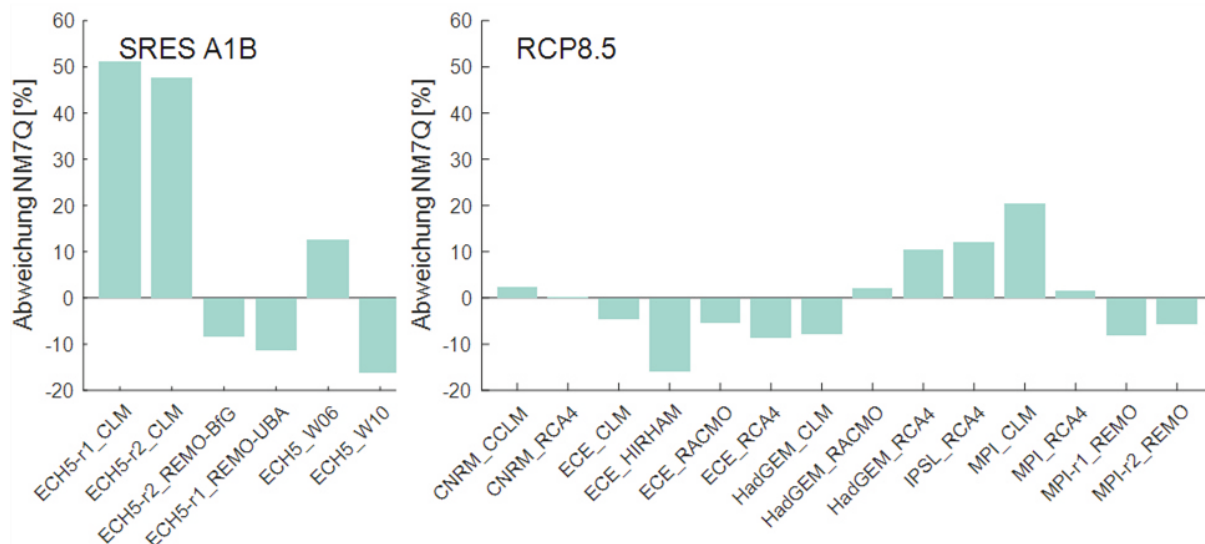


Abbildung 7-15: Abweichung der Mittelwerte des NM7Q des Abflusses aus den Klimamodellläufen und dem Referenzlauf für den Zeitraum 1970-2000 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für den Pegel Rethem.

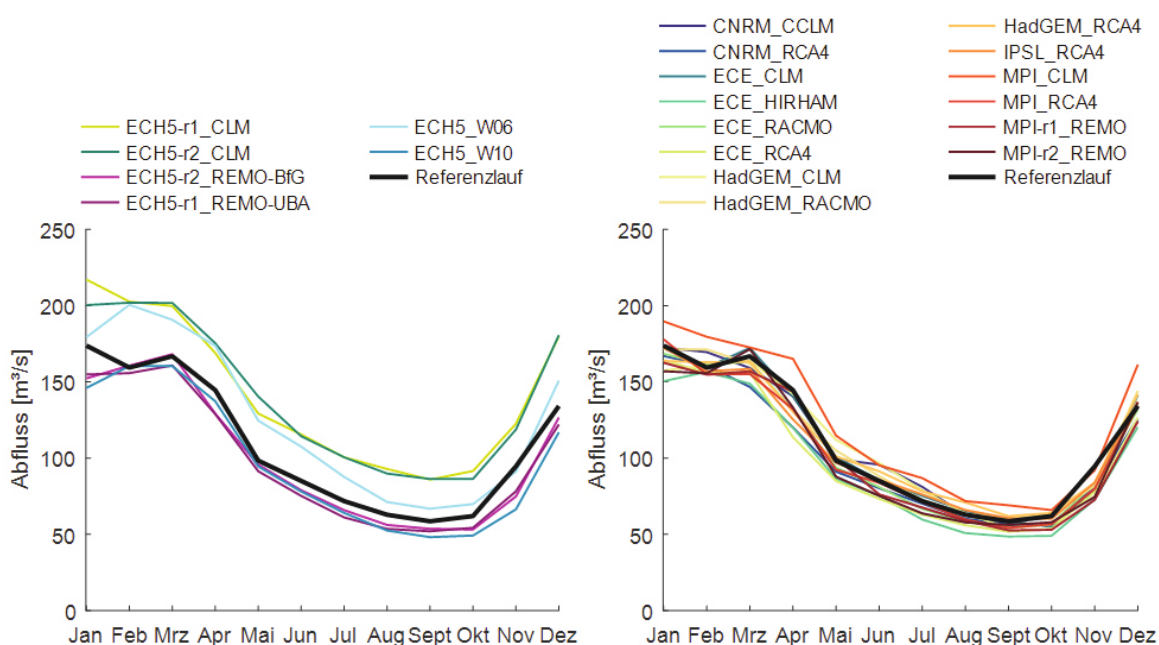


Abbildung 7-16: Vergleich der langjährigen Monatsmittelwerte des Abflusses aus den Klimamodellläufen und dem Referenzlauf für den Zeitraum 1970-2000 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für den Pegel Rethem.

### Projektion zukünftiger Änderungen für Niedrigwasserkenngrößen

Die simulierten Änderungssignale für die gemittelten NM7Q-Werte sind für das SRES A1B-Ensemble in Abbildung 7-17 und Abbildung 7-18 und für das RCP8.5-Ensemble in Abbildung 7-19 und Abbildung 7-20 dargestellt. Mit dem SRES A1B-Ensemble wird für die nahe Zukunft im Median für alle Referenzpegel eine Zunahme des NM7Q-Wertes simuliert, für die ferne Zukunft zeigen die Modelle für fast alle Pegel eine Abnahme. Eine Zunahme der NM7Q-Werte deutet auf eine Entschärfung der Niedrigwasserphasen, eine Abnahme auf eine Verschärfung hin. Diese Abnahmen für Z3 sind am größten für die Pegel im Einzugsgebiet der Vechte. Auch mit dem RCP8.5-Ensemble wird für die nahe Zukunft im Median für die meisten Pegel, mit Ausnahme der Pegel im Einzugsgebiet der Vechte, eine Zunahme des NM7Q simuliert, für die ferne Zukunft ergibt sich ein differenzierteres Bild. Im Median zeigt sich für einige Pegel eine

Zunahme, für andere eine Abnahme. Generell ist die Bandbreite der möglichen Änderungen für das NM7Q sehr groß und auch die Richtung der Änderungen (Zunahme/Abnahme) ist unterschiedlich für die einzelnen Modellketten. Einzig für das A1B-Ensemble für die ferne Zukunft wird von der Mehrheit der Klimamodellketten für die meisten Pegel eine Abnahme erwartet. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist allerdings zu beachten, dass sich das SRES A1B-Szenario aus nur 6 Modellketten zusammensetzt, die alle von dem gleichen Globalmodell (ECHAM5) angetrieben werden, während das RCP8.5-Ensemble 14 Mitglieder mit unterschiedlichem Globalmodelltrieb umfasst. Die räumliche Verteilung der Mediane der NM7Q-Änderungssignale ist in Abbildung 7-21 dargestellt. Für die ferne Zukunft für das RCP8.5-Ensemble zeigt sich hinsichtlich der Richtung der Änderungssignale für die nördlichen Pegel eher eine Zunahme der NM7Q-Werte, für die südlichen Pegel eher eine Abnahme.



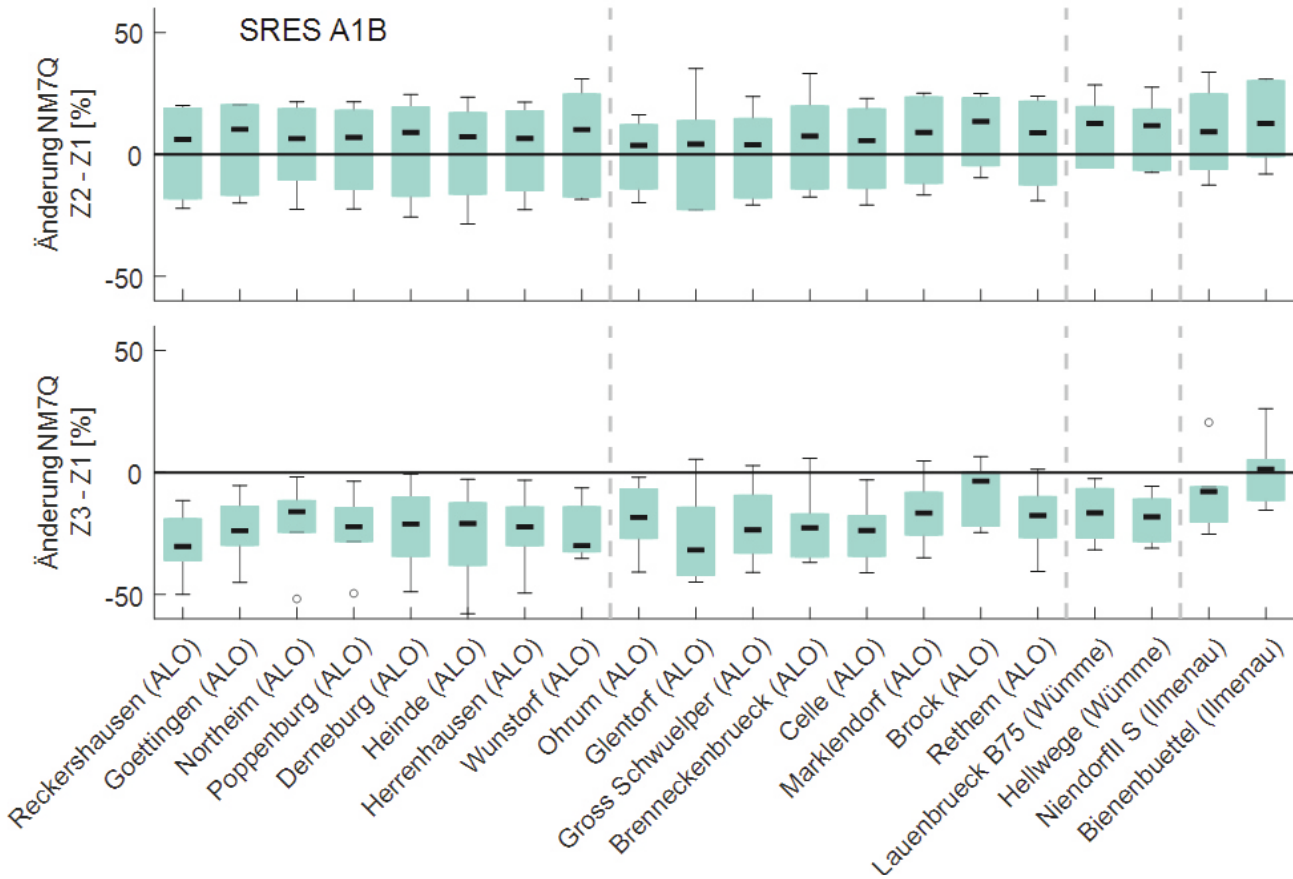


Abbildung 7-17: Änderungssignale für NM7Q für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles.

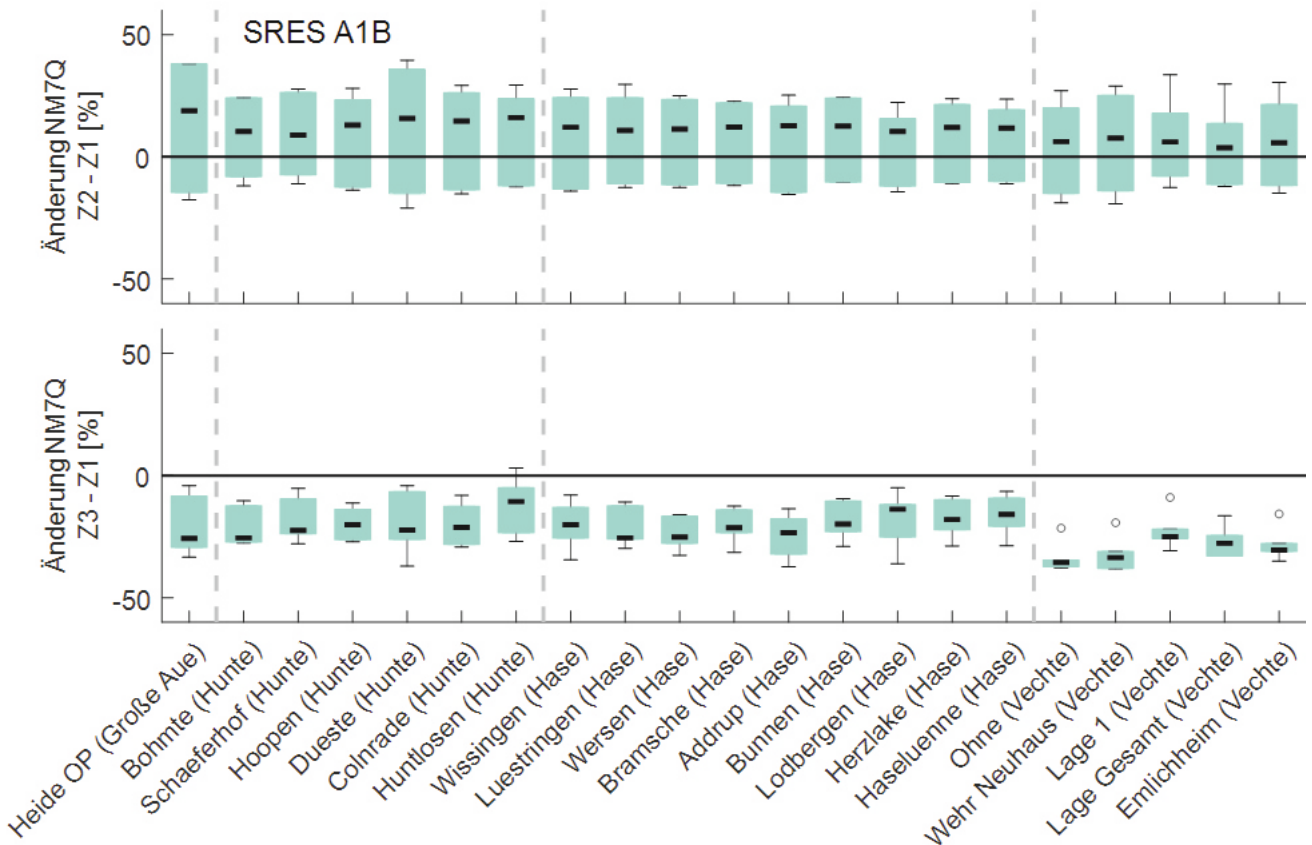


Abbildung 7-18: Änderungssignale für NM7Q für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Vechte für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles.

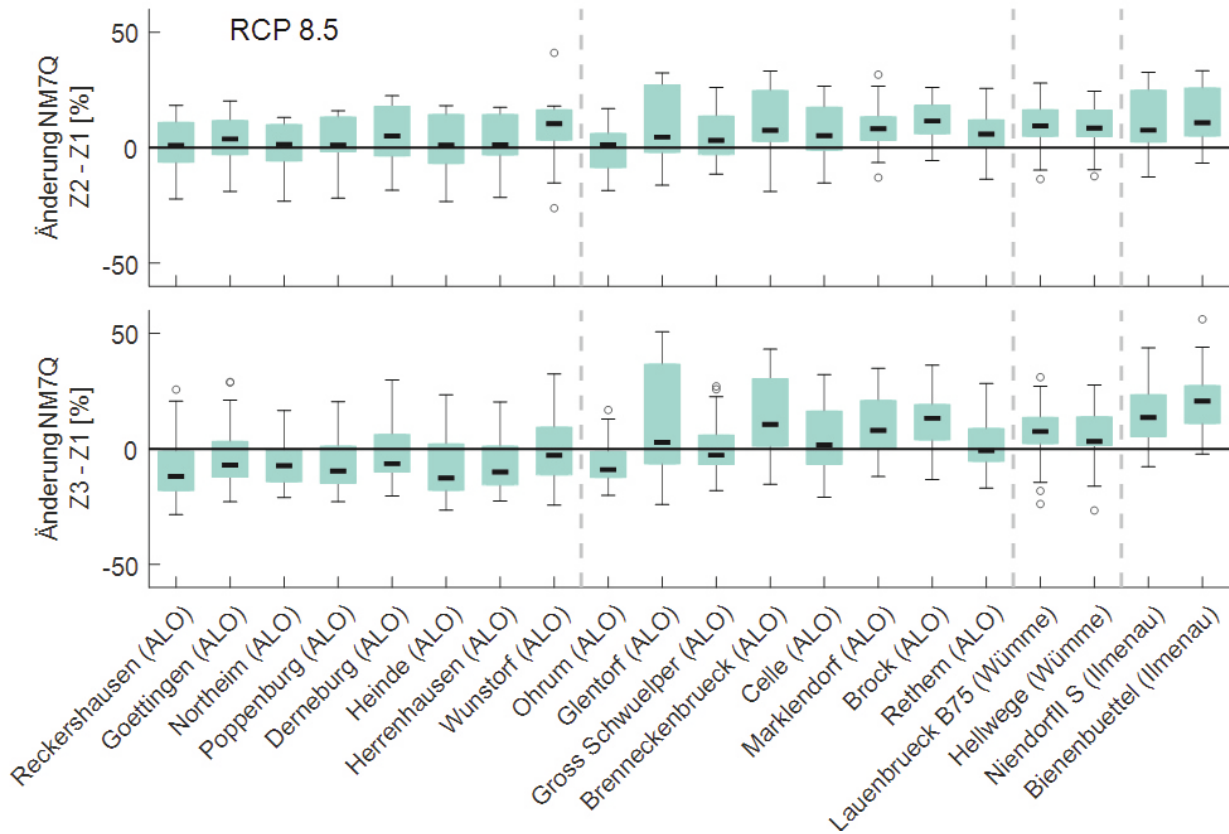


Abbildung 7-19: Änderungssignale für NM7Q für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 14 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.

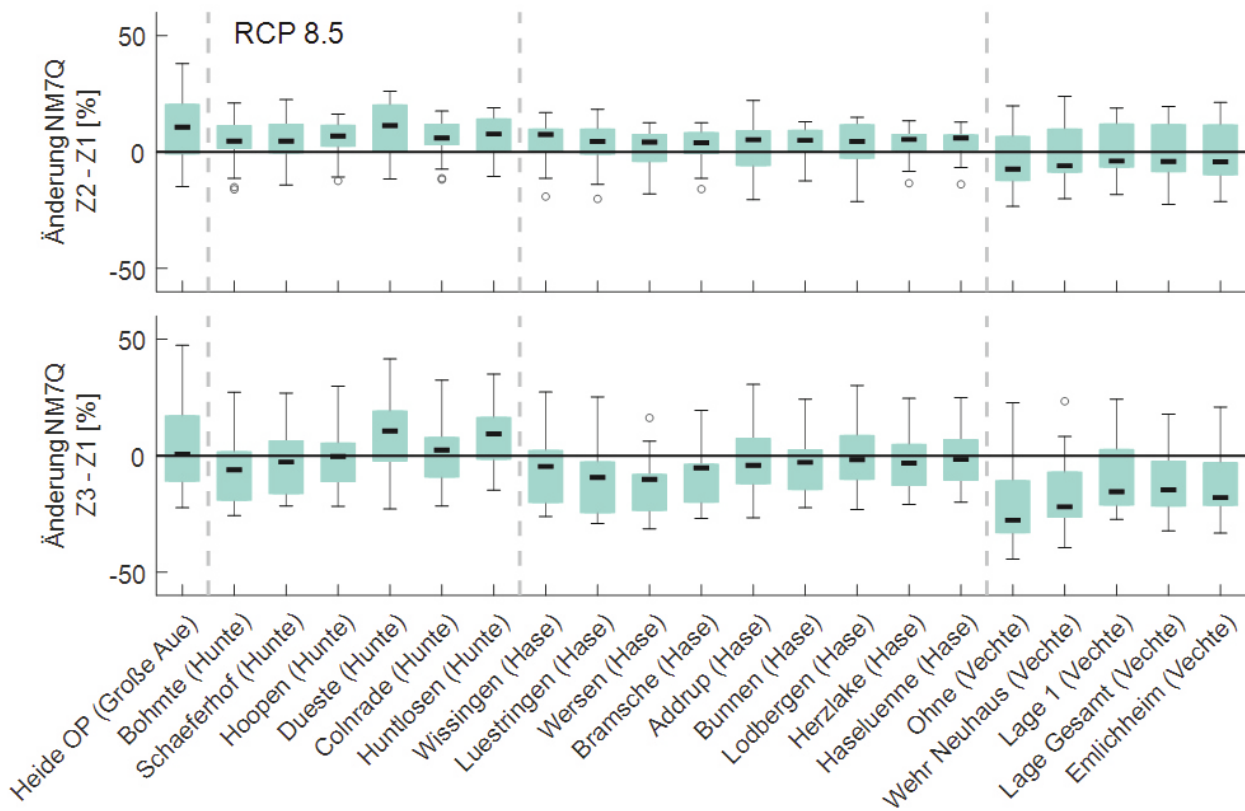


Abbildung 7-20: Änderungssignale für NM7Q für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Vechte für die 14 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.

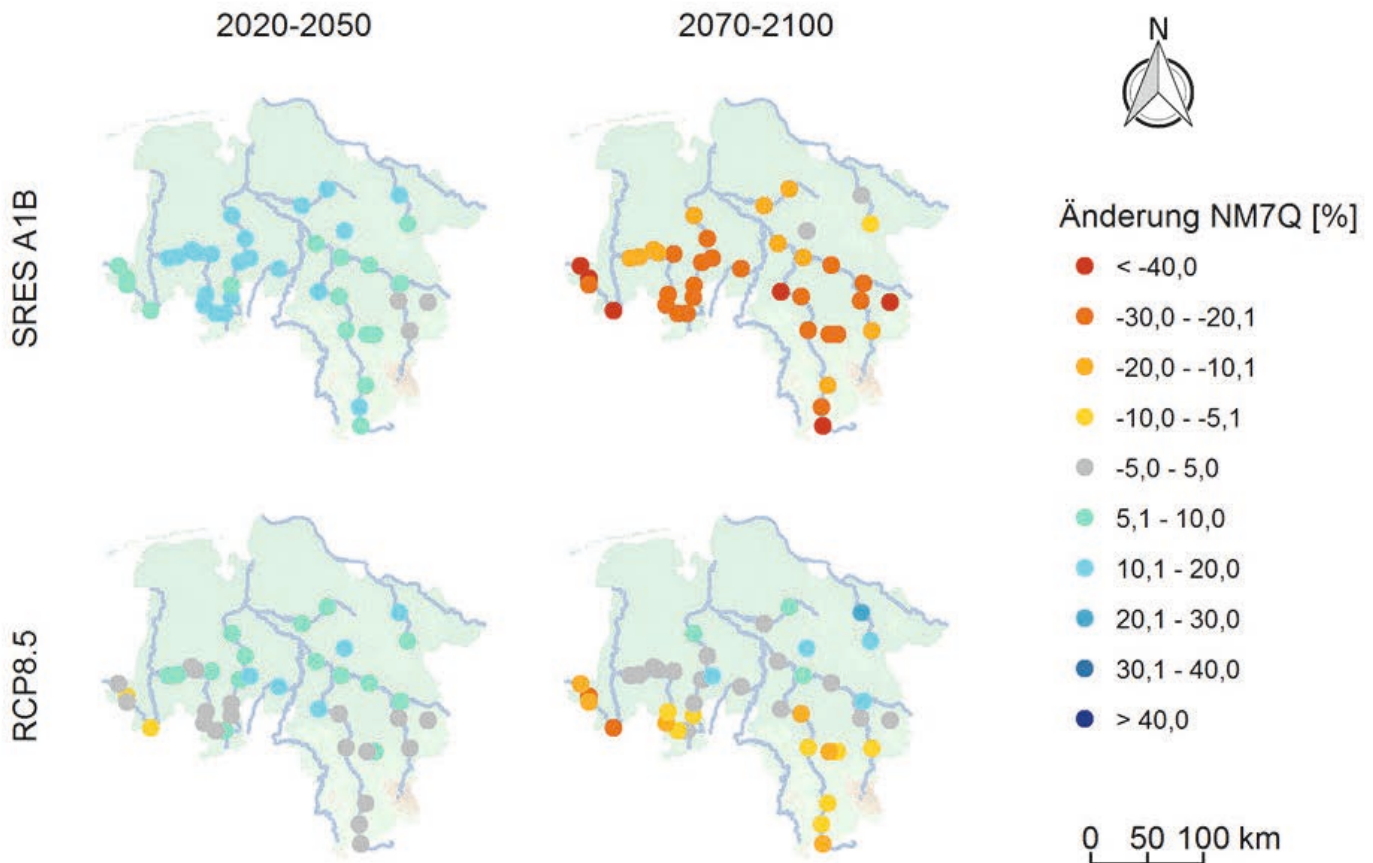


Abbildung 7-21: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für NM7Q aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.

Die NM7Q-Änderungssignale für die einzelnen Modellketten beider Ensembles sind exemplarisch für den Pegel Rethem in Abbildung 7-22 dargestellt. Auch weitere Analysen für andere Kenngrößen werden hier jeweils für den Pegel Rethem dargestellt, da dieser der Pegel mit dem größten Einzugsgebiet ist. Entsprechende Grafiken für die anderen jeweils größten Pegel aller sieben Einzugsgebiete sind im Anhang zu finden. Innerhalb des SRES A1B-Ensembles zeigen die Modellketten mit dynamischen Regionalmodellen zunächst eine Zunahme des NM7Q in der nahen Zukunft, dann (mehrheitlich) eine Abnahme in der fernen Zukunft. Die beiden statistischen Downscaling-Modelle WETTREG2006 und WETTREG2010 zeigen für die beiden Zukunftszeiträume eine kontinuierliche Abnahme des NM7Q. Die stärkste Abnahme für die ferne Zukunft wird mit WETTREG2010 simuliert.

Die simulierten Änderungen der einzelnen Modellketten des RCP8.5-Ensembles sind sehr heterogen. Es zeigen sich verschiedene Kombinationen von Zu- bzw. Abnahmen für die nahe bzw. ferne Zukunft.

Neben der Veränderung der Höhe des NM7Q-Wertes wurden die mit PANTA RHEI simulierten Zeitreihen auch hinsichtlich einer möglichen Verschiebung der Auftretenszeiträume von Niedrigwasserphasen untersucht. Die simulierte Verschiebung des mittleren Auftretenszeitpunktes für das NM7Q für die verschiedenen Modellketten für den Pegel Rethem zeigt Abbildung 7-23. Eine generelle Tendenz hin zu einem späteren oder früheren Eintreten von Niedrigwasserphasen in der Zukunft kann aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Einige Modellketten zeigen ein späteres Auftreten, einige ein früheres. Im Median sind die Unterschiede zur Referenzperiode gering und betragen für beide Ensembles nur wenige Tage.



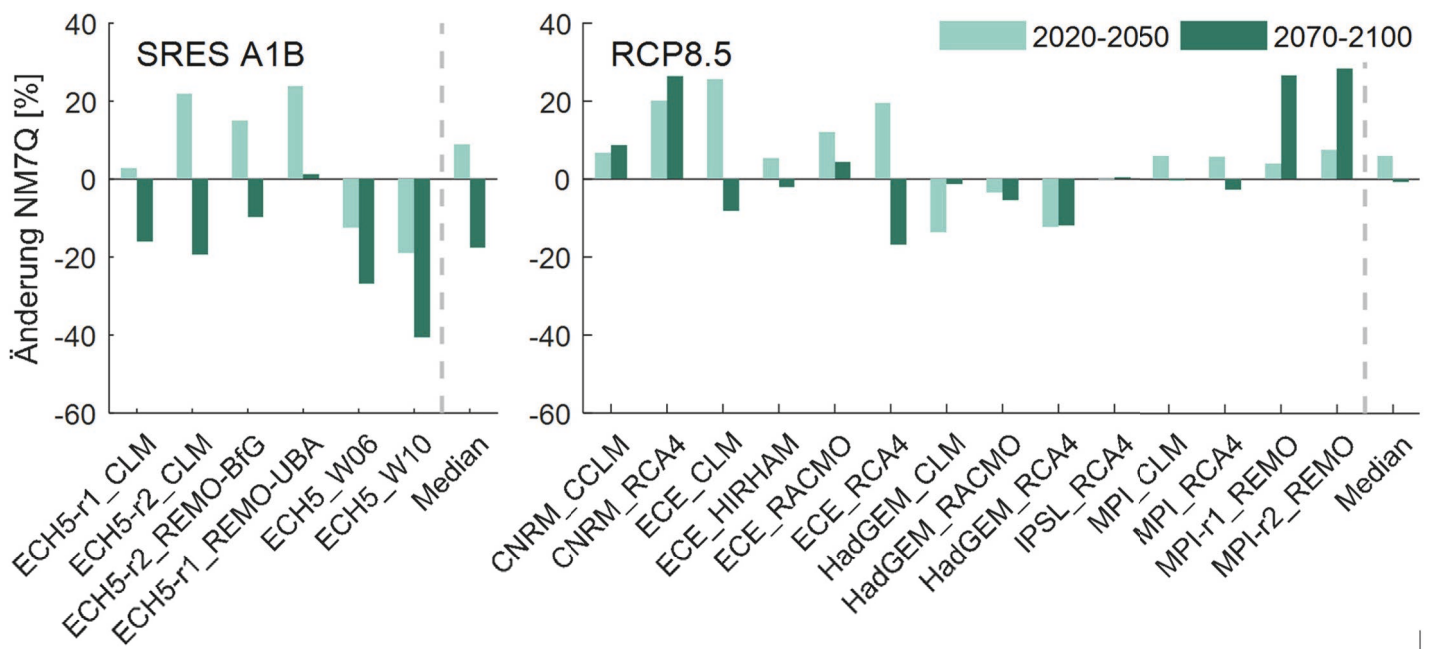


Abbildung 7-22: Änderungssignale für die gemittelten NM7Q-Werte für den Pegel Rethem für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.

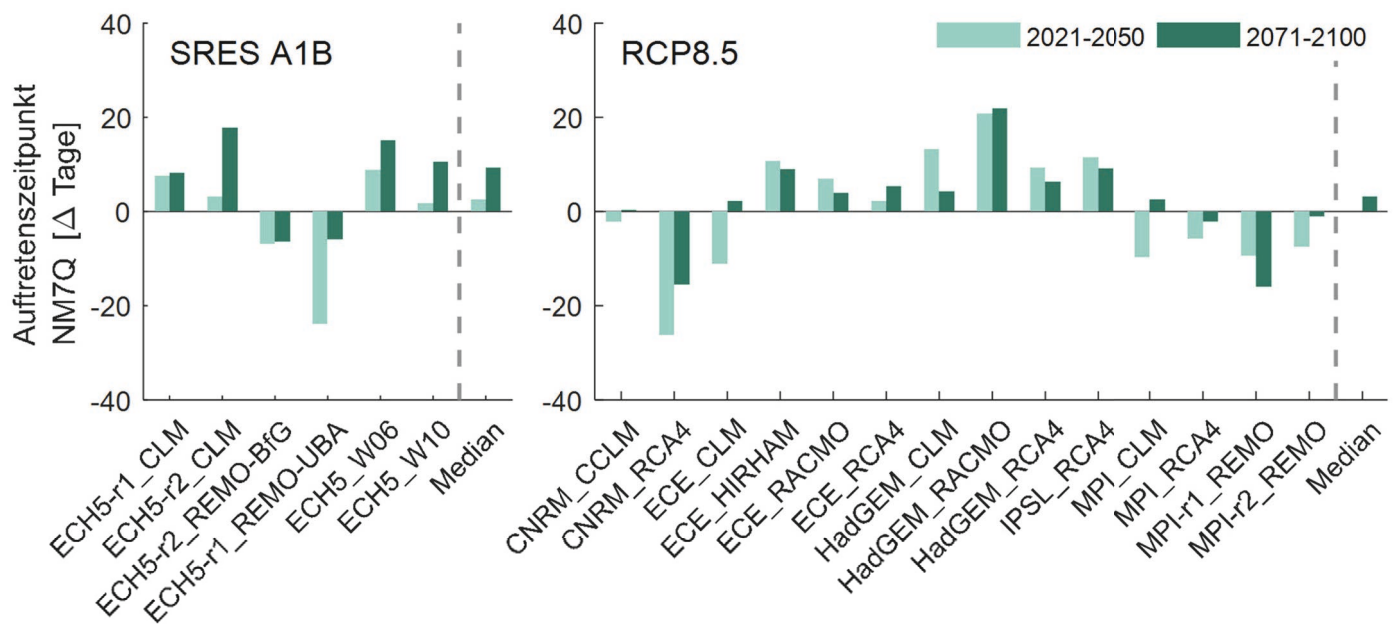


Abbildung 7-23: Verschiebung des mittleren Auftretenszeitpunktes für NM7Q für den Pegel Rethem für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000. Ein positiver Wert bedeutet ein späteres Auftreten, ein negativer Wert ein früheres Auftreten.

Der Verlauf der Entwicklung eines 30-jährlichen Mittelwertes für den NM7Q über den gesamten Simulationszeitraum (1970-2100) mit den Klimamolldaten für den Pegel Rethem ist in Abbildung 7-24 dargestellt. Der Median des RCP8.5 Ensembles des gleitenden 30-jährigen Mittels zeigt im Verlauf des Gesamtzeitraumes nur geringe Änderungen, wobei die Bandbreite der simulierten Entwicklungen der einzelnen Modellketten hoch ist. Der Median des SRES A1B-Ensembles verläuft bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts ähnlich dem Median des RCP8.5-Ensembles. Danach jedoch zeigt der Median des SRES A1B-Ensembles eine deutliche Tendenz hin zu einer Abnahme des NM7Q. Die Bandbreite aus SRES A1B ist vor allem zur Mitte des 21. Jahrhunderts besonders groß. Ab diesem Zeitpunkt bis zum Ende des Simulationszeitraumes fallen insbesondere 2 Modellketten des SRES A1B-Ensembles auf. Mit den Modellen WETTREG2006 und WETTREG2010 werden kontinuierliche Abnahmen simuliert, die deutlich stärker sind als die aller anderen Modellketten.

Die berechneten Mediane der prozentualen Änderungssignale für die Parameter NM7Q<sub>10</sub>, sumD, sumV, maxD und sumD sind in Abbildung 7-25 bis Abbildung 7-29 dargestellt.

Die generelle Tendenz der Änderungssignale ist für alle Parameter ähnlich. Wie auch bei NM7Q zeigt sich für die nahe Zukunft eine Entschärfung der Niedrigwasserphasen für beide Ensembles. Bei NM7Q<sub>10</sub> bedeutet dies positive Änderungssignale. Bei allen anderen Parametern deuten negative Signale auf eine Entschärfung der Niedrigwasserphasen hin. Für die ferne Zukunft werden mit dem SRES A1B-Ensemble deutlich trockenere Verhältnisse simuliert, bei RCP8.5 sind die Signale kleiner und räumlich heterogen. Die räumlichen Muster für Z3

und das RCP8.5-Ensemble für die Parameter NM7Q<sub>10</sub>, sumD, sumV, maxD und sumD sind demjenigen für NM7Q sehr ähnlich. Die Höhe der Änderungssignale unterscheidet sich jedoch für die einzelnen Parameter. Generell sind die prozentualen Signale für sumD, sumV, maxD und sumD meist stärker als diejenigen für NM7Q und NM7Q<sub>10</sub>.

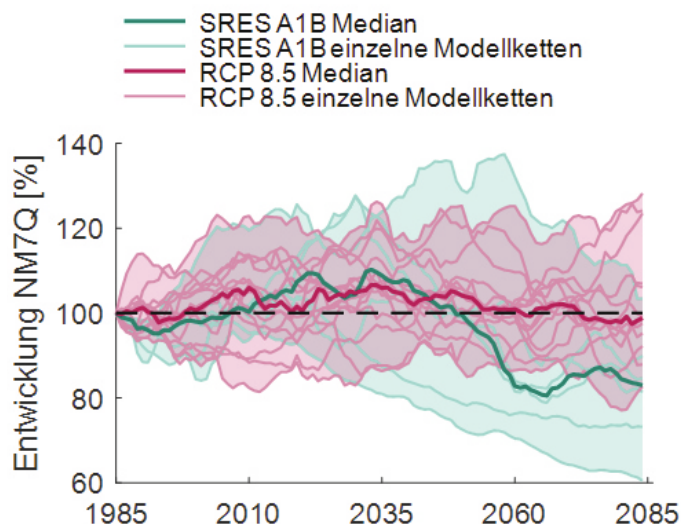


Abbildung 7-24: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes des NM7Q für die einzelnen Mitglieder des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1970-2100 (Mittelwert 1970-2000 entspricht 100%) für den Pegel Rethem. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an.

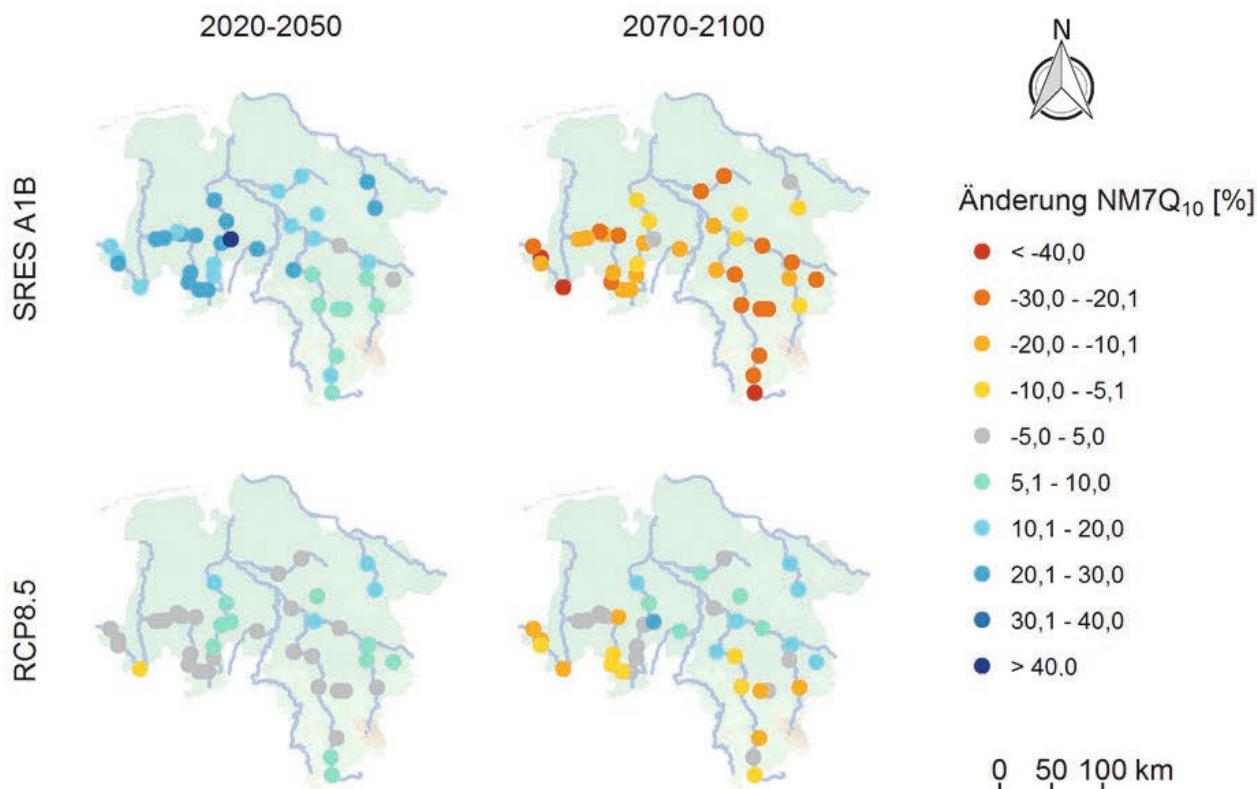


Abbildung 7-25: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für NM7Q<sub>10</sub> aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.

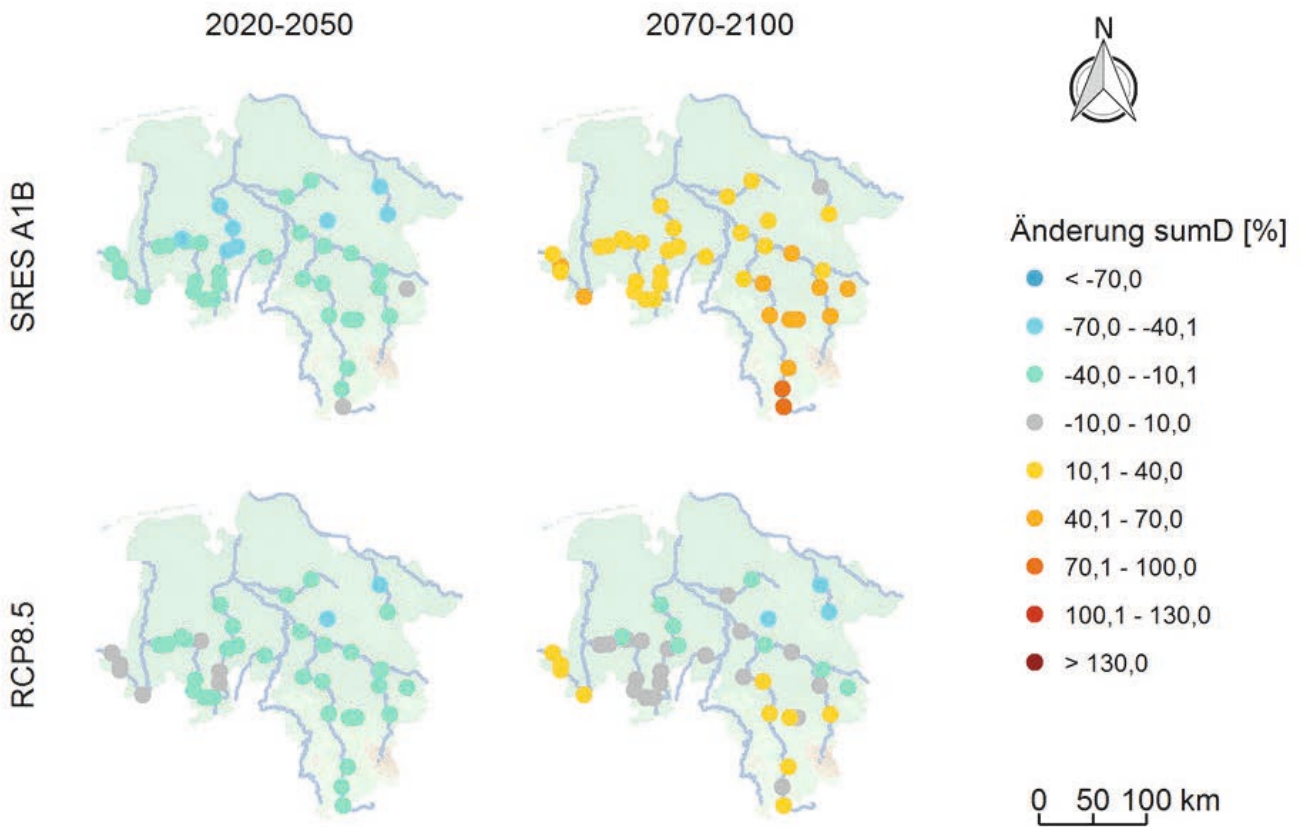


Abbildung 7-26: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für sumD aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.

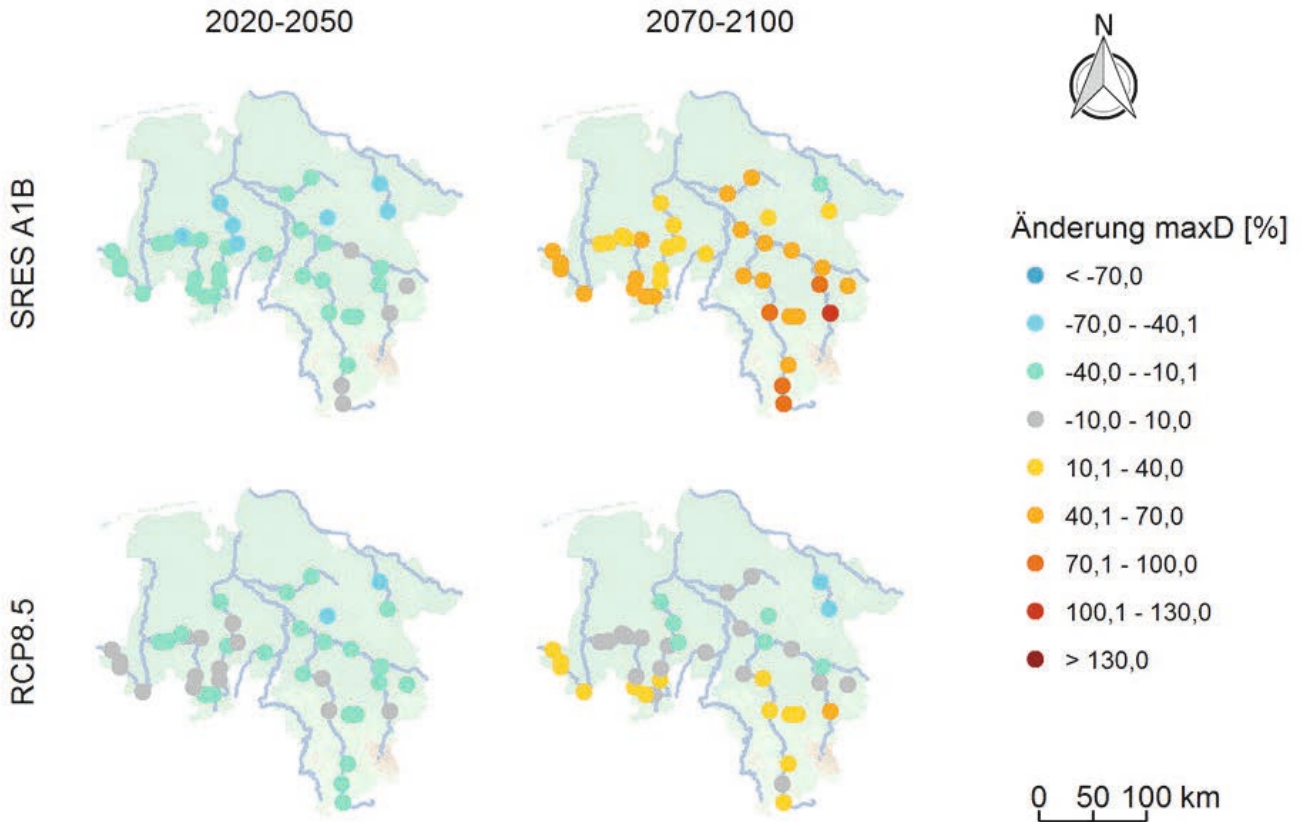


Abbildung 7-27: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für maxD aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.



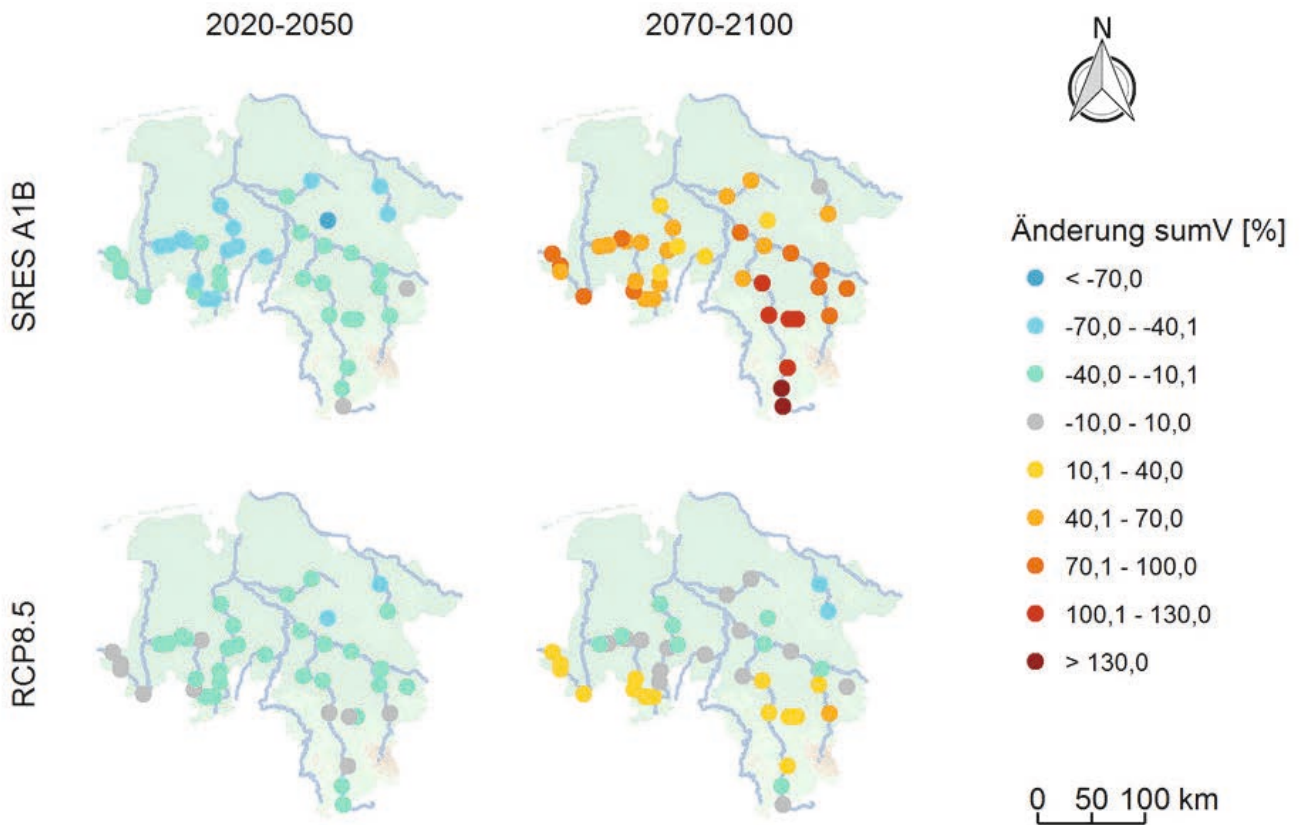


Abbildung 7-28: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für sumV aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.

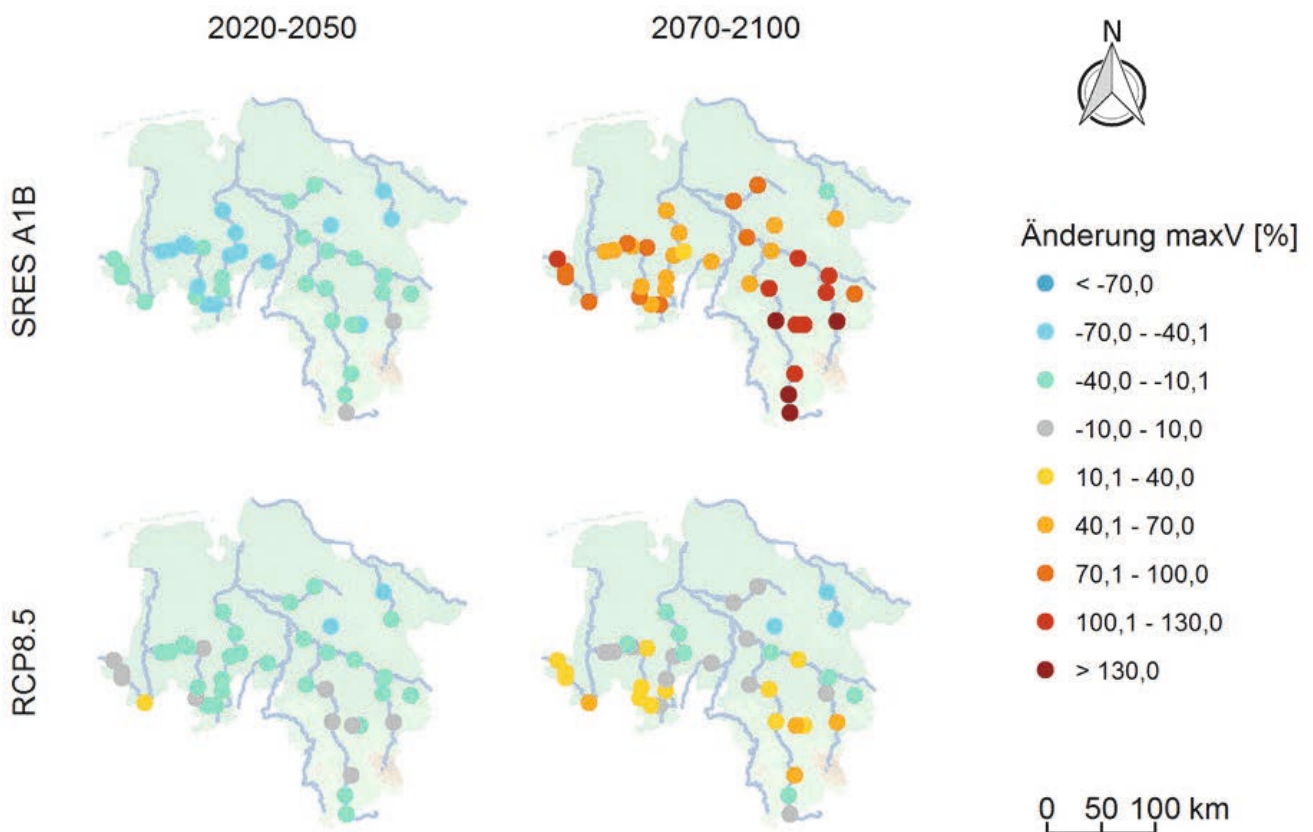
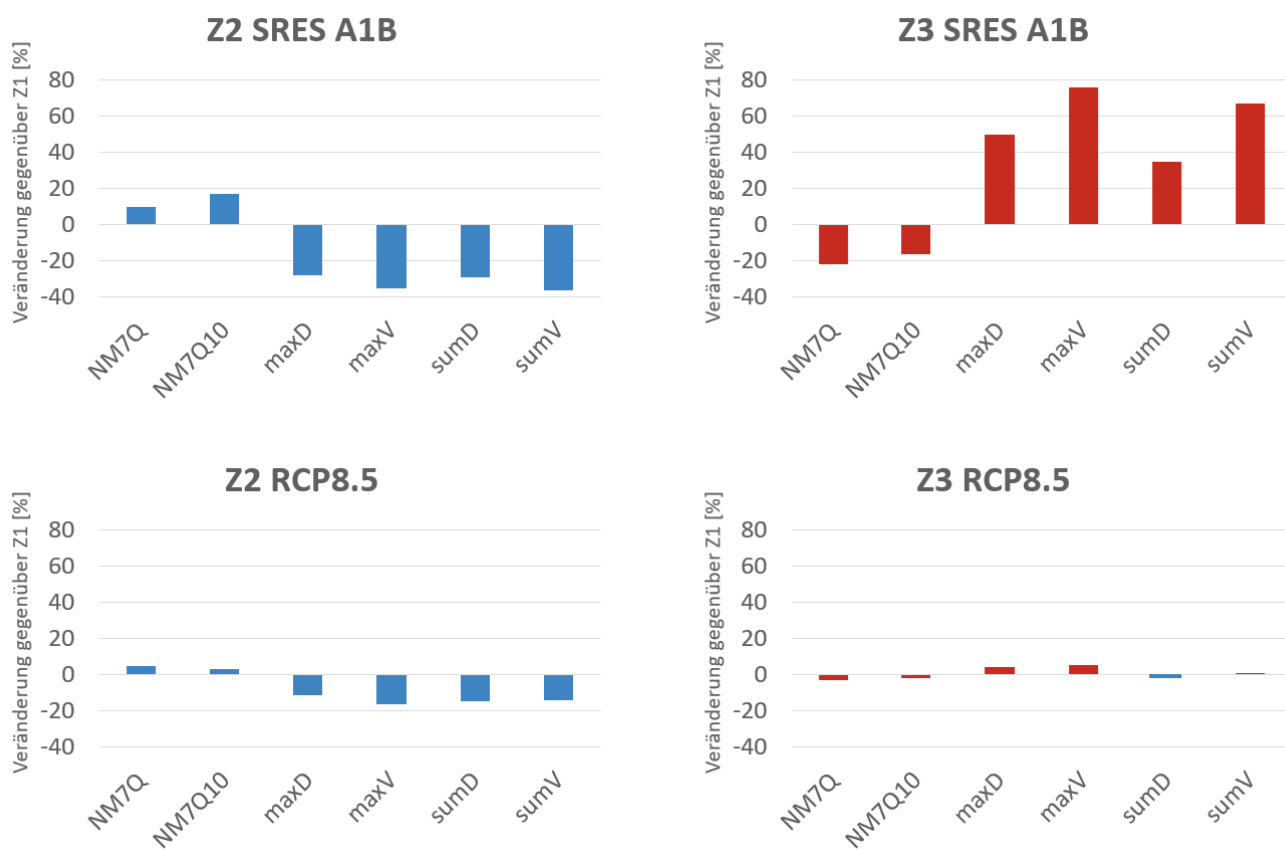


Abbildung 7-29: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für maxV aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.

Die Ergebnisse aus der hydrologischen Modellierung hinsichtlich der Änderungssignale für Niedrigwasser-kenngrößen sind in Abbildung 7-30 zusammengefasst. Die Darstellung enthält die Mediane der Änderungssignale aus den 41 Referenzpegeln, die Pegelwerte wiederum sind Mediane aus den einzelnen Modellketten. Die unterschiedliche Skalierung der einzelnen Grafiken

macht deutlich, dass die so zusammengefassten Ergebnisse auf geringere prozentuale Änderungen für das RCP8.5-Ensemble hindeuten. Die Änderungen für SRES A1B sind für die nahe Zukunft etwas stärker und für die ferne Zukunft deutlich stärker ausgeprägt als diejenigen für das RCP8.5-Ensemble.



**Abbildung 7-30: Prozentuale Änderungssignale für die Parameter NM7Q, NM7Q10, maxD, MaxV, sumD und sumV für die nahe (Z2) und die ferne (Z3) Zukunft. Die Werte entsprechen den Medianen aller Referenzpegel. Die Werte für die einzelnen Referenzpegel sind die Mediane aller Modellketten für das jeweilige THG-Szenario (SRES A1B und RCP8.5). Blaue Balken indizieren ein Änderungssignal, welches einer Entschärfung der Niedrigwasserphasen entspricht, rot bedeutet eine Verschärfung des jeweiligen Parameters.**

### 7.2.6 Zusammenfassung

Die ermittelten Änderungsfaktoren für die Niedrigwasser-kennwerte unterscheiden sich einerseits stark für die einzelnen Klimamodellketten und die einzelnen Referenzpegel. Dennoch zeigen sich teilweise für die betrachteten Zeiträume und Szenarien der Treibhausgasentwicklung eindeutige Tendenzen. Beide Ensembles zeigen im Median für die meisten Referenzpegel für die nahe Zukunft eine Zunahme von NM7Q und NM7Q10 sowie eine Abnahme der Parameter maxD, sumD, maxV und sumV. All diese Tendenzen zeigen in Richtung einer Entschärfung der Niedrigwassersituation für die nahe Zukunft 2020-2050.

Für die ferne Zukunft 2070 bis 2100 sind die simulierten Änderungen für die beiden Ensembles unterschiedlich. Während für das SRES A1B-Ensemble insgesamt im Median eine eindeutige Verschärfung der Niedrigwassersituation simuliert wird, sind die Änderungen für das RCP8.5-Ensemble deutlich geringer. Des Weiteren zeigen die Mediane der Änderungssignale für die einzelnen Referenzpegel in unterschiedliche Richtungen. Für einige, hauptsächlich im nördlicheren Bereich gelegene

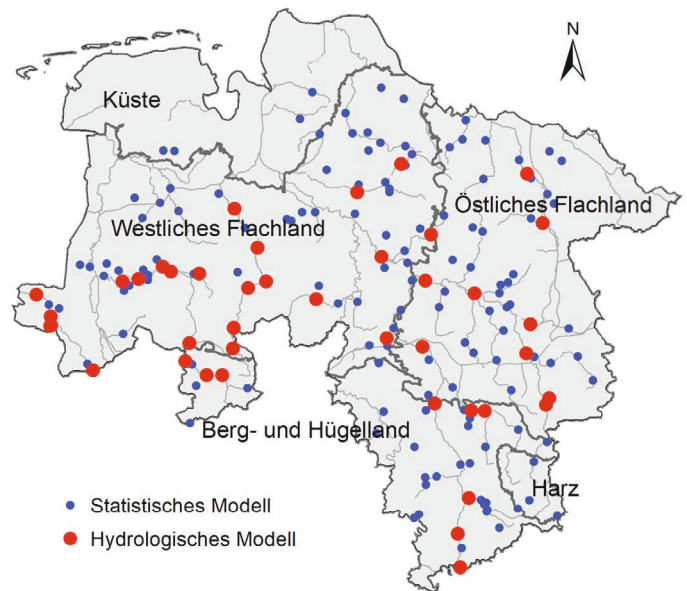
Referenzpegel, wird eine leichte Zunahme simuliert, für die südlicheren Referenzpegel eher eine leichte Abnahme. Die Analyse der einzelnen Klimamodellketten zeigt, dass die Höhe der Änderungssignale für die beiden Ensembles nicht alleine auf die Höhe der projizierten Änderungen der Treibhausgasemissionen zurückzuführen ist. Eine wichtige Rolle spielt auch die Zusammensetzung der Ensembles. So ist zu berücksichtigen, dass das SRES A1B-Ensemble aus lediglich 6 Modellketten besteht, die von einem einzigen Globalmodell angetrieben werden, während sich das RCP8.5-Ensemble aus 14 Modellketten mit unterschiedlichen Global- und Regionalmodellen zusammensetzt, die zudem einer neueren Generation von Klimamodellen angehören. Andererseits beinhaltet das SRES A1B-Ensemble statistische Modelle (WETTREG2006 und WETTREG2010), welche im RCP8.5-Ensemble nicht enthalten sind. Mit diesen beiden statistischen Regionalmodellen werden für die Zukunft vergleichsweise hohe Änderungssignale hin zu trockeneren Verhältnissen simuliert.

### 7.3 Zusammenführung der Ergebnisse aus hydrologischer Modellierung und statistischer Prognose

Die Ergebnisse des hydrologischen Modells PANTA RHEI, beschrieben in Kapitel 7.2, und des statistischen Prognosemodells aus Kapitel 7.1 werden innerhalb topografisch-klimatologischer Regionen in Niedersachsen zusammengeführt und verglichen. Dabei werden die Änderungssignale (d.h. Mediane der jeweils maßgeblichen Ensembles) über alle verfügbaren Pegel innerhalb einer Region als Boxplot zusammengefasst. Als Ausreißer definierte Werte werden in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt. Die fünf Regionen umfassen die Küste, das westliche und östliche Flachland, das Berg- und Hügelland und den Harz. Die Regionen inklusive der verfügbaren Pegel für die beiden Wirkmodelle sind in Abbildung 7-31 dargestellt. Stationen mit Auswertungen des hydrologischen Modells sind nur im westlichen und östlichen Flachland, sowie im Berg- und Hügelland verfügbar. Das statistische Wirkmodell liefert Prognosen für alle Regionen, da die Modellanpassung an der Küste jedoch nicht erfolgreich war, wird diese Region nicht näher betrachtet.

Die Änderungssignale aus den zwei Wirkmodellen für das westliche Flachland sind am Beispiel des NM7Q10 in Abbildung 7-32 dargestellt. Beide Wirkmodelle zeigen ähnliche Tendenzen für die betrachteten Zeiträume. In beiden Szenarien gibt es Zunahmen im NM7Q10 in der nahen Zukunft und Abnahmen in der fernen. Die Änderungssignale fallen dabei in A1B wesentlich stärker aus. Auch in den Änderungssignalen der anderen Indizes stimmen die Wirkmodelle im westlichen Flachland überein. Eine Ausnahme stellt das maxV dar. Wie in Abbildung 7-33 zu sehen, werden hier für das RCP8.5-Szenario große Bandbreiten durch das statistische Modell projiziert. Die Ursache hierfür liegt im bereits in Abschnitt 7.1.3 diskutierten Fehler im statistischen Modell des maxV, der in einigen Gebieten zu einer starken Überschätzung der Änderungssignale führt. Der Großteil der betroffenen Gebiete liegt im westlichen Flachland und macht sich somit im Gesamtvergleich bemerkbar.

Abbildung 7-34 zeigt die jeweiligen Projektionen des NM7Q10 für das östliche Flachland. Auch hier stimmen die Wirkmodelle in der Richtung der zukünftigen Entwicklungen überein. Anders als im westlichen Flachland zeigen beide Modelle Zunahmen im Z3-Zeitraum bei RCP8.5. Generell sind die positiven Änderungssignale des hydrologischen Modells im Z2-Zeitraum stärker, im Z3-Zeitraum zeigt das statistische Modell die stärkeren Signale.

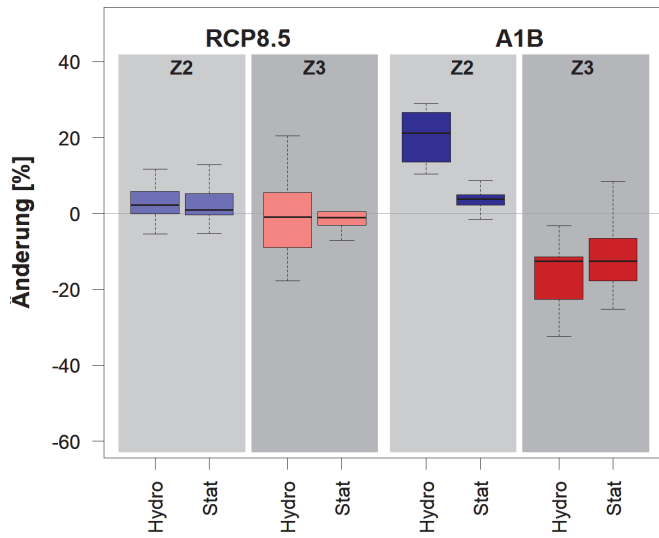


**Abbildung 7-31: Topografisch-klimatologische Regionen und Lage der verfügbaren Stationen für die Ergebniszusammenführung des hydrologischen und statistischen Modells.**

Im östlichen Flachland zeigen sich Unterschiede zwischen den Wirkmodellen in den Indizes maxD und sumD, wie in Abbildung 7-35 zu sehen. Während die Projektionen des hydrologischen Modells auf Basis von RCP8.5 in beiden Zeiträumen und auf Basis von A1B im Z2-Zeitraum durchweg negative Signale mit relativ großer Bandbreite liefern, zeigt das statistische Modell geringe Zunahmen mit kleiner Bandbreite. Bereits in Abschnitt 7.1.3 wurde festgestellt, dass sich das maxD entgegen der restlichen Indizes im RCP-Szenario verhält. Da der Fehler, der durch Verwendung der aus den Klimamodelldaten abgeleiteten meteorologischen Indizes entsteht, beim maxD und sumD größer ist als bei den anderen Indizes, sind die Ergebnisse des statistischen Modells in diesem Falle weniger belastbar als die des hydrologischen Modells.



NMQ10 - Westliches Flachland



NM7Q10 - Östliches Flachland

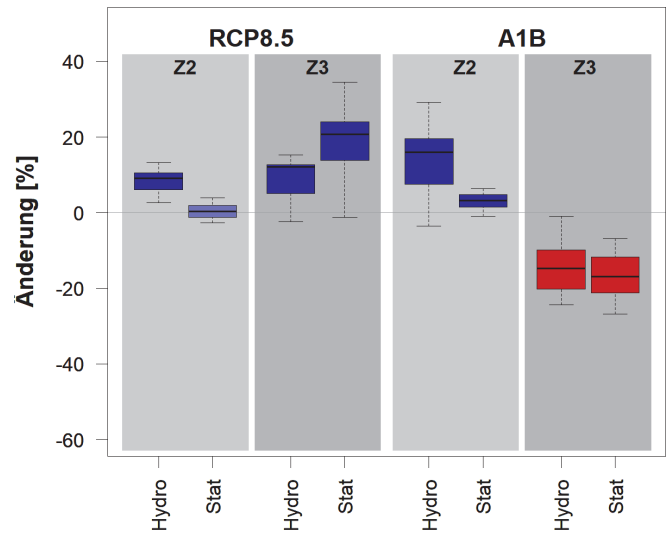
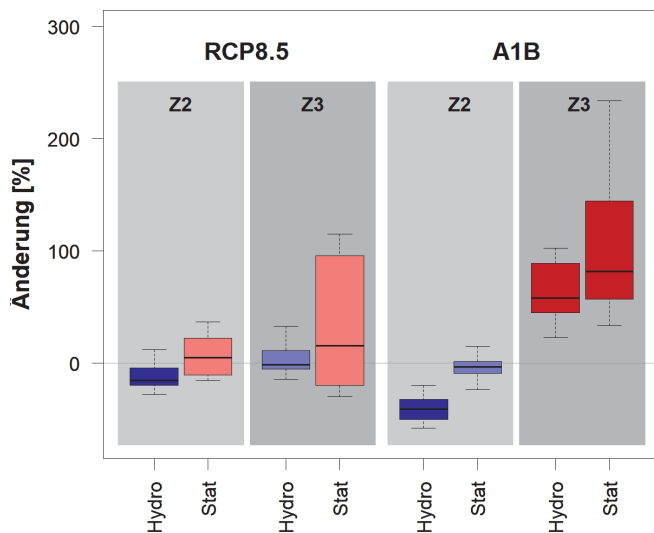


Abbildung 7-33: Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das NM7Q10 im westlichen Flachland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3)

Abbildung 7-32: Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das NM7Q10 im östlichen Flachland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3)

maxV - Westliches Flachland



maxD - Östliches Flachland

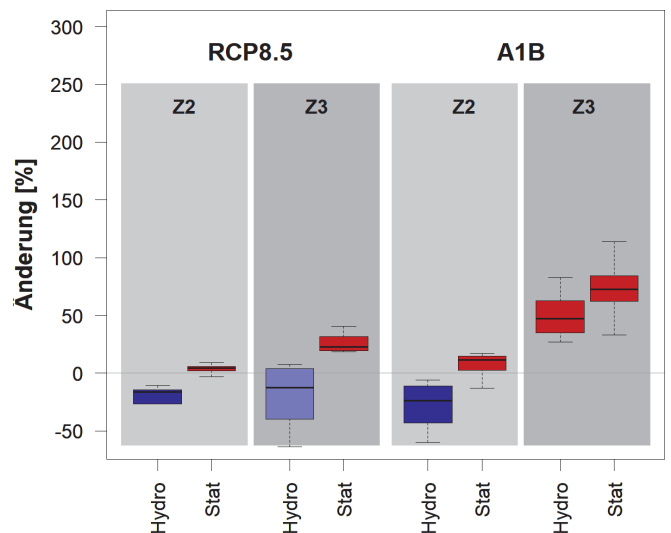


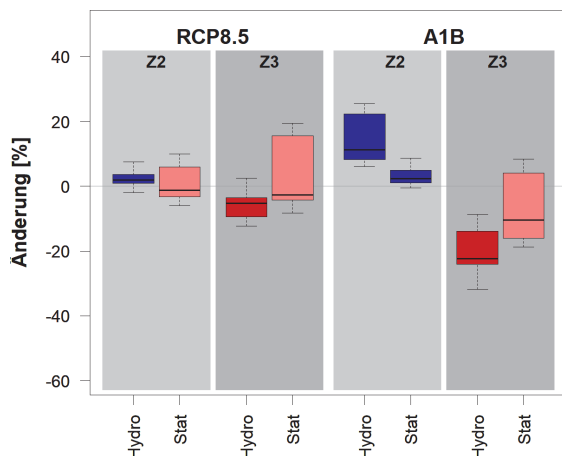
Abbildung 7-35: Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das mittlere maxV im westlichen Flachland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3)

Abbildung 7-34: Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das mittlere maxD im östlichen Flachland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3)

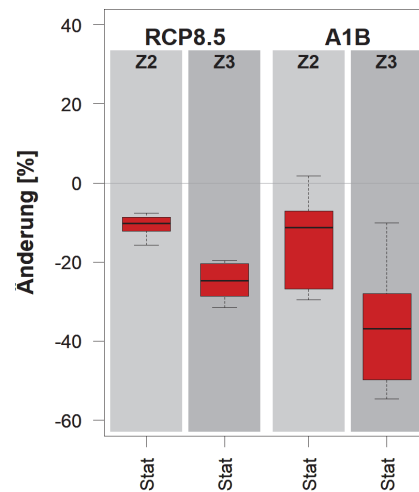
Die NM7Q10-Signale für das Berg- und Hügelland werden in Abbildung 7-36 verglichen. Hier ist besonders beim RCP8.5-Szenario erkennbar, dass die Projektionen der Wirkmodelle voneinander abweichen. Das hydrologische Modell schätzt Zunahmen im NM7Q10 in Z2 und Abnahmen in Z3. Das statistische Modell produziert eine wesentlich größere Bandbreite an Ergebnissen, die im Median jeweils auf eine Abnahme des NM7Q10 hindeuten. Die Größe der Bandbreite deutet darauf hin, dass die Modellanpassung und Projektionen mit dem statistischen Modell im Berg- und Hügelland schwierig sind. Die Region ist im Vergleich zum flachen nördlichen Teil Niedersachsens physiografisch eher heterogen, was besonders die räumliche Schätzung mithilfe von Gebietseigenschaften im statistischen Modell erschwert. Das hydrologische Modell, das lokale hydrologische Prozesse detailliert nachbildet, liefert hier die präziseren Ergebnisse. Dies gilt ebenso für die anderen Indizes.

In der Harzregion, für die nur Stationen des statistischen Modells zur Verfügung stehen, sind die Änderungen eindeutig. Alle Indizes in allen Zeiträumen und Szenarien zeigen eine klare Abnahme (vgl. Abbildung 7-37).

Die beiden Wirkmodelle unterscheiden sich grundlegend in ihren Ansätzen. Das hydrologische Modell basiert auf der detaillierten Nachbildung natürlicher hydrologischer Prozesse, während das statistische Prognosemodell diese stark vereinfacht bzw. komplett vernachlässigt. Die Berücksichtigung möglichst vieler relevanter Faktoren macht das hydrologische Modell äußerst präzise und ermöglicht auch dann relevante Projektionen über zukünftige hydrologische Verhältnisse, wenn sich Einflussfaktoren untereinander und zur Zielgröße (nicht-linear) verändern. Der Vorteil der statistischen Modelle liegt in ihrer geringen Komplexität, die auf dem expliziten Fokus auf die Niedrigwasserindizes und deren Einflussfaktoren beruht. Die Einfachheit macht die Modelle übertragbar auf unbeobachtete Gebiete und ermöglicht so eine großflächige regionale Klimafolgenabschätzung. Der Nachteil in der Vernachlässigung von Prozessen, die nicht offensichtlich mit der Niedrigwasserentstehung in Verbindung stehen, hat zur Folge, dass mögliche Änderungen im Zusammenspiel der Einflussfaktoren keine adäquate Umsetzung im Modell finden und so die Niedrigwasserprognosen verfälscht werden.



**Abbildung 7-36:** Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das NM7Q10 im Berg- und Hügelland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3)



**Abbildung 7-37:** Änderungssignale des statistischen Wirkmodells für das NM7Q10 im Harz; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3)

In der Klimafolgenabschätzung stehen die Wirkmodelle am Ende einer langen Modellkette. Jeder Schritt in dieser Kette bringt neue Unsicherheiten mit sich, die durch die nachgeschalteten Modelle verstärkt werden. Die Betrachtung von Klimamodellensembles ist deshalb erforderlich, damit die ganze Bandbreite der Unsicherheiten in den Klimasignalen berücksichtigt werden kann. Ebenso kann der Vergleich unabhängiger Wirkmodelle helfen, Unsicherheiten in der Modellierung der Klimafolgen zu identifizieren.

Stimmen die Ergebnisse aus beiden Wirkmodellen überein, deutet dies auf eine verlässliche Schätzung der Auswirkungen der Klimaänderungen auf das Niedrigwasserverhalten hin. Unterschiede in den Projektionen lassen auf Unsicherheiten schließen. Im Großteil der Indizes und Regionen kommt es hier in der Tat zu einer Übereinstimmung zwischen den Wirkmodellen. Die Projektionen über die Änderungssignale sind in Richtung und Stärke also vertrauenswürdig.

Unstimmigkeiten in einzelnen Regionen und Indizes können meist auf Unsicherheiten im statistischen Modell zurückgeführt werden.

Grundsätzlich können nach Zusammenführung der Ergebnisse beider Wirkmodelle folgende Aussagen über die regionale Niedrigwasserentwicklung in Niedersachsen getroffen werden:

- Auf Basis des betrachteten Ensembles des A1B-Szenarios wird für alle Regionen eine Verschärfung der Niedrigwassersituation in der fernen Zukunft projiziert. Dies betrifft alle betrachteten Niedrigwasserkennwerte.
- Laut betrachtetem RCP8.5-Ensemble entschärft sich die Niedrigwassersituation in der fernen Zukunft im östlichen Flachland, im Berg- und Hügelland hingegen wird es trockener. Für das westliche Flachland können keine eindeutigen Änderungssignale abgeleitet werden.
- In beiden Klimaszenarien kommt es in der nahen Zukunft eher zu Abnahmen der Trockenheit.
- Im Harz ist mit starken Zunahmen der Trockenheit in allen Zeiträumen zu rechnen.

## 8 Abschätzung der regionalen Bedeutung zukünftig veränderter Niedrigwasserverhältnisse in Niedersachsen

### 8.1 Grundsätzliches

Im vorangegangenen Kapitel wurden die möglichen zukünftigen Veränderungen der Niedrigwasserverhältnisse in Niedersachsen unter der Wirkung von zwei verschiedenen Klimaszenarien untersucht und anhand verschiedener hydrologischer Kenngrößen dargestellt. Diese Informationen dienen im Folgenden als Basis für die Identifikation von Regionen, die besonders von diesen Folgen des Klimawandels betroffen sein werden (sog. Hotspots). In diesem Zusammenhang spielen nicht nur die Veränderungen von Kenngrößen eine Rolle, die die hydrologischen Verhältnisse charakterisieren. Wichtig ist ebenso die Frage, welche Bedeutung diese Veränderungen für ein betroffenes System haben. So können beispielsweise vom Betrag her große Veränderungen eine verhältnismäßig geringe Bedeutung für ein System haben, wenn dieses gegenüber den Veränderungen relativ widerstandsfähig erscheint. Umgekehrt können kleine Veränderungen eine große Bedeutung für ein System haben, wenn dieses relativ empfindlich auf entsprechende Veränderungen reagiert oder bestimmte kritische Schwellenwerte über- bzw. unterschritten werden. Dabei können sowohl ökologische, soziale als auch ökonomische Gesichtspunkte betrachtet werden.

In diesem Zusammenhang orientiert sich das weitere Vorgehen zur Abschätzung der regionalen Bedeutung der ermittelten Klimafolgen im Bereich Niedrigwasser in Niedersachsen in erster Linie am Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (Buth et al., 2017). Das Konzept des Leitfadens besagt, dass sich die Vulnerabilität, d.h. die Verletzlichkeit eines Systems, aus zwei Faktoren zusammensetzt (vgl. Abbildung 8-1).

Zum einen geht es um die Klimawirkung. Sie beschreibt die Belastung eines Systems aufgrund von klimatischen Einflüssen (hier z.B. Trockenheit) unter Berücksichtigung des räumlichen Vorkommens von betroffenen Systemelementen (z.B. Nutzungen am oder im Gewässer) sowie den systemspezifischen Sensitivitäten dieser Elemente gegenüber diesem Einfluss (z.B. Toleranzbereich bestimmter Organismen). Zum anderen ergibt sich die Vulnerabilität aus den Anpassungskapazitäten, d.h. den Möglichkeiten eines Systems, sich durch zusätzliche Maßnahmen in der Zukunft an den Klimawandel und seine Folgen anzupassen. Dieser letztgenannte Aspekt ist sehr komplex, da er von vielen Faktoren beeinflusst wird, deren zukünftige Entwicklung und Bedeutung aber nur schwer eingeschätzt bzw. quantifiziert werden können. Dies führt dazu, dass sich die Anpassungskapazität tendenziell nur unscharf und sehr aufwändig bestimmen lässt. Daher wird sie im Zuge der weiteren Betrachtungen an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der regionalen Bedeutung der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse erfolgt in KliBiW somit ausschließlich anhand der Klimawirkung.

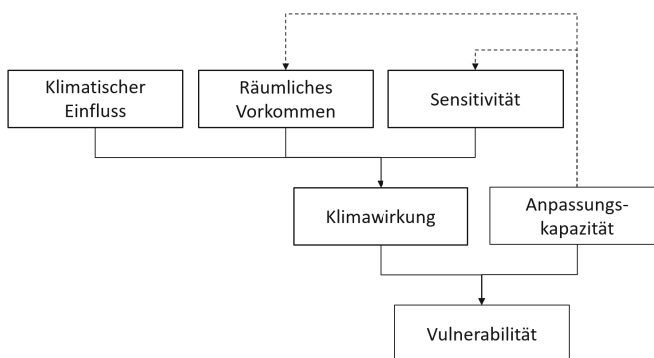


Abbildung 8-1: Das Vulnerabilitätskonzept des Leitfadens für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (Buth et al., 2017)

Als betroffene Systeme kommen sowohl der Mensch (z.B. Freizeitnutzung von Fließgewässern, Trinkwasserversorgung), die Umwelt (Gewässer als Lebensraum für Tiere und Pflanzen) als auch die Wirtschaft (Wasser als Rohstoff, z.B. für Produktion und Energiegewinnung, oder als Verkehrsweg für die Schifffahrt) in Betracht. Diese Vielfalt erfordert umfangreiche Daten für eine detaillierte und spezifische Analyse bzw. Bewertung der Betroffenheit. Die dafür notwendigen Ressourcen standen im Zuge der Phase 5 des KliBiW-Projektes nicht zur Verfügung. Daher werden an dieser Stelle zwei übergeordnete Faktoren herangezogen, die für die genannten Systeme eine wesentliche Bedeutung besitzen. Dies ist zum einen der (anthropogene) Wasserbedarf in Form von Entnahmen aus den Oberflächengewässern sowie die (ökologisch relevante) Wasserqualität in Form der allgemeinen Schadstoffbelastung der Gewässer.

Aufgrund dieser vereinfachten Herangehensweise an das Thema, sollte das Ergebnis zunächst als eine Ersteinschätzung der Bedeutung der regionalen Klimafolgen für Niedersachsen im Bereich Niedrigwasser angesehen werden. Zudem sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den folgenden Analysen nicht um kleinräumige, lokale Bewertungen für einzelne Gewässer handelt, sondern um großräumige Einschätzungen, die mittlere Tendenzen für eine Region aufzeigen. Diese Einschätzungen basieren auf zwei verschiedenen Klimaszenarien. Die in dem Projekt benutzten Klimamodelldaten umfassen hierbei lediglich einen Teil der aktuell verfügbaren Daten zu den möglichen zukünftigen Entwicklungen in Niedersachsen.



## 8.2 Vorgehensweise

Die Einschätzung der Niedrigwasserverhältnisse erfolgt auf Basis der zuvor festgelegten Teilregionen in Niedersachsen (Kapitel 7.3). Die Identifikation von räumlichen Mustern findet zunächst für den Referenzzeitraum statt. Da die mit Hilfe der Klimamodelldaten simulierten Abflussdaten an den Referenzpegeln gewisse Unsicherheiten und damit Bandbreiten aufweisen, wurden die Bedingungen für diesen Zeitraum anhand von beobachteten Abflussreihen ermittelt. Da nicht an allen Referenzpegeln Aufzeichnungen für den Zeitraum von 1971-2000 vorlagen, wurden einige Pegel von den weiteren Betrachtungen ausgenommen, wodurch keine (repräsentativen) Aussagen für die Regionen der Küste und des Harzes möglich waren. Anschließend wurden die zukünftigen Verhältnisse durch Verschneidung der beobachteten Muster mit den regionalen Änderungssignalen qualitativ abgeschätzt.

Die Einschätzung der regionalen Sensitivitäten erfolgt in einem weiteren Schritt anhand der übergeordneten Faktoren (anthropogen benötigte) Wassermenge und (anthropogen bedingte) Wasserqualität. Ein direkter Bezug zu ökologischen Komponenten wird dabei nicht hergestellt, da deren Betroffenheit von vielen Faktoren in einem komplexen Zusammenspiel abhängig ist. Die benötigten Wassermengen werden über die zulässigen Entnahmemengen nach dem Wasserbuch Niedersachsen ermittelt. Hierbei wird nach folgenden Entnahmезwecken (Rechtszwecken) unterschieden: Entnahmen für die öffentliche oder betriebliche Wasserversorgung (Trinkwasser, Brauchwasser, Kühlwasser), Entnahmen für die landwirtschaftliche Beregnung, Entnahmen für die Wasserkraftnutzung sowie Entnahmen für die Speisung von Teichen (z.B. zur Fischzucht oder für Feuchtbiotope). Da die Sensitivität der einzelnen Nutzungen allgemein nur schwer einschätzbar erscheint, wurden hier lediglich die (zulässigen) Entnahmemengen sowie das Vorkommen von Entnahmestellen betrachtet. Die Wasserqualität wurde mit Hilfe der Konzentration des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Ablauf von Einleitungsstellen abgeschätzt. Der CSB-Wert ist ein Summenparameter für den Sauerstoffverbrauch bei der Oxidation aller im Wasser oxidierbaren Stoffe und gilt als wichtiger Indikator für die Gesamtbelastung von Wasser. Die entsprechenden Daten stammen aus der Einleiterüberwachung des NL-WKN.

Die abschließende Einschätzung der regionalen Bedeutung der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse erfolgte über die Kombination der Erkenntnisse zum Ausmaß der Klimawirkung (Niedrigwasserstände, Niedrigwasserdauer, Defizitvolumen bei Niedrigwasser) mit den Faktoren der Sensitivität (erlaubte Wasserentnahmemenge, gemessene Abwasserbelastung). Dabei wurde der aktuelle Zustand des Systems betrachtet, ohne Berücksichtigung von möglichen, zukünftigen Anpassungsmaßnahmen.

### 8.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Analysen der aktuellen und zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse für die betrachteten Regionen bewertet.

In Abbildung 8-2 sind in der Karte die mittleren Abflussspenden des NM7Q10 an den betrachteten Pegeln für den Referenzzeitraum 1971-2000 dargestellt, die auf Basis von beobachteten Abfluss-Zeitreihen ermittelt wurden. Es ist zu erkennen, dass die niedrigsten Abflussspenden beim NM7Q10 innerhalb der Referenzperiode im westlichen Flachland (entlang von Vechte, Hunte und Wümme) sowie im östlichen Flachland (entlang von Al-

ler und Oker bzw. ihren Zuflüssen) zu finden sind. Die Boxplot-Diagramme zeigen die möglichen Veränderungen, differenziert nach den beiden Klimaszenarien (A1B und RCP8.5), den beiden Zukunftszeiträumen (Z2: nahe Zukunft (2021-2050), Z3: ferne Zukunft (2071-2100)) sowie den beiden verwendeten hydrologischen Modellen, anhand der Mediane an den einzelnen Referenzpegeln. Diese zeigen für die nahe Zukunft im Wesentlichen eine Zunahme der NM7Q10-Abflüsse in allen Regionen (und fast allen betrachteten Pegeln) gleichermaßen, wobei die Zunahmen unter A1B deutlicher ausfallen als unter RCP8.5. In der fernen Zukunft zeigen sich

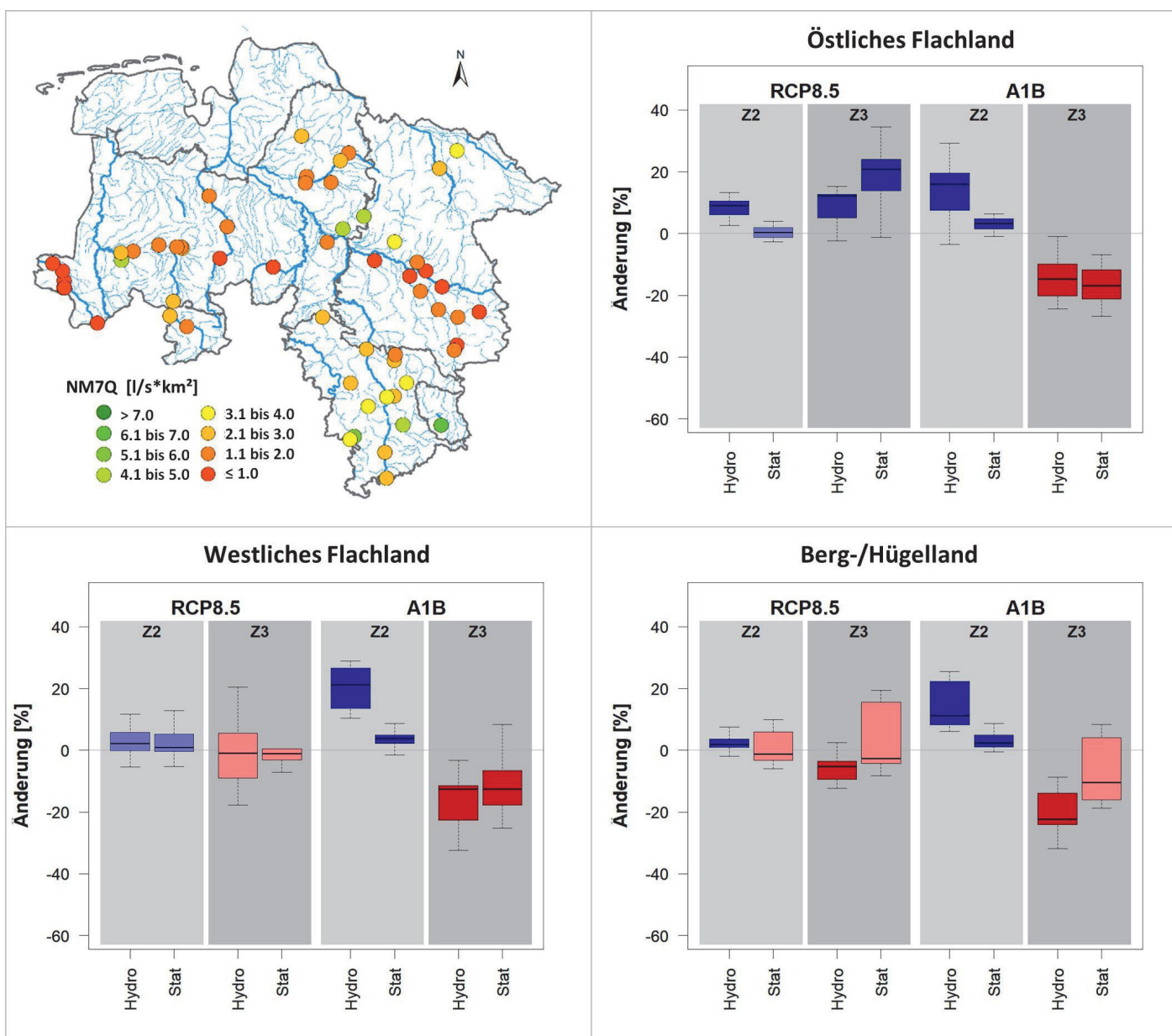


Abbildung 8-2: Mittlere Abflussspenden für das NM7Q10 innerhalb der Referenzperiode 1971-2000 (oben links) sowie die zugehörigen regionalen Änderungssignale, differenziert nach Klimaszenario, naher (Z2) und ferner (Z3) Zukunft sowie dem jeweiligen Impaktmodell

unter dem A1B-Szenario in allen Regionen gleichermaßen deutliche Abnahmen der Abflussspenden. Unter RCP8.5 käme es im östlichen Flachland zu einer weiteren Entspannung, während die Entwicklungen im westlichen Flachland sowie im Berg-/Hügelland tendenziell uneinheitlich verlaufen. Insgesamt weist damit das westliche Flachland zukünftig im Mittel die geringsten Abflussspenden beim NM7Q10 auf.

Abbildung 8-3 zeigt in gleicher Weise die aktuellen Zustände und zukünftigen Veränderungen der maximalen Dauer von Niedrigwasserphasen (maxD). Demnach kamen innerhalb der Referenzperiode 1971-2000 die

längsten Niedrigwasserperioden regional im westlichen Flachland (an Vechte, Hunte und Wümme) sowie im östlichen Flachland (entlang der Aller und ihrer Zuflüsse) vor. Die Entwicklungen in der nahen Zukunft zeigen innerhalb beider Szenarien keine eindeutige Richtung. Insgesamt scheint es aber eher zu einer Verkürzung der maximalen Niedrigwasserphasen in allen Regionen bzw. an den meisten Pegeln zu kommen (vor allem unter A1B). Auch die Entwicklungen in der fernen Zukunft zeigen unter dem RCP8.5 nur schwache, meist leicht zunehmende Tendenzen. Unter dem A1B-Szenario käme es zu einer erheblichen Zunahme der maximalen Niedrigwasserdauer an allen betrachteten Pe-

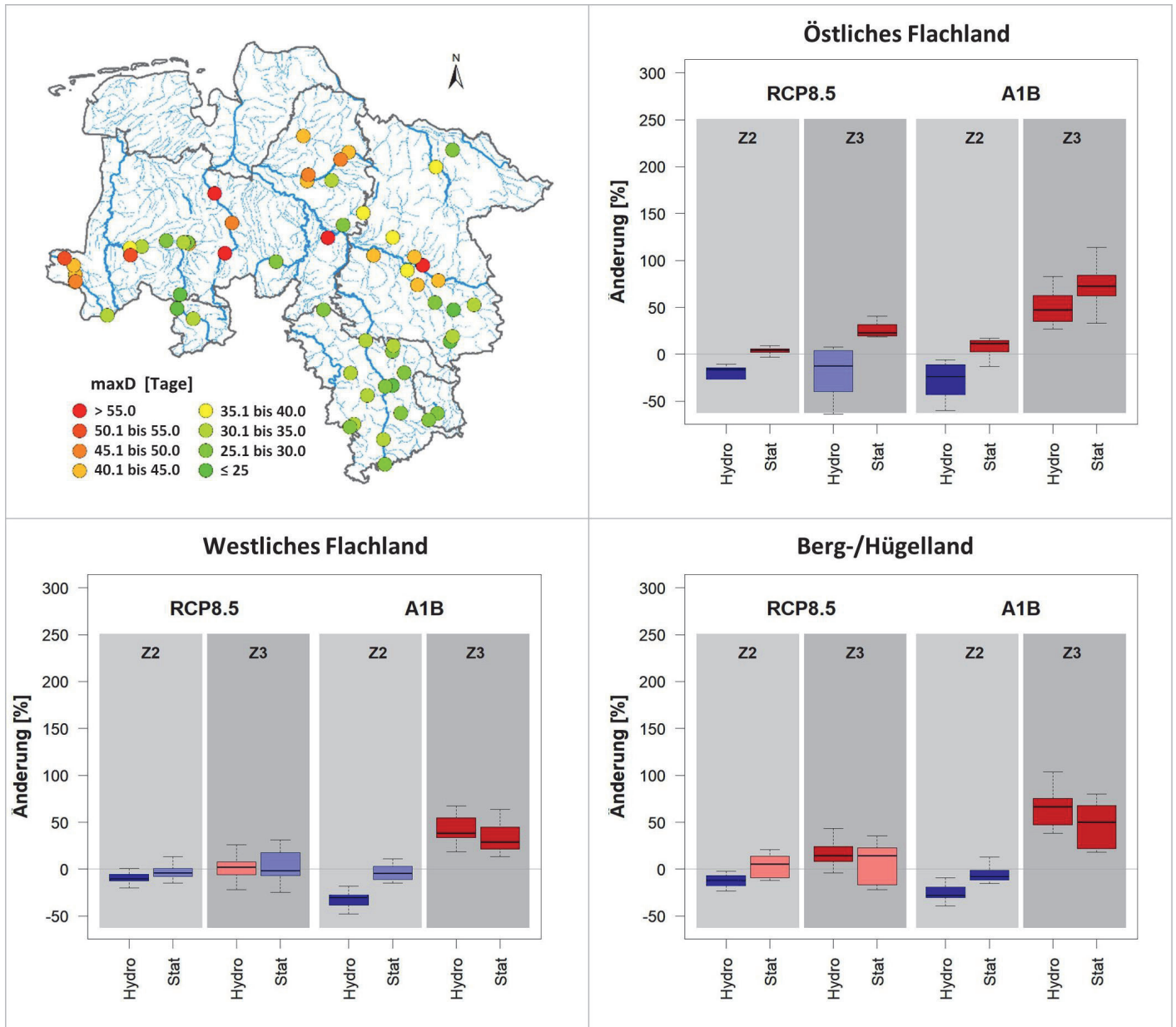


Abbildung 8-3: Maximale Niedrigwasserdauer (maxD) gemittelt über die Referenzperiode 1971-2000 (oben links) sowie die zugehörigen regionalen Änderungssignale, differenziert nach Klimaszenario, naher (Z2) und ferner (Z3) Zukunft sowie dem jeweiligen Impaktmodell



geln, wobei diese im Bereich des östlichen Flachlandes sowie im Berg-/Hügelland etwas stärker ausfällt als im westlichen Flachland. Damit würden das westliche und östliche Flachland zukünftig ähnlich lange maximale Niedrigwasserperioden aufweisen, die sich vor allem unter dem A1B-Szenario deutlich verschärfen können.

Abbildung 8-4 zeigt die aktuellen Verhältnisse und zukünftigen Veränderungen des maximalen Volumendefizites im Zuge von Niedrigwasserphasen (maxV). Die Karte macht deutlich, dass die maximalen Defizite bzgl. des Abflussvolumens im Niedrigwasserfall innerhalb der Referenzperiode 1971-2000 im westlichen Flachland (entlang von Vechte, Hunte und Wümme)

vorkamen. In der nahen Zukunft bleiben diese Verhältnisse nahezu unverändert bzw. es kommt tendenziell zu einer leichten Entspannung (Verringerung des Defizites) in fast allen Regionen unter beiden Szenarien. In der fernen Zukunft kann es unter dem RCP8.5 vor allem im westlichen Flachland tendenziell zu einer Vergrößerung des maximalen Volumendefizites kommen, die an einigen Pegeln einer Verdopplung des Defizites gleichkommt. Die Entwicklungen im Berg-/Hügelland sind uneinheitlich. Im östlichen Flachland käme es sogar zu einer weiteren Verringerung des Defizites. Unter dem A1B-Szenario käme es in allen Regionen zu einer deutlichen Vergrößerung des Volumendefizites, wobei diese im Berg-/Hügelland am deutlichsten ausfällt. Ins-

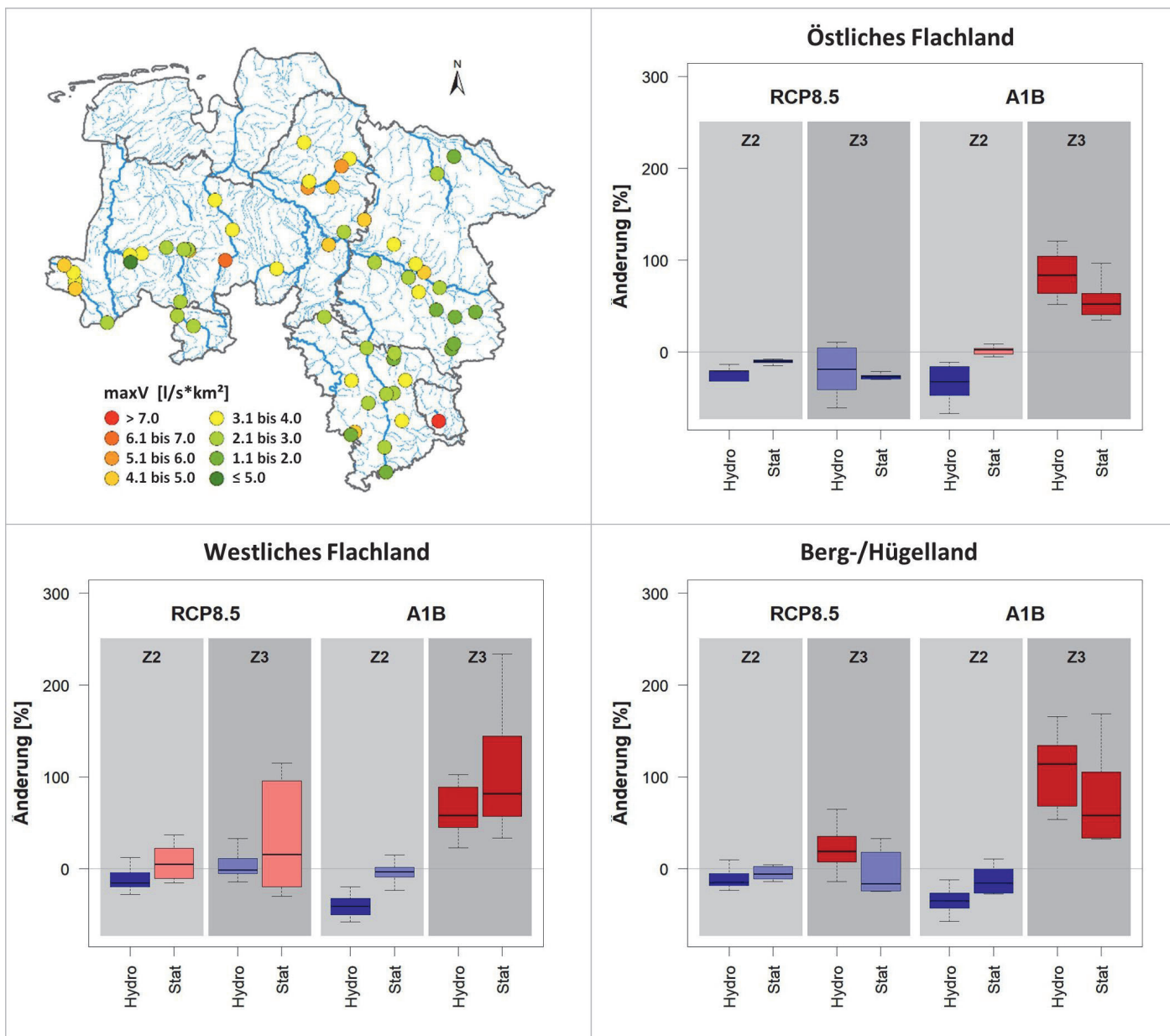


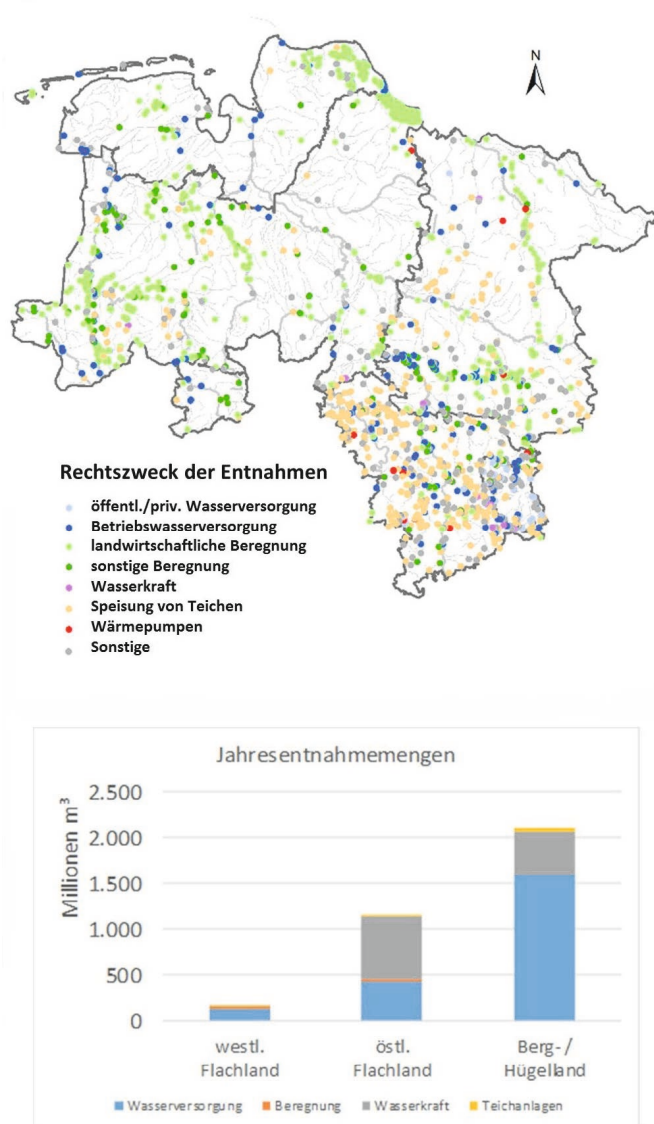
Abbildung 8-4: Maximales Volumendefizit (maxV) gemittelt über die Referenzperiode 1971-2000 (oben links) sowie die zugehörigen regionalen Änderungssignale, differenziert nach Klimaszenario, naher (Z2) und ferner (Z3) Zukunft sowie dem jeweiligen Impaktmodell

gesamt ist vor allem das westliche Flachland zukünftig von den größten Volumendefiziten im Niedrigwasserfall betroffen.

Wie in Kapitel 8.1 beschrieben wurde, spielen in Bezug auf die Bedeutung von zukünftigen Niedrigwasserverhältnissen nicht nur die Veränderungen der Abflüsse selbst eine Rolle, sondern ebenso das räumliche Vorkommen sowie die Ausprägung von Sensitivitätsfaktoren, also von durch die Veränderung betroffenen Systemelementen. Diese werden hier anhand des anthropogenen Wasserbedarfs (über die Wasserentnahmemengen) sowie die Wasserqualität (über die anthropogenen Abwassereinleitungen) repräsentiert.

Die Entnahmemengen nach dem Wasserbuch Niedersachsen, welches über Nutzungsstandorte, den rechtlichen Nutzungszweck sowie damit verbundene zulässige Entnahmemengen Auskunft gibt, sind in Abbildung 8-5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im westlichen Flachland überwiegend Entnahmestellen zum Zwecke der Beregnung vorhanden sind. Zusätzlich gibt es noch Bereiche mit Entnahmen zur Wasserversorgung und für Teichanlagen. Insgesamt sind die erlaubten Entnahmemengen in dieser Region, bezogen auf die genannten Nutzungen, verhältnismäßig gering. Die Entnahmemengen im östlichen Flachland sind demgegenüber etwa 7mal so hoch. Hierbei spielen vor allem die Wasserkraftnutzung sowie die Wasserversorgung eine wesentliche Rolle. Zahlenmäßig weist diese Region etwa nur 1/6 der Entnahmestellen für die (landwirtschaftliche) Beregnung auf, allerdings sind die entsprechenden Entnahmemengen in der Summe fast genauso groß wie im westlichen Flachland. Das Berg- und Hügelland weist insgesamt die größten zulässigen Entnahmemengen auf. Verantwortlich dafür sind vor allem die Wasserversorgung sowie die Energiegewinnung aus Wasserkraft. Zahlenmäßig gibt es in dieser Region die meisten Entnahmestellen für die Speisung von Teichen, die aber von den Wassermengen zusammen mit der Beregnung nur einen kleinen Anteil an der Gesamtmenge ausmachen. Eine genauere Beurteilung der möglichen Betroffenheit der genannten Nutzungen im Zuge sich verschärfender Niedrigwasserverhältnisse ist an dieser Stelle zunächst nicht möglich. Grundsätzlich käme es bei zunehmendem Wassermangel im Bereich der Wasserversorgung vor allem zu Produktionseinbußen (industrielles Brauchwasser) sowie Einschränkungen in der Versorgungssicherheit (Trinkwasser). Im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Beregnung und der Wasserkraftnutzung kann es ebenfalls zu Produktionseinbußen kommen. Ähnliches gilt auch für die Speisung von Teichen (z.B. Fischzucht), wobei hier auch ökologische Folgen zu beklagen wären (z.B. Biotope).

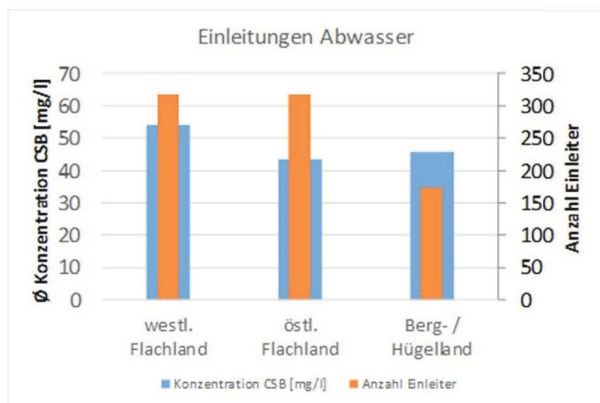
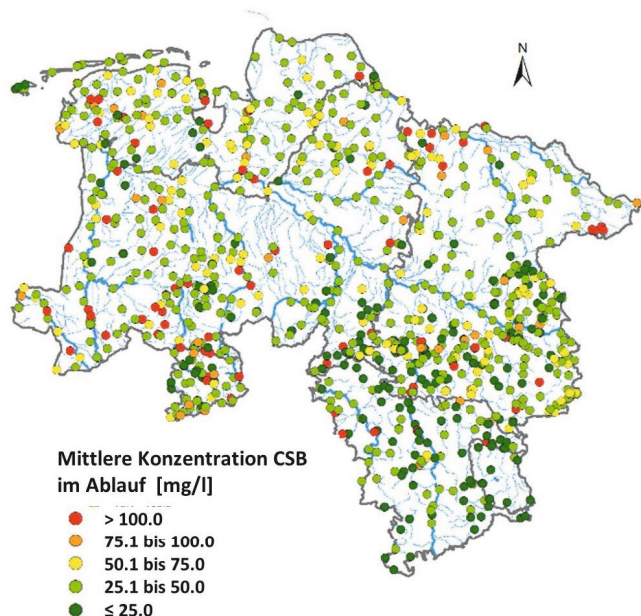
Die Informationen aus der Landesdatenbank des NL-WKN zur Einleiter-Überwachung geben u.a. Auskunft über die Frachten und Konzentrationen verschiedener Stoffgruppen im Ablauf von Kläranlagen bzw. in industriellen Betriebsabwässern oder Kühlwasser. Als Summenparameter für die allgemeine Belastung der Abwässer mit Schadstoffen wird an dieser Stelle der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) herangezogen. Für eine vollständige Beurteilung der stofflichen Belastung wären je Einleitungsstelle noch die jeweiligen Abflussmengen



**Abbildung 8-5: Übersicht über den Rechtszweck der Entnahmen (oben) sowie die zulässigen jährlichen Entnahmemengen (unten) aus oberirdischen Gewässern nach Wasserbuch Niedersachsen**

standortspezifisch notwendig, um die entsprechende Stofffracht zu ermitteln. Da jedoch an dieser Stelle keine gewässerbezogenen Betrachtungen vorgesehen sind, erfolgt eine erste Einschätzung der stofflichen Belastungen über die (regionalen) CSB-Konzentrationen in mg/l. In Abbildung 8-6 sind die Einleitungsstellen von kommunalen und industriellen Abwässern mit den jeweiligen durchschnittlichen CSB-Konzentrationen aus Messungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das westliche Flachland nicht nur die höchsten durchschnittlichen Konzentrationen CSB je Einleitungsstelle aufweist, sondern dass in dieser Region, zusammen mit dem östlichen Flachland, auch die meisten Einleiter zu finden sind. Daher kann die Sensitivität gegenüber sich verschärfender Niedrigwassersituationen hier als eher hoch angesehen werden. Die Konzentrationen je Einleitungsstelle im östlichen Flachland sind dagegen etwas geringer, bei ungefähr gleicher Anzahl von Einleitungsstellen. Daher wäre hier eine etwas geringere Sensitivität anzunehmen. Im Berg- und Hügelland sind die Konzentrationen etwa gleich groß wie im östlichen Flachland, wobei die Anzahl

der Einleiter deutlich geringer ist. Daher kann in dieser Region tendenziell von einer mittleren bis geringen Sensitivität ausgegangen werden. Es soll jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass für eine endgültige Beurteilung der Sensitivitäten in diesem Zusammenhang weitere Faktoren zu berücksichtigen wären, wie etwa die CSB-Frachten (kg/d), die Anzahl bzw. Größe der betroffenen Fließgewässer sowie die Empfindlichkeit der betroffenen Ökosysteme.



**Abbildung 8-6: Übersicht über die mittlere Konzentration des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Abwasser von Einleitungsstellen nach Daten der Einleiterüberwachung des NLWKN**

#### 8.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Zuge der Betrachtungen der zukünftig veränderten Niedrigwasserverhältnisse kann zunächst festgestellt werden, dass sich etwa bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts die aktuelle Situation in den Regionen kaum verändern bzw. regional sogar entspannen wird. Erst in der zweiten Hälfte bzw. gegen Ende des 21. Jahrhunderts kann es je nach Klimaszenario und Region zu Verschärfungen kommen.

Davon fast gleichermaßen betroffen wären vor allem die beiden Regionen der Flachländer. Im westlichen Flachland wären zukünftig die geringsten Abflussmengen bei Niedrigwasser vorzufinden. Gleichzeitig wäre das maximale Defizit an Wasservolumen im Niedrigwasserfall am größten. Davon betroffen wären vor allem die zahlenmäßig am meisten vorkommenden Entnahmen für Beregnungszwecke sowie die Wasserversorgung aufgrund der größten Entnahmemengen. Unter Berücksichtigung der regional größten durchschnittlichen Abwasserbelastungen ist die Bedeutung der zukünftig möglichen Veränderungen in dieser Region als tendenziell eher hoch anzusehen.

Die Region des östlichen Flachlandes wäre zukünftig ebenfalls von relativ geringen Abflussmengen bei Niedrigwasser betroffen, vor allem aber von den längsten Phasen mit Niedrigwasserabfluss. Hiervon betroffen wären, ähnlich wie im westlichen Flachland, zum einen die Entnahmen zum Zwecke der Beregnung aufgrund der großen Anzahl. Zum anderen aber auch die Wasserversorger sowie die Wasserkraft, da beide Nutzungen hier die größten Entnahmemengen aufweisen. Die Anzahl der Einleiterstellen ist hier ähnlich hoch wie im westlichen Flachland, jedoch weisen diese im Durchschnitt eine geringere Belastung im Abwasser auf. Daher besitzen die aufgezeigten Veränderungen in dieser Region tendenziell eine mittlere bis hohe Bedeutung.

Der Bereich des Berg- und Hügellandes weist grundsätzlich eine eher geringere Betroffenheit in Bezug auf Niedrigwasser auf. Dies gilt sowohl für die einzelnen betrachteten Kenngrößen, als auch für die Gegenwart und die Zukunft. In dieser Region sind insgesamt die größten Entnahmemengen zu finden, bedingt vor allem durch die Wasserversorger. Die Entnahmen für Teiche spielen zwar in der Gesamtsumme eine untergeordnete Rolle, jedoch zeigt sich hier die größte Anzahl an entsprechenden Entnahmestellen. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Belastung des Abwassers, die ähnlich ausfällt wie im östlichen Flachland, bei einer gleichzeitig kleineren Anzahl von Einleiterstellen, kann die Bedeutung der Veränderungen in dieser Region als mittel bis gering angesehen werden.

Abschließend soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die Abschätzung der regionalen Bedeutung der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse relativ pauschal und qualitativ erfolgte. Für eine tiefergehende Beurteilung sollten weitere Faktoren der Sensitivität potenziell betroffener Systeme herangezogen werden. Im Hinblick auf Ökosysteme erscheint diese Bewertung jedoch äußerst komplex, da eine Vielzahl von Komponenten und Wechselwirkungen hierbei eine Rolle spielen. Auch sind die räumlichen Muster der Veränderungen innerhalb der Regionen teilweise sehr heterogen. Daher können hier nur allgemeine, regional zusammengefasste Aussagen gemacht werden, die sich bei genauerer Betrachtung auf lokaler Ebene durchaus davon unterscheiden können.



## 9 Ausblick

Im Rahmen von KliBiW 5 konnten die in vorherigen Projektphasen gewonnenen Methoden und Erkenntnisse im Bereich Klimawandelfolgen für Niedrigwasser gefestigt und fortgeschrieben werden. Neben der Erweiterung des Untersuchungsgebietes wurden auch das Klimamodellensemble vergrößert und die Impaktmodelle weiterentwickelt. Die Projektergebnisse bieten eine wichtige Grundlage zur Entwicklung von Niedrigwasser-Managementstrategien, die zur Anpassung an zukünftige Herausforderungen erforderlich sind. Sinnvolle Handlungsoptionen sind etwa die Einrichtung einer Niedrigwasservorhersage und der Aufbau eines gezielten Niedrigwasser-Monitorings zur Verbesserung der Datenbasis. Weiterhin können die Projektergebnisse als Grundlage zur Berücksichtigung des Klimawandels in der WRRL und bei wasserwirtschaftlichen Planungen dienen.

Niedrigwasser ist ein Phänomen, das stark durch anthropogene Einflüsse, wie Entnahmen oder Einleitungen, geprägt ist. Dies stellt die Niedrigwassersimulation vor eine besondere Herausforderung, denn alle Eingriffe müssen im hydrologischen Modell genau abgebildet werden. Für eine weitergehende Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwassersituation ist es daher notwendig, die Modelle weiterzuentwickeln, um bspw. die landwirtschaftliche Bewässerung oder Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktionen besser abbilden zu können. Auch eine Betrachtung zukünftiger sozioökonomischer Szenarien erscheint sinnvoll.

Die Ergebnisse von KliBiW 5 haben gezeigt, dass die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklung der Niedrigwassersituation groß ist. In Zukunft kann es zu häufigeren und extremeren Niedrigwasserereignissen kommen, weshalb eine Weiterverfolgung des Themas wichtig ist. Es darf jedoch nicht allein die quantitative Untersuchung der Abflüsse im Fokus stehen. Auch die daraus entstehenden Konsequenzen für Gewässergüte und -ökologie müssen analysiert und bewertet werden.

Nicht zuletzt ist darauf hinzuweisen, dass das Angebot an Klimamodelldaten fortlaufend aktualisiert wird. Mit jedem IPCC-Report werden neue Klimaszenarien veröffentlicht und auf deren Basis neue Klimamodelle entwickelt, die die zwischenzeitlich neu gewonnenen Erkenntnisse der Klimaforschung über die komplexen Zusammenhänge im Klimasystem beinhalten. Daneben werden von Zeit zu Zeit Modelle, die sich als fehlerhaft erwiesen haben, zurückgezogen. Um diesen Entwicklungen gerecht zu werden, müssen die neuen Klimamodelldaten kontinuierlich aufbereitet und im Hinblick auf wasserwirtschaftliche Fragestellungen bewertet werden. Eine regelmäßige Aktualisierung bzw. Fortschreibung der Ergebnisse des KliBiW-Projektes ist daher zu empfehlen.

## 10 Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 2-1: Beteiligte Projektpartner mit Arbeitsschwerpunkten.....   | 9  |
| Abbildung 2-2: Arbeitsschritte der durchgeführten Analysen.....  | 10 |
| Abbildung 2-3: Untersuchungsgebiet.....  | 10 |
| Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der untersuchten Niedrigwasserindizes.....   | 11 |
| Abbildung 3-1: Lage der verfügbaren Niederschlags- und Klimastationen.....   | 12 |
| Abbildung 3-2: Mittel der interpolierten Klimavariablen für den Zeitraum 1951 bis 2015.....  | 14 |
| Abbildung 3-3: Bei der Trendanalyse untersuchte Niederschlags- und Klimastationen.....   | 15 |
| Abbildung 3-4: Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur von 1960 bis 2017, gemittelt über alle verfügbaren Klimastationen mit Aufzeichnungen über den Gesamtzeitraum. Der Bruchpunkt im Jahr 1988 ist durch eine vertikale Linie gekennzeichnet. Vor und nach dem Bruchpunkt sind die linearen Trends als rote Linien eingezeichnet.....   | 16 |
| Abbildung 3-5: Trends der mittleren Temperatur ( $T_{av}$ ); kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant.....   | 17 |
| Abbildung 3-6: Trends des mittleren Niederschlags ( $P_{sum}$ ) und der maximalen Anzahl aufeinander folgender Trockentage ( $P_{xcd}$ ) für den Zeitraum 1960-2017; kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant; graue Färbung: Trend gleich null.....   | 18 |
| Abbildung 3-7: Verfügbare Niederschlagsstationen.....  | 19 |
| Abbildung 3-8: KOSTRA-2010R-Bemessungswerte für die Dauerstufe 60 min und die Jährlichkeit 10 a in Niedersachsen, mit Lage der DIGI-Stationen (schwarze Punkte).....   | 19 |
| Abbildung 3-9: loglinearer Ausgleich des L-Moments erster Ordnung über die Dauer.....  | 21 |
| Abbildung 3-10: Lageparameter $x$ der regionalen GEV über die Dauerstufen.....   | 21 |
| Abbildung 3-11: Skalenparameter $a$ der regionalen GEV über die Dauerstufen.....   | 21 |
| Abbildung 3-12: Formparameter $k$ der regionalen GEV über die Dauerstufen.....   | 21 |
| Abbildung 3-13: Interpolierter Index $mHNa, 1h$ .....  | 22 |
| Abbildung 3-14: Regionalisierter Starkregen der Dauerstufe 1 h für die Jährlichkeit 10 a.....  | 23 |
| Abbildung 3-15: Abweichungen der regionalen Starkregenstatistik von der lokalen Starkregenstatistik für das Index-Verfahren sowie KOSTRA-Bemessungsniederschläge.....  | 23 |
| Abbildung 4-1: Bei der Trendanalyse untersuchte Abflusspegel.....  | 23 |
| Abbildung 4-2: Entwicklung des NM7Q von 1960 bis 2017, gemittelt über alle verfügbaren Pegel im Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet. Der Bruchpunkt im Jahr 1988 ist durch eine vertikale Linie gekennzeichnet. Vor und nach dem Bruchpunkt sind die linearen Trends als rote Linien eingezeichnet.....   | 25 |
| Abbildung 4-3: Trends der mittleren Tagesabflüsse (MQ); kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant.....  | 26 |
| Abbildung 4-4: Trends des niedrigsten 7-tägigen Abflussmittels (NM7Q); kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant.....   | 27 |
| Abbildung 4-5: Trends der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit $Q < 20\%$ -Langzeitquantil des Abflusses ( $maxD$ ); kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant.....   | 28 |
| Abbildung 4-6: Trends des maximalen akkumulierten Defizitvolumens zwischen $Q$ und dem $20\%$ -Langzeitquantil des Abflusses ( $maxV$ ); kräftiger Farbton: Trend statistisch signifikant, blasser Farbton: Trend statistisch nicht signifikant.....   | 29 |
| Abbildung 5-1: Modellkette der regionalen Klimamodellierung (ergänzt nach Klimanavigator, 2017).....   | 30 |
| Abbildung 5-2: Die Szenarien der THG-Entwicklung im Vergleich (Hamburger Bildungsserver, 2017).....  | 32 |
| Abbildung 5-3: Änderungssignale im NM7Q für den Z3-Zeitraum in Niedersachsen geschätzt mit den 10 WETTREG2010-Realisationen anhand eines statistischen Prognosemodells.....  | 33 |
| Abbildung 5-4: Lage der Stationen mit Zeitreihendaten des Niederschlags (RR) bzw. verschiedener Klimagrößen (KL) vor der Regionalisierung (oben: WETTREG2006, unten: WETTREG2010).....   | 34 |
| Abbildung 5-5: Lage der Gitterpunkte der regionalen dynamischen Klimamodelle (oben links: ECHAM5/REMO auf rotiertem $10 \times 10$ km Raster, oben rechts: ECHAM5/CLM auf nicht-rotiertem $18 \times 18$ km Raster, unten links: EURO-CORDEX Modellläufe auf rotiertem $12,5 \times 12,5$ km Raster, unten rechts: Lage der Gitterpunkte aller Modellläufe nach der Interpolation auf $10 \times 10$ km Raster)..... | 36 |
| Abbildung 5-6: Plausibilisierung der interpolierten Klimamodelldaten am Beispiel der Modellkette ECHAM5-Lauf1_CLM (SRES); alle Klimagrößen gemittelt über den Zeitraum 1971-2000.....  | 37 |
| Abbildung 5-7: Abweichungen zwischen den betrachteten Klimamodelldaten des RCP8.5-Ensembles und der Beobachtung für die Jahresmitteltemperatur auf Basis der Gebietsmittel der sieben Einzugsgebiete.....  | 39 |
| Abbildung 5-8: Abweichungen zwischen den betrachteten Klimamodelldaten des RCP8.5-Ensembles und der Beobachtung für die mittlere Jahresniederschlagssumme auf Basis der Gebietsmittel der sieben Einzugsgebiete.....   | 39 |

|  |    |  |    |
|--|----|--|----|
| Abbildung 5-9: Abweichungen zwischen den betrachteten Klimamodelldaten des RCP8.5-Ensembles und der Beobachtung für die maximale Anzahl der aufeinanderfolgender Trockentage im Gesamtjahr auf Basis der Gebietsmittel der sieben Einzugsgebiete.....  | 40 | Abbildung 6-7: Projizierte Änderung der mittleren Niederschlagsdauer in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.....  | 51 |
| Abbildung 5-10: Abweichungen zwischen den betrachteten Klimamodelldaten des RCP8.5-Ensembles und der Beobachtung für die Anzahl der Trockentage im Gesamtjahr auf Basis der Gebietsmittel der sieben Einzugsgebiete.....   | 40 | Abbildung 6-8: Projizierte Änderung der maximalen Niederschlagsdauer in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.....  | 52 |
| Abbildung 5-11: Abweichung der Klimamodelldaten (RCP8.5-Modelle) gegenüber der Beobachtung für die vier Klimagrößen Tagesmitteltemperatur (Tav), mittlere Niederschlagssumme (Psum), maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Pxcd) und Anzahl der Trockentage (Pndd), jeweils für das Gesamtjahr, basierend auf den Gebietsmittelzeitreihen der sieben betrachteten Einzugsgebiete, gemittelt über den Zeitraum 1971-2000; links: ohne BIAS-Adjustierung, rechts: mit BIAS-Adjustierung (Linear Scaling).....  | 42 | Abbildung 6-9: Projizierte Änderung der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.....   | 53 |
| Abbildung 6-1: Entscheidungsbaum für Signifikanztests zur Identifikation der Robustheit von Klimasignalen (NLWKN, 2017).....   | 43 | Abbildung 6-10: Projizierte Änderung der Anzahl der Trockentage in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.....   | 54 |
| Abbildung 6-2: Schema zur Klassifizierung der Robustheit von Klimaänderungssignalen (NLWKN, 2017).....   | 43 | Abbildung 6-11: Projizierte Änderungssignale von trockenwetterspezifischen Niederschlagskenngrößen, basierend auf dem SRES A1B-Klimamodellensemble (oben) und dem RCP8.5-Szenario (unten) in Z2 (2021-2050) gegenüber 20C (1971-2000).....   | 56 |
| Abbildung 6-3: Projizierte Änderung der mittleren Temperatur in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100) gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5. Als Vergleichswert ist die mittlere beobachtete Temperatur im 20C-Zeitraum angegeben.....  | 46 | Abbildung 6-12: Projizierte Änderungssignale von trockenwetterspezifischen Niederschlagskenngrößen, basierend auf dem SRES A1B-Klimamodellensemble (oben) und dem RCP8.5-Szenario (unten) in Z3 (2071-2100) gegenüber 20C (1971-2000).....   | 57 |
| Abbildung 6-4: Projizierte Änderung der maximalen Hitzewellendauer in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100) gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5. Als Vergleichswert ist die maximale Hitzewellendauer im 20C-Zeitraum angegeben.....  | 47 | Abbildung 6-13: Abweichungen der regionalen Starkregenstatistik zwischen Beobachtung und Klimamodelldaten für ausgewählte Dauerstufen und die Jährlichkeit 10 a.....   | 58 |
| Abbildung 6-5: Projizierte Änderungssignale von trockenwetterspezifischen Temperaturkenngrößen in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) sowie in der fernen Zukunft Z3 (2071-2100), jeweils gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000) ; oben links: Änderung in Z2 gegenüber 20C, basierend auf dem SRES A1B-Klimamodellensemble; oben rechts: Änderung in Z2 gegenüber 20C, basierend auf dem RCP8.5-Klimamodellensemble; unten links: Änderung in Z3 gegenüber 20C, basierend auf dem SRES A1B-Klimamodellensemble; unten rechts: Änderung in Z3 gegenüber 20C, basierend auf dem RCP8.5-Klimamodellensemble..... | 48 | Abbildung 6-14: Abweichungen der regionalen Starkregenstatistik zwischen Beobachtung und Klimamodelldaten für ausgewählte Dauerstufen und die Jährlichkeit 100 a.....  | 58 |
| Abbildung 6-6: Projizierte Änderung der mittleren Niederschlagssumme in der nahen Zukunft Z2 (2021-2050) und in der fernen Zukunft Z3 gegenüber der Referenzperiode 20C (1971-2000), basierend auf den Szenarien SRES A1B und RCP8.5.....  | 50 | Abbildung 7-1: Verfügbare Pegel zur Kalibrierung der statistischen Modelle.....  | 59 |
|  |    | Abbildung 7-2: Schema zur Berechnung der jährlichen Indexzeitreihen und zur Länge und zeitlichen Verschiebung bei der Berechnung der meteorologischen Indizes.....   | 60 |
|  |    | Abbildung 7-3: Homogene Regionen für die Anpassung regionaler Modelle für verschiedene Indizes.....  | 61 |
|  |    | Abbildung 7-4: Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse in Form des Bestimmtheitsmaßes (oben) und des mittleren absoluten Fehlers (unten) für Stations- (grün) und regionale Modelle (blau) des NM7Q.....   | 62 |
|  |    | Abbildung 7-5: Mittlere Abweichung der mithilfe der Klimamodellensembles geschätzten Niedrigwasserindizes von der Beobachtung (Z1-obs) und von der mit beobachteten Klimadaten geschätzten Indizes (Z1-sim) im Referenzzeitraum; dargestellt sind die Ensemblemediane für alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (oben) und das A1B-Szenario (unten)..... | 62 |



|  |    |
|--|----|
| Abbildung 7-6: Änderungssignale der mittleren Niedrigwasserindizes für die nahe (Z2-Z1) und die ferne Zukunft (Z3-Z1); dargestellt sind die Ensemblemediane für alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (oben) und das A1B-Szenario (unten).....   | 63 |
| Abbildung 7-7: Räumliche Verteilung der Änderungssignale im mittleren maxV als Ensemblemediane des RCP8.5-Szenarios in der nahen (oben) und fernen Zukunft (unten).....  | 63 |
| Abbildung 7-8: Änderungssignale im mittleren NM7Q für die nahe (links) und die ferne Zukunft (rechts) über alle verfügbaren Stationen und die einzelnen Modellketten im RCP8.5- (oben) und A1B-Szenario (unten).....   | 64 |
| Abbildung 7-9: Schematische Darstellung der Überlagerung von Teileinzugsgebiets-, Landnutzungs- und Bodenkarte zur Erstellung einer Hydrotopkarte am Beispiel des Pegeleinzugsgebiets Lauenbrück B75.....  | 65 |
| Abbildung 7-10: Schematische Darstellung der hydrologischen Prozesse in PANTA RHEI. Es wird zwischen vertikalen Teilprozessen (Abflussbildung) und lateralen Abflussprozessen (Abflusskonzentration und Wellenablauf) unterschieden.....   | 66 |
| Abbildung 7-11: Bodenmodell DYVESOM. A = Aufteilung Direktabfluss/Infiltration. B = Perkolations/kapillarer Aufstieg sowie laterale Abflusskomponente. C = Ausfluss aus unterstem Speicher, Grundwasserneubildung. D = Evapotranspiration mit dynamischen Anteil aus Speicher 1 und 2, abhängig vom GSI (Growing Season Index). E = mittlere Durchwurzelungstiefe, abhängig von der Landnutzung..... | 67 |
| Abbildung 7-12: Lage der Referenzpegel in den sieben untersuchten Einzugsgebieten in Niedersachsen.....  | 70 |
| Abbildung 7-13: Gegenüberstellung von beobachteten und simulierten NM7Q-Werten für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für den Pegel Rethem.....   | 71 |
| Abbildung 7-14: Gemittelte NM7Q-Werte als Abfluss-spende für Simulation und Beobachtung für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für die Referenzpegel....  | 73 |
| Abbildung 7-15: Abweichung der Mittelwerte des NM7Q des Abflusses aus den Klimamodellläufen und dem Referenzlauf für den Zeitraum 1970-2000 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für den Pegel Rethem.....   | 74 |
| Abbildung 7-16: Vergleich der langjährigen Monatsmittelwerte des Abflusses aus den Klimamodellläufen und dem Referenzlauf für den Zeitraum 1970-2000 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für den Pegel Rethem.....  | 74 |
| Abbildung 7-18: Änderungssignale für NM7Q 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.....  | 75 |
| Abbildung 7-17: Änderungssignale für NM7Q 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.....  | 75 |
| Abbildung 7-20: Änderungssignale für NM7Q für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Vechte für die 14 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.....   | 76 |
| Abbildung 7-19: Änderungssignale für NM7Q für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 14 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.....   | 76 |
| Abbildung 7-21: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für NM7Q aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.....  | 77 |
| Abbildung 7-22: Änderungssignale für die gemittelten NM7Q-Werte 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 1970-2000.....   | 78 |
| Abbildung 7-23: Verschiebung des mittleren Auftretenszeitpunktes für NM7Q 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 1970-2000. Ein positiver Wert bedeutet ein späteres Auftreten, ein negativer Wert ein früheres Auftreten.....                  | 78 |
| Abbildung 7-24: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes des NM7Q für die einzelnen Mitglieder des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1970-2100 (Mittelwert 1970-2000 entspricht 100%) für den Pegel Rethem. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an.....  | 79 |
| Abbildung 7-25: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für NM7Q10 aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.....  | 79 |
| Abbildung 7-27: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für maxD aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.....  | 80 |
| Abbildung 7-26: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für sumD aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.....  | 80 |
| Abbildung 7-28: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für sumV aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.....  | 81 |

|  |    |  |    |
|--|----|--|----|
| Abbildung 7-29: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für maxV aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles (oben) und den 14 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1970-2000.....  | 81 | Abbildung 8-2: Mittlere Abflussspenden für das NM7Q10 innerhalb der Referenzperiode 1971-2000 (oben links) sowie die zugehörigen regionalen Änderungssignale, differenziert nach Klimaszenario, naher (Z2) und ferner (Z3) Zukunft sowie dem jeweiligen Impactmodell.....  | 88 |
| Abbildung 7-30: Prozentuale Änderungssignale für die Parameter NM7Q, NM7Q10, maxD, MaxV, sumD und sumV für die nahe (Z2) und die ferne (Z3) Zukunft. Die Werte entsprechen den Medianen aller Referenzpegel. Die Werte für die einzelnen Referenzpegel sind die Mediane aller Modellketten für das jeweilige THG-Szenario (SRES A1B und RCP8.5). Blaue Balken indizieren ein Änderungssignal, welches einer Entschärfung der Niedrigwasserphasen entspricht, rot bedeutet eine Verschärfung des jeweiligen Parameters..... | 82 | Abbildung 8-3: Maximale Niedrigwasserdauer (maxD) gemittelt über die Referenzperiode 1971-2000 (oben links) sowie die zugehörigen regionalen Änderungssignale, differenziert nach Klimaszenario, naher (Z2) und ferner (Z3) Zukunft sowie dem jeweiligen Impactmodell..... | 89 |
| Abbildung 7-31: Topografisch-klimatologische Regionen und Lage der verfügbaren Stationen für die Ergebniszusammenführung des hydrologischen und statistischen Modells.....   | 83 | Abbildung 8-4: Maximales Volumendefizit (maxV) gemittelt über die Referenzperiode 1971-2000 (oben links) sowie die zugehörigen regionalen Änderungssignale, differenziert nach Klimaszenario, naher (Z2) und ferner (Z3) Zukunft sowie dem jeweiligen Impactmodell.....    | 90 |
| Abbildung 7-34: Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das NM7Q10 im östlichen Flachland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3).....   | 84 | Abbildung 8-5: Übersicht über den Rechtszweck der Entnahmen (oben) sowie die zulässigen jährlichen Entnahmemengen (unten) aus oberirdischen Gewässern nach Wasserbuch Niedersachsen.....   | 91 |
| Abbildung 7-32: Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das NM7Q10 im westlichen Flachland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3).....  | 84 | Abbildung 8-6: Übersicht über die mittlere Konzentration des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Abwasser von Einleitungsstellen nach Daten der Einleiterüberwachung des NLWKN.....  | 92 |
| Abbildung 7-35: Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das mittlere maxD im östlichen Flachland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3).....  | 84 |  |    |
| Abbildung 7-33: Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das mittlere maxV im westlichen Flachland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3).....   | 84 |  |    |
| Abbildung 7-36: Änderungssignale des hydrologischen und des statistischen Wirkmodells für das NM7Q10 im Berg- und Hügelland; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3).....   | 85 |  |    |
| Abbildung 7-37: Änderungssignale des statistischen Wirkmodells für das NM7Q10 im Harz; dargestellt sind die Mediane über alle verfügbaren Stationen im RCP8.5- (links) und A1B-Szenario (rechts) für die nahe (Z2) und ferne Zukunft (Z3).....   | 85 |  |    |
| Abbildung 8-1: Das Vulnerabilitätskonzept des Leitfadens für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (Buth et al., 2017).....   | 86 |  |    |

## 11 Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 3-1: Bei der Trendanalyse betrachtete meteorologische Kenngrößen.....   | 15 |
| Tabelle 3-2: Korrelationskoeffizient nach Pearson zwischen den Mittelwerten der jährlichen Serien (mHNa,D) der Dauerstufen D und den mittleren jährlichen Niederschlägen (N).....   | 20 |
| Tabelle 3-3: normierter Starkregen [-] in Abhängigkeit der Dauerstufe D und der Jährlichkeit T.....   | 22 |
| Tabelle 3-4: Vergleich Index-Verfahren und KOSTRA ...   | 23 |
| Tabelle 4-1: Bei der Trendanalyse untersuchte Niedrigwasserindizes.....   | 24 |
| Tabelle 5-1: Übersicht über die in KliBiW 5 verwendeten Klimamodelldaten.....   | 31 |
| Tabelle 5-2: Ausgewählte WETTREG-Realisationen .....  | 33 |
| Tabelle 5-3: 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).....  | 35 |
| Tabelle 5-4: Betrachtete Klima-Kenngrößen bei der Validierung der Klimamodelldaten.....   | 38 |
| Tabelle 6-1: Untersuchte Trockenwetterindizes in der Klimasignalanalyse.....  | 44 |
| Tabelle 7-1: Liste der verwendeten meteorologischen Indizes .....   | 60 |
| Tabelle 7-2: Liste der verwendeten physiographischen Einzugsgebietseigenschaften.....   | 61 |
| Tabelle 7-3: Für den Modellaufbau verwendete räumliche Eingangsdaten der Gebietsanteile in Niedersachsen....  | 69 |
| Tabelle 7-4: Referenzpegel mit den Ergebnissen aus Kalibrierung und Validierung für die Modelleffizienz (E), die Modelleffizienz aus logarithmierten Zeitreihen (Elog), den Volumenfehler (VF) sowie die mittlere monatliche Abweichung (MMA) der langjährigen Monatsmittelwerte. *Flächengröße nach der Umleitung des Bornbachs..... | 72 |



## 12 Literaturverzeichnis

- Ångström, A. (1924): Solar and terrestrial radiation, *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 50, 121-125.
- Breuer, L.; Eckhardt, K.; Frede, H.-G. (2003): Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169, 2-3/2003, S. 237–293.
- Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz, „Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer“ (1997, zuletzt geändert am 22.08.2018). Online unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/abwv/AbwV.pdf> (abgerufen am 25.01.2019).
- Buth, M.; Kahlenborn, W.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Schauer, I. (2017): Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Herausgeber: Umweltbundesamt, Dessau. Online unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/uba\\_2017\\_leitfaden\\_klimawirkungs\\_und\\_vulnerabilitatsanalysen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/uba_2017_leitfaden_klimawirkungs_und_vulnerabilitatsanalysen.pdf) (abgerufen am 24.01.2019)
- Brent, R.P. (2002): Algorithms for minimization without derivatives. Dover Publications, Mineola, N.Y.
- Collins, M.; Knutti, R.; Arblaster, J.; Dufresne, J.-L.; Fitchet, T.; Friedlingstein, P.; Gao, X.; Gu-towski, W.J.; Johns, T.; Krinner, G.; Shongwe, M.; Tebaldi, M, C.; Weaver, A.J.; Wehner, M. (2013): Longterm 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.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A., Xia, Y.; Bex, V. und Midgley, P.M. (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Dobler, A.; Feldmann, H.; Ulbrich, U. (2017): Grenzen und Herausforderungen der regionalen Klimamodellierung. In: *Klimawandel in Deutschland – Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* [Brasseur G.; Jacob, D.; Schuck-Zöllner, S. (Hrsg.)]. Springer Spektrum, Heidelberg, Deutschland.
- DVWK (Hrsg.) (1983): *Niedrigwasseranalyse, Teil I: Statistische Untersuchung des Niedrigwasser-Abflusses*. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. - Regeln zur Wasserwirtschaft, 120.
- DVWK (Hrsg.) (1996): DVWK-Merkblatt 238/1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.
- DWA (Hrsg.) (2012): Arbeitsblatt DWA-A 531: Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Hennef, Deutschland.
- DWD (2018a): *Klimareport Niedersachsen*; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 52 Seiten.
- DWD (2018b): *Deutschlandwetter im Jahr 2018*. Pressemitteilung, 28.12.2018. Online unter: [https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228\\_deutschlandwetter\\_jahr2018\\_news.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228_deutschlandwetter_jahr2018_news.html) (abgerufen am 13.02.2019).
- 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, 2012, S. 15–21.
- Gelleszun, M.; Kreye, P.; Meon, G. (2017): Representative parameter estimation for hydrological models using a lexicographic calibration strategy. *Journal of Hydrology* 553, 2017, S. 722–734.
- Haberlandt, U.; van der Heijden, S.; Verworn, A.; Berndt, C.; Dietrich, J.; Wallner, M.; Krause, F. (2015): Regionalisierung von Klimabeobachtungsdaten und WETTREG-Szenarien für Niedersachsen. Hannover.
- Harzwasserwerke (2018): *Rekord-Juli bei den Harzwasserwerken*. Pressemitteilung, 03.08.2018. Online unter: <https://www.harzwasserwerke.de/infoservice/presse/pressemitteilungen/2018/rekord-juli-bei-den-harzwasserwerken/> (abgerufen am 13.02.2019)
- Hosking, J. R. M.; Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge University Press.
- IPCC (2000): *IPCC Special Report Emission Scenarios – Summary for Policy Makers*.
- IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, III and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K. und Meyer, L.A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarski, S.; Lorenz, P.; Sleck, K. (2008): *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. UBA Forschungsbericht 204 41 138, v. UBA-FB 00969, p. 1-159.
- Jacob, D.; Bülow, K.; Kotova, L.; Moseley, C.; Petersen, J.; Rechid, D. (2012): *Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung*, CSC Report 6, Climate Service Center, Germany.
- Jacob, D.; Kottmeier, C.; Petersen, J.; Rechid, D.; Teichmann, C. (2017). *Regionale Klimamodellierung*. In: *Klimawandel in Deutschland*. Hrsg. G. Brasseur et al., 2017.
- Jolly, W.M.; Nemani, R.; Running, S.W.; (2005): A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biology* 11, 4/2005, S. 619–632.
- Jury, W.A.; Horton, R. (2004): *Soil physics*. Wiley, Hoboken, NJ.
- Kendall, M.G. (1975): *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, London.
- 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 Bodenwasserhaushalts-llierung mit Nutzung von Grundwassermessungen und satellitenbasierten Bodenfeuchtedaten. Dissertation, Braunschweig.
- Kreye, P.; Meon, G. (2016): Subgrid spatial variability of soil hydraulic functions for hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 6/2016, S. 2557–2571.
- 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: HyWa* 61, 4/2017, S. 217–231.
- LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement – Materialien. Kulturbuch-Verlag, Berlin.
- Linke, C. et al (2017): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Essen, Okt. 2017.
- LWI-HYWAG und IFW (2017): PANTA RHEI Benutzerhandbuch - Programmdokumentation zur hydrologischen Modellsoftware (unveröffentlicht), Braunschweig.
- Malitz, G.; Ertel, H. (2015): KOSTRA-DWD-2010: Starkniederschlagshöhen für Deutschland. Bezugszeitraum 1951 bis 2010. DWD, Abteilung Hydrometeorologie. Offenbach.
- Maniak, U. (2005): *Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure*. Springer Verlag, Heidelberg.
- Mann, H.B. (1945): Nonparametric test against trend. *Econometrica*, Vol. 13.
- McKee, T. B.; Doesken, N. J.; Kleist, J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology. American meteorological society, Boston, USA.
- Monteith, J. L. (1965): Evaporation and Environment. In: Fogg, G. E. (Hrsg.): *The state and movement of water in living organisms*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 205–234.
- Nakicenovic, N.; Alcamo, J.; Grubler, A.; Riahi, K.; Roehrl, R. A.; Rogner, H.; Victor, N. (2000): Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10.
- Nelder, J. A.; R. Mead (1965): A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal* 7, 4/1965, S. 308–313.
- NLWKN (Hrsg.) (2012): Globaler Klimawandel - Wasserrwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland, Abschlussbericht Phasen 1+2. In: *Oberirdische Gewässer* Band 33. Norden.
- NLWKN (Hrsg.) (2015): Globaler Klimawandel - Wasserrwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland – Niedrigwasser. Abschlussbericht Phase 3. In: *Oberirdische Gewässer*, Band 36. Norden.
- NLWKN (Hrsg.) (2017): Globaler Klimawandel - Wasserrwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland – Gesamtbericht des Projektes KliBiW Themenbereich Hochwasser. In: *Oberirdische Gewässer*, Band 41. Norden.
- Penman, H. L. (1948): Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 193, 1032/1948, S. 120–145.
- Pettit, A. N. (1979): A nonparametric approach to the change point detection. *Applied Statistics* 28(2), 126-135.
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*. Offenbach am Main.
- Rockel, B.; Will A., Hense, A. (2008): The Regional 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.; Kornblueh, 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.
- Sharpley, A. N.; Williams, J. R. (1990): EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture.
- Sen, P.K. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379-1389.
- 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.
- Taylor, K. E.; Stouffer, R. J.; Meehl, G. A. (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, J. M.; Knutti, R. (2011): Mapping model agreement on future climate projections. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23701.
- Theil, H. (1950): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, I, II, III. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* 53, 386-392, 521-525, 1397-1412.
- Umweltbundesamt (2017): Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen - Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung.

van der Linden, P.; Mitchell, J. F. B. (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.

Vicente-Serrano, S. M.; Begueria, S.; Lopez-Moreno, J. I. (2010): A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23, S. 1696–1718.

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 Wasserwirtschaft, 4/2003, S. 29–32.

Wittenberg, H. (2015): Groundwater Abstraction for Irrigation and Its Impacts on Low Flows in a Watershed in Northwest Germany. *Resources* 4, 3/2015, S. 566–576.

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



## 13 Abkürzungsverzeichnis und Glossar

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

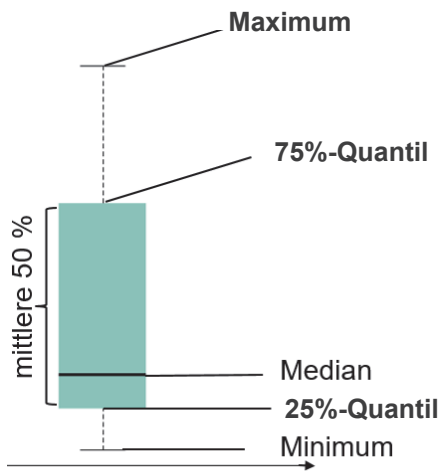
**ALO:** Aller-Leine-Oker

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

**Bias:** systematische Abweichung der Klimamodelldaten von der Beobachtung (d.h. einem Referenzdatensatz).

**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, sodass dieses die beobachtete Größe (den Referenzdatensatz) besser wiedergibt.

**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 Länge der Whisker (Linien ober- bzw. unterhalb der Box) beträgt maximal das 1,5-fache der Länge 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.



**DGM:** Digitales Geländemodell

**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 eine Auswahl von Klimaprojektionen, welche auf einem der beiden → THG-Szenarien basieren.

**EZG:** Einzugsgebiet

**HWDmax:** Maximale Hitzewellendauer (engl. maximum heat wave duration); Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit  $T_{max} >$  tagesspezifisches 90%-Quantil der Tagesmaximaltemperatur

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

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

**(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 Ergebnissen 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

**Klimaprojektion:** Siehe → (Klima)Modelllauf

**maxD:** Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit  $Q < 20\%$ -Langzeitquantil (eines Referenzzeitraumes) des Abflusses [d] (s. auch Kapitel 2.4)

**maxV:** Maximal akkumuliertes Defizitvolumen zwischen  $Q$  und dem  $20\%$ -Langzeitquantil (eines Referenzzeitraumes) des Abflusses [ $m^3$ ] (s. auch Kapitel 2.4)

**NM7Q:** Niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses über 7 aufeinanderfolgende Tage [ $m^3/s$ ] (s. auch Kapitel 2.4)

**NM7Q10:** NM7Q, das statistisch einmal in 10 Jahren zu erwarten ist (s. auch Kapitel 2.4)

**NWI:** Niedrigwasserindex

**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.

**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

**korrigierter Niederschlag:** → Richter-Korrektur

**KOSTRA-DWD:** Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD

**L-Momente:** Für die Anpassung einer Wahrscheinlichkeitsfunktion (bzw. deren Parameter) 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 Technischen Universität Braunschweig

**mHNa,D:** Mittlere Starkregenhöhe [mm] der jährlichen Serie der Dauerstufe D

**MQ:** Mittlerer Abfluss in einer bestimmten Zeitspanne [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (s. auch Kapitel 2.4)

**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.

**nHNa,D:** Normierte jährliche Serie des Niederschlags der Dauerstufe D

**NLWKN:** Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

**Pxcd:** Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Tage mit  $N < 1 \text{ mm/d}$ ) [d]

**Psum:** Summe der Niederschläge für Tage mit  $N \geq 1 \text{ mm/d}$  [mm]

**Qs:** Abflussschwellwert (s. auch Kapitel 2.4)

**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).

**sumD:** Summe aller Tage innerhalb eines Zeitraumes, an denen gilt:  $Q < 20\%$ -Langzeitquantil des Abflusses (eines Referenzzeitraumes) [d] (s. auch Kapitel 2.4)

**sumV:** Summe aller Unterschreitungs volumina innerhalb eines Zeitraumes zwischen  $Q$  und dem  $20\%$ -Langzeitquantil des Abflusses (eines Referenzzeitraumes) [ $\text{m}^3$ ] (s. auch Kapitel 2.4)

**Tav:** Tagesmitteltemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

**THG:** Treibhausgas

**TUBS:** Technische Universität Braunschweig

**unkorrigierter Niederschlag:** → Richter-Korrektur

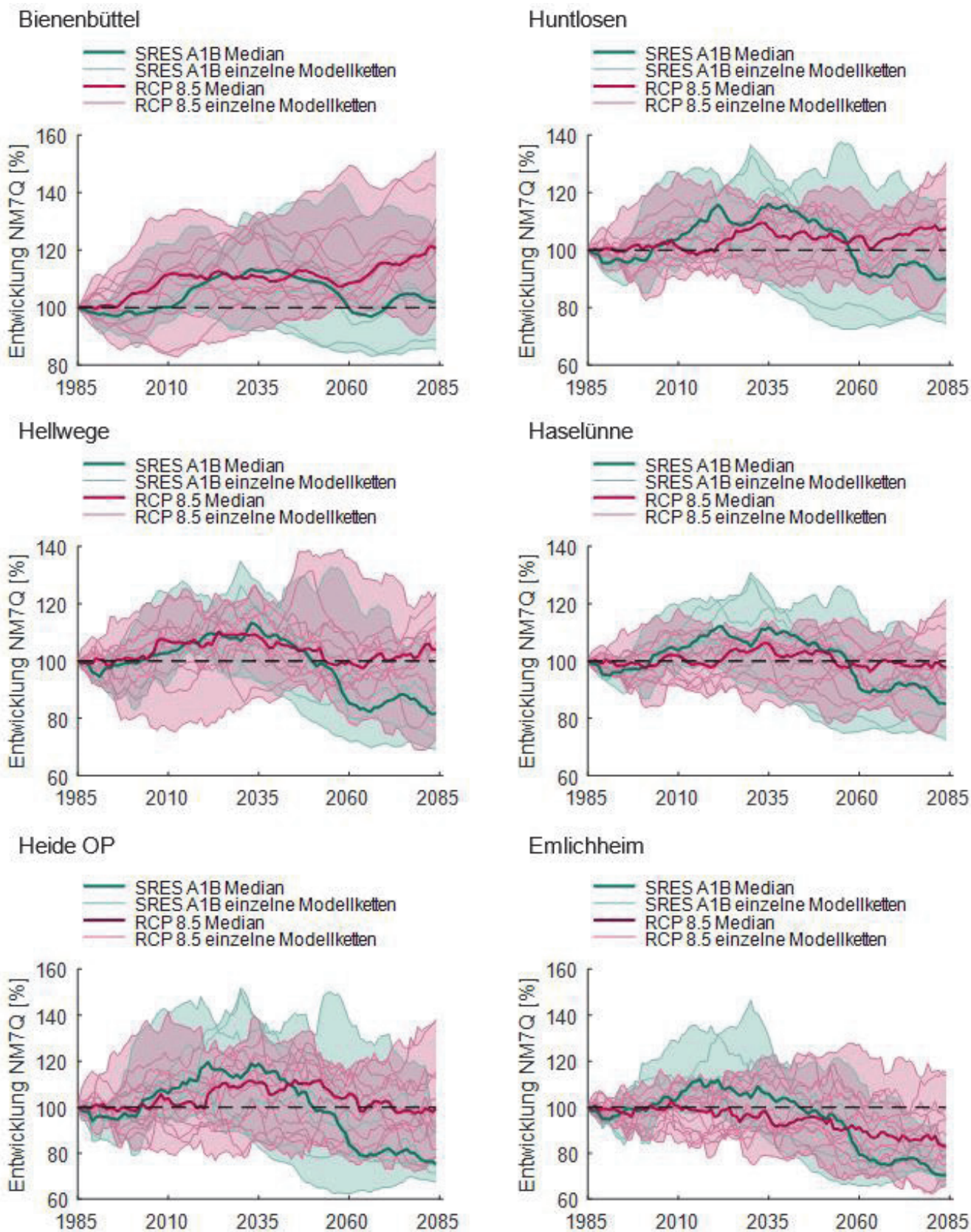
**WAWI:** Institut für Wasserwirtschaft der Leibniz Universität Hannover

**Z2:** Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050)

**Z3:** Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100)

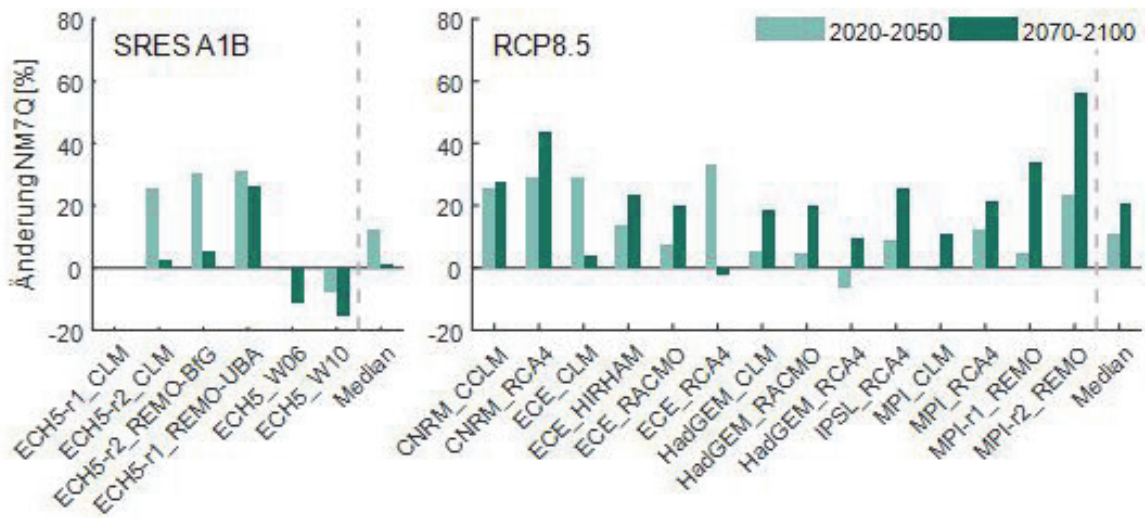
## 14 Anhang

Anhang 1: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes des NM7Q für die einzelnen Mitglieder des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1970-2100 (Mittelwert 1970-2000 entspricht 100%) für verschiedene Pegel. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an.

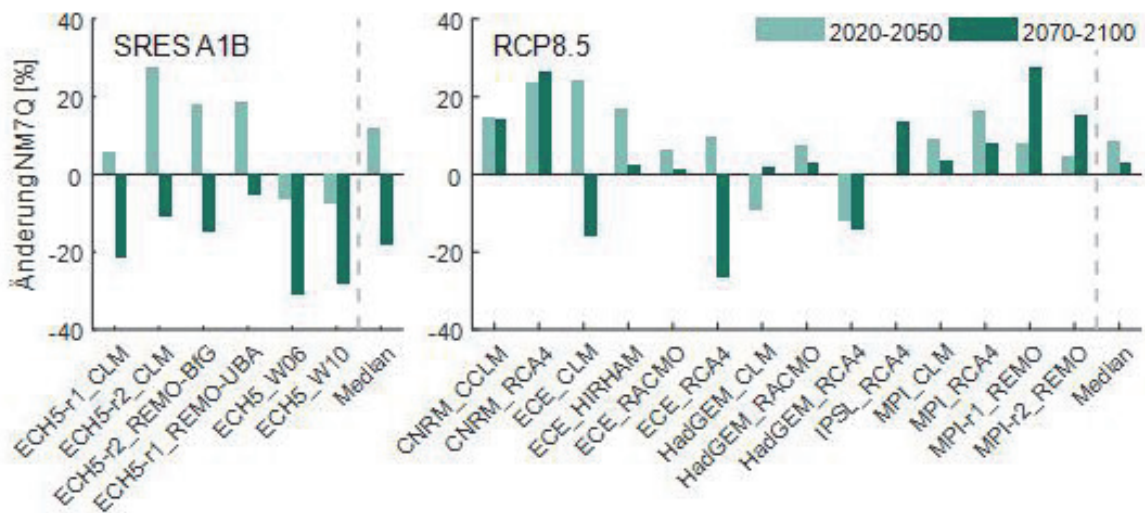




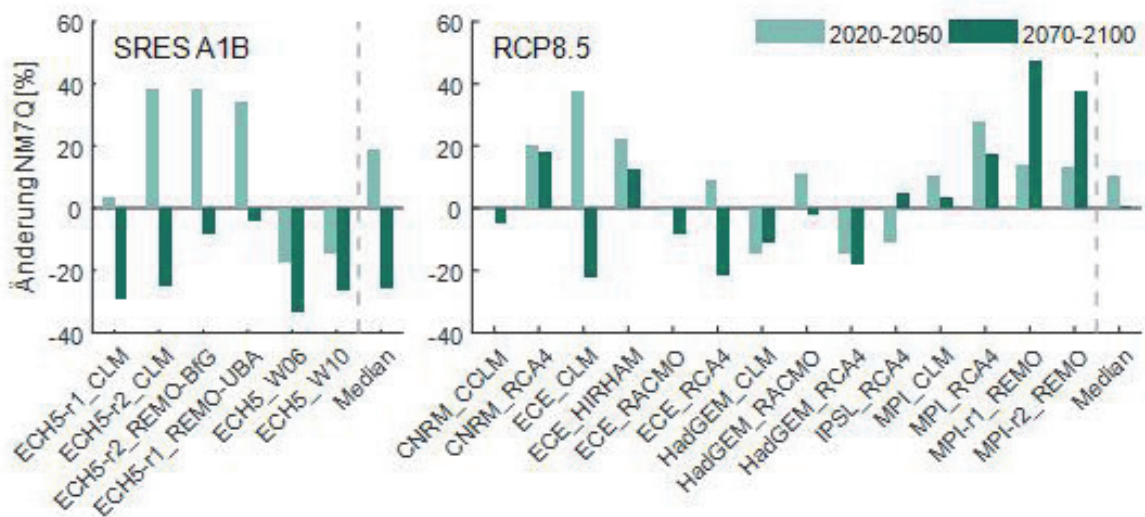
### Bienenbüttel



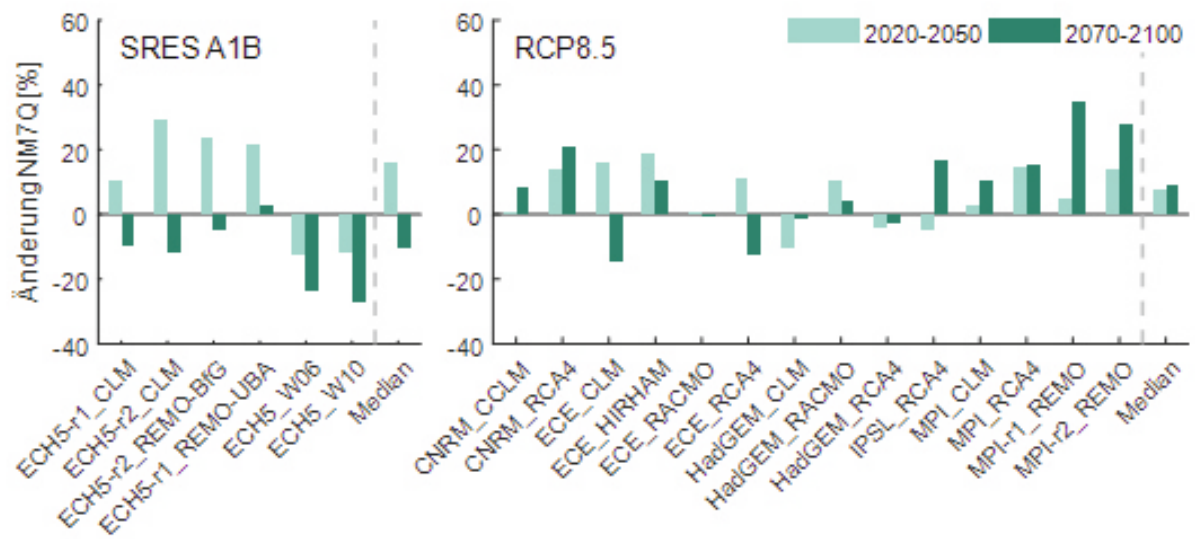
### Hellwege



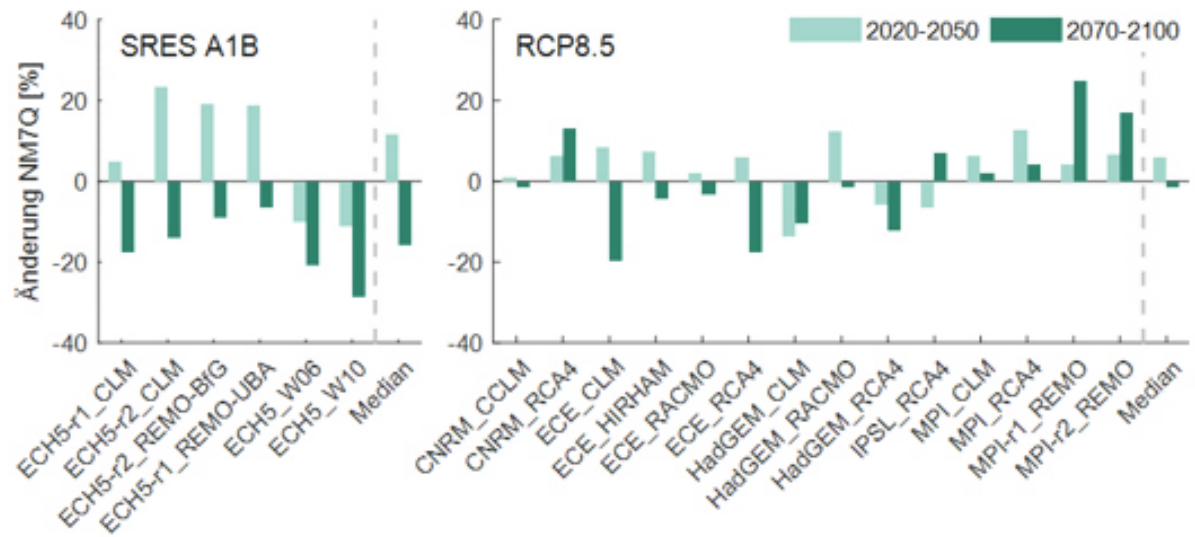
### Heide OP



Huntlosen



Haselünne



Emlichheim

