



## Globaler Klimawandel

Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung  
für das Binnenland

Niedrigwasser



**Niedersachsen**



Projektpartner



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



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

## Globaler Klimawandel

### Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland



**Abschlussbericht – Phase 3**

**Dezember 2014**



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

Der vorliegende Bericht wurde erstellt durch:

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz,  
Betriebsstelle Hannover-Hildesheim:  
Joseph Hölscher, Uwe Petry, Markus Anhalt, Sebastian Meyer

Leibniz Universität Hannover,  
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau:  
Uwe Haberlandt, Anne Fangmann, Christian Berndt, Markus Wallner

Technische Universität Braunschweig,  
Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz:  
Günter Meon, Phillip Kreye

Harzwasserwerke GmbH:  
Andreas Lange, Frank Eggelsmann

1. Auflage: Mai 2015, 150 Stück

Bezug:  
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,  
Küsten- und Naturschutz  
An der Scharlake 39  
31135 Hildesheim  
[www.nlwkn.niedersachsen.de](http://www.nlwkn.niedersachsen.de)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Aktuelle Klimaforschung.....	2
1.3	Erkenntnisse aus anderen Klimaprojekten.....	4
<b>2</b>	<b>Projektgrundlagen .....</b>	<b>6</b>
2.1	Zielsetzungen von KliBiW.....	6
2.2	Organisation .....	7
2.3	Methodik .....	7
2.4	Untersuchungsgebiet .....	9
2.5	Datengrundlage .....	9
<b>3</b>	<b>Bewertung der regionalen Klimaentwicklung .....</b>	<b>11</b>
3.1	Aufbereitung von Klima(modell)daten .....	11
3.1.1	Regionalisierung der Beobachtungsdaten .....	11
3.1.2	Regionalisierung der Klimamodelldaten.....	12
3.1.3	Auswahl von WETTREG-Realisationen.....	13
3.2	Analyse der Beobachtungsdaten .....	15
3.2.1	Datenbasis .....	15
3.2.2	Methodik.....	15
3.2.3	Ergebnisse .....	16
3.2.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	18
3.3	Das Modell-Ensemble von KliBiW 3.....	19
3.3.1	Festlegung der Ensemble-Mitglieder .....	19
3.3.2	Stellung des KliBiW-Ensembles innerhalb der Bandbreite heutiger Klimaprojektionen .....	21
3.4	Bewertung der Klimamodelldaten .....	24
3.4.1	Bewertung auf Einzugsgebietsebene.....	24
3.4.2	Bewertung für Niedersachsen.....	26
3.5	Analyse der Klimamodellsignale .....	30
<b>4</b>	<b>Das Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI .....</b>	<b>34</b>
4.1	Allgemeine Beschreibung.....	34
4.2	Modellerstellung .....	34
4.3	Modellerweiterungen.....	35
4.4	Kalibrierung und Validierung .....	37
4.4.1	Gütemaße .....	37
4.4.2	Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung.....	38

<b>5</b>	<b>Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse .....</b>	<b>43</b>
5.1	Betrachtung gegenwärtiger Verhältnisse .....	43
5.1.1	Analyse der beobachteten Abflüsse in Niedersachsen .....	43
5.1.1.1	Datenbasis .....	43
5.1.1.2	Methodik .....	44
5.1.1.3	Ergebnisse .....	45
5.1.1.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	47
5.1.2	Simulationen mit Klimamodelldaten im ALO-Gebiet (20C) .....	47
5.1.3	Detailanalyse heutiger lokaler Niedrigwasserverhältnisse im Westharz .....	47
5.2	Betrachtung zukünftiger Verhältnisse .....	49
5.2.1	Statistische Prognose von Niedrigwasserindizes .....	49
5.2.1.1	Datenbasis .....	49
5.2.1.2	Methodik .....	49
5.2.1.3	Ergebnisse .....	53
5.2.1.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	55
5.2.2	Simulationen mit Klimamodelldaten im ALO-Gebiet (20C, A1B) .....	56
5.2.2.1	Analysierte Größen und Indizes .....	56
5.2.2.2	Allgemeine Vorgehensweise .....	56
5.2.2.3	NQ7D .....	56
5.2.2.4	NM14D .....	59
5.2.2.5	maxD .....	59
5.2.2.6	maxV .....	60
5.2.2.7	sumD .....	61
5.2.2.8	sumV .....	62
5.2.2.9	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	63
5.2.2.10	Gültigkeit .....	63
5.2.2.11	Schlussfolgerungen .....	64
5.2.2.12	Ausblick .....	64
5.3	Detailanalyse zukünftiger lokaler Niedrigwasserverhältnisse im Westharz .....	65
5.4	Zusammenfassende Betrachtung .....	65
<b>6</b>	<b>Erkenntnisse für die Praxis .....</b>	<b>66</b>
6.1	Abschätzung der regionalen Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasser .....	66
6.1.1	Identifikation sensibler Bereiche .....	66
6.1.2	Identifikation von zukünftigen Risikogebieten .....	68
6.2	Ergebnistransfer .....	70
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit .....</b>	<b>72</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>75</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>81</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Ablaufschema der einzelnen Arbeitsschritte in KliBiW Phase 3 .....	8
Abbildung 2-2: Niedersachsen mit Einzugsgebiet von Aller und Leine inkl. Harz .....	9
Abbildung 2-3: Räumliche Übersicht zur Datengrundlage. Links: Verfügbare Pegel in Niedersachsen. Mitte: verfügbare Niederschlagstationen in Niedersachsen. Rechts: verwendete Klimamodelldaten (in grau: Einzugsgebiet Aller-Leine) .....	10
Abbildung 3-1: Kreuzvalidierung der Interpolationsverfahren unter Angabe des Nash-Sutcliffe Effizienzkriteriums für den Zeitraum von 1981 bis 1985 (Beobachtungsdaten) .....	12
Abbildung 3-2: Karten der langjährigen Mittelwerte aus den Beobachtungsdaten von mittlerem Jahresniederschlag (Einheit in mm) und mittlerer Tagestemperatur (Einheit in °C) .....	12
Abbildung 3-3: Kreuzvalidierung der Interpolationsverfahren unter Angabe des Nash-Sutcliffe Effizienzkriteriums für den Zeitraum von 1981 bis 1985 (WETTREG2006) .....	13
Abbildung 3-4: Karten der langjährigen Mittelwerte aus dem 20C-Lauf der ersten WETTREG2006-Realisation von mittlerem Jahresniederschlag (Einheit in mm) und mittlerer Tagestemperatur (Einheit in °C) .....	13
Abbildung 3-5: Ranking der 20 WETTREG-Realisationen anhand der Bandbreiten des NM7Q bzw. der Ausprägung des NM7Q10 am Pegel Rethem, abgeleitet aus dem Zusammenhang von klimatischen Kenngrößen und resultierenden Niedrigwasserindizes mittels eines statistischen Prognosemodells, auf Basis der jährlichen geschätzten NM7Q-Werte von 2021-2050 und 2071-2100.....	14
Abbildung 3-6: Lage der verwendeten Niederschlags- (oben) und Temperaturstationen (unten) .....	15
Abbildung 3-7: Ergebnisse des Mann-Kendall-Trendtests. Die gesamte Anzahl an Trends ist in grau, die Anzahl lokal signifikanter Trends in blau, feldsignifikante Trends in rot dargestellt .....	16
Abbildung 3-8: Räumliche Verteilung der Trendstärke nach Theil-Sen für den Standardized Precipitation Index im Sommer (oben) und Winter (unten) im Zeitraum 1951-2005. Signifikant negative Trends sind rot, signifikant positive Trends blau markiert .....	17
Abbildung 3-9: Räumliche Verteilung der Trendstärke nach Theil-Sen für die maximale Trockendauer im Sommer (oben) und Winter (unten) im Zeitraum 1951-2005. Signifikant positive Trends sind rot, signifikant negative Trends blau markiert.....	18
Abbildung 3-10: Räumliche Verteilung der Trendstärke nach Theil-Sen für die maximale Hitzewellendauer im Gesamtjahr im Zeitraum 1951-2005. Signifikante Trends sind rot markiert .....	18
Abbildung 3-11: Bandbreiten verschiedener Klimagrößen aus Beobachtung und regionalen Klimamodellen, gemittelt über Niedersachsen, über den Zeitraum 1961-2000; links: Temperatur, rechts: Niederschlag; Obs: Beobachtung, UBA: ECHAM5 Lauf 1 / REMO, BfG: ECHAM5 Lauf 2 / REMO, ENS: ECHAM5 Lauf 3 / REMO, W06: ECHAM5 Lauf 1 / WETTREG2006 .....	20
Abbildung 3-12: räumliche Muster der langjährigen mittleren Temperatur (links) und Niederschläge (rechts) von Beobachtung (oben) und ECHAM Lauf 3 / REMO-ENS (unten) über den Zeitraum 1971-2000; die grauen Linien umgrenzen naturräumliche Einheiten.....	20
Abbildung 3-13: Änderungssignal der mittleren Jahrestemperatur für Niedersachsen; Bandbreite über 15 Regionale Klimamodelle .....	21
Abbildung 3-14: Änderungssignal der Jahresniederschlagssummen für Niedersachsen; Bandbreite über 15 Regionale Klimamodelle .....	21
Abbildung 3-15: Änderungssignal der Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Okt) für Niedersachsen; Bandbreite über 15 Regionale Klimamodelle.....	22
Abbildung 3-16: Änderungssignal der Temperatur simuliert mit 16 Global- / Regionalmodell-Kombinationen in den Sommermonaten (Juni – August) als Gebietsmittel für Deutschland relativ zu 1971/2000, gleitendes 31- Jahresmittel (nach CS2.0).....	23

Abbildung 3-17: Änderungssignal des Niederschlags simuliert mit 16 Global- / Regionalmodell-Kombinationen in den Sommermonaten (Juni – August) als Gebietsmittel für Deutschland relativ zu 1971/2000, gleitendes 31-Jahresmittel (nach CS2.0) .....	23
Abbildung 3-18: Änderungssignal der Temperatur simuliert mit 16 Global- / Regionalmodell-Kombinationen in den Sommermonaten (Juni – August) als Gebietsmittel für Niedersachsen relativ zu 1971/2000, gleitendes 31-Jahresmittel (nach CS2.0).....	23
Abbildung 3-19: Änderungssignal des Niederschlags simuliert mit 16 Global- / Regionalmodell-Kombinationen in den Sommermonaten (Juni – August) als Gebietsmittel für Niedersachsen relativ zu 1971/2000, gleitendes 31-Jahresmittel (nach CS2.0).....	23
Abbildung 3-20: Lage der Teileinzugsgebiete für die Validierung innerhalb des Betrachtungsraumes von Aller und Leine .....	24
Abbildung 3-21: Graphische Darstellung der Modellgüte ( $NSE_1$ ) für alle betrachteten Modelle und Kennwerte des Niederschlags, differenziert nach Teilgebieten (mit von links nach rechts abnehmender Einzugsgebietsgröße) .....	26
Abbildung 3-22: Absolute Abweichung des mittleren Niederschlags (links) und der maximalen Trockendauer (rechts) von der Beobachtung für REMO-BfG und -UBA und WETTREG im 20C-Zeitraum 1971-2000. Die Zahlen unter den Karten geben die mittleren Abweichungen an .....	27
Abbildung 3-23: Absolute Abweichung der mittleren Temperatur (links) und der maximalen Hitzewellendauer (rechts) zur Beobachtung für REMO-BfG und -UBA und WETTREG im 20C-Zeitraum 1971-2000. Die Zahlen unter den Karten geben die mittleren Abweichungen an .....	27
Abbildung 3-24: Nash-Sutcliffe-Effizienzen der geordneten Reihenwerte der mittleren Temperatur (links) und der maximalen Hitzewellendauer (rechts) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG im 20C-Zeitraum 1971-2000. Die Zahlen unter den Karten geben den mittleren $NSC_1$ an .....	29
Abbildung 3-25: Nash-Sutcliffe-Effizienzen der geordneten Reihenwerte des mittleren Niederschlags (links) und der maximalen Trockendauer (rechts) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG im 20C-Zeitraum 1971-2000. Die Zahlen unter den Karten geben den mittleren $NSC_1$ an .....	29
Abbildung 3-26: Änderung der mittleren Temperatur gegenüber dem 20C-Zeitraum (1971-2000) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts). Die Zahlen unter den Karten geben die mittlere Änderung an .....	31
Abbildung 3-27: Änderung der maximalen Hitzewellendauer gegenüber dem 20C-Zeitraum (1971-2000) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts). Die Zahlen unter den Karten geben die mittlere Änderung an .....	31
Abbildung 3-28: Änderung des mittleren Niederschlags gegenüber dem 20C-Zeitraum (1971-2000) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts). Die Zahlen unter den Karten geben die mittlere Änderung an .....	33
Abbildung 3-29: Änderung der maximalen Trockendauer gegenüber dem 20C-Zeitraum (1971-2000) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts). Die Zahlen unter den Karten geben die mittlere Änderung an .....	33
Abbildung 4-1: Das Einzugsgebiet der Aller im südöstlichen Teil Niedersachsens mit Referenzpegeln (rot) an den Flüssen Aller, Leine, Oker, Innerste, Nette, Rhume, Schunter, Sieber, Böhme Radau und Westaue .....	35
Abbildung 4-2: 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 .....	36
Abbildung 4-3: Schematische Übersicht des Bodenmodells DYVESOM mit den 5 parallel betriebenen Submodulen (Domänen).....	36
Abbildung 4-4: Prozentualer Anteil der Evapotranspiration an Speicher 1 in Abhängigkeit von der Tiefe z für verschiedene GSI. Gesamttiefe der Wurzeln = 90 cm .....	37

Abbildung 4-5: Prozentualer Anteil der Evapotranspiration an Speicher 1 in Abhängigkeit von der Tiefe z für verschiedene GSI. Gesamttiefe der Wurzeln = 165 cm.....	37
Abbildung 4-6: Jahresverläufe (1951-2005) für den GSI für eine beliebige Teilfläche im ALO Gebiet.....	37
Abbildung 4-7: Abflussganglinie und Summenlinie für Simulation ( <i>Qsim</i> , rot) und Beobachtung ( <i>Qobs</i> , blau) für die Kalibrierungsperiode vom 01.11.1971 – 31.10.1991 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller.....	39
Abbildung 4-8: Langjährige mittlere Quartalsabflüsse für Simulation ( <i>Qsim</i> , dunkelgrün, gestrichelte Linie) und Beobachtung ( <i>Qobs</i> , hellgrün, durchgezogene Linie) sowie langjährige mittlere monatliche Abflüsse für Simulation ( <i>Qsim</i> , hellblau) und Beobachtung ( <i>Qobs</i> , dunkelblau) für die Kalibrierung vom 01.11.1971 – 31.10.1991, Pegel Rethem .....	39
Abbildung 4-9: Jährliche Niedrigwasserabflüsse für Simulation (NQsim, hellblaue Balken) und Beobachtung (NQobs, dunkelblaue Balken) für die Kalibrierungsperiode vom 01.11.1971 – 31.10.1991 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller .....	40
Abbildung 4-10: Abflussganglinie und Summenlinie für Simulation ( <i>Qsim</i> , rot) und Beobachtung ( <i>Qobs</i> , blau) für die Validierungsperiode vom 01.11.1991 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller. ....	41
Abbildung 4-11: Langjährige mittlere Quartalsabflüsse für Simulation ( <i>Qsim</i> , dunkelgrün, gestrichelte Linie) und Beobachtung ( <i>Qobs</i> , hellgrün, durchgezogene Linie) sowie langjährige monatliche, mittlere Abflüsse für Simulation ( <i>Qsim</i> , hellblau) und Beobachtung ( <i>Qobs</i> , dunkelblau) für die Validierungsperiode vom 01.11.1991 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller.....	41
Abbildung 4-12: Jährliche Niedrigwasserabflüsse für Simulation (NQsim, hellblaue Balken) und Beobachtung (NQobs, dunkelblaue Balken) für die Validierungsperiode vom 01.11.1991 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller. ....	41
Abbildung 4-13: Abflussganglinie und Summenlinie für Simulation ( <i>Qsim</i> , rot) und Beobachtung ( <i>Qobs</i> , blau) für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode vom 01.11.1971 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller. ....	41
Abbildung 4-14: Modelleffizienzen aller Referenzpegel für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode.....	42
Abbildung 4-15: Logarithmierte Modelleffizienzen aller Referenzpegel für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode. ....	42
Abbildung 4-16: Monatliche normierte RMSE für Kalibrierungs- und Validierungsperiode für alle Referenzpegelgebiete. ....	42
Abbildung 5-1: Lage der Pegel mit Aufzeichnungen des täglichen mittleren Abflusses für den Zeitraum 1951-2005 (oben) und 1966-2010 (unten) .....	43
Abbildung 5-2: Ergebnisse des Mann-Kendall Trendtests für die Zeiträume 1951-2005 (linker Balken) und 1966-2010 (rechter Balken). Die Gesamtanzahl der Trends ist in grau, lokale signifikante Trends in blau und feldsignifikante Trends in rot dargestellt.....	44
Abbildung 5-3: Angepasste Trendgeraden für die Untersuchungszeiträume 1951-2005 (blau) und 1966-2010 (rot)...	46
Abbildung 5-4: Räumliche Verteilung der nach Theil-Sen geschätzten Trends für den NM7Q im Sommer (links) und Winter (rechts) im Zeitraum 1966-2010. Signifikant negative Trends sind rot, signifikant positive Trends blau markiert. Jahreszahlen geben signifikante Bruchpunkte an .....	46
Abbildung 5-5: Zeitreihe des spezifischen Sommer NM7Q, gemittelt über alle Pegel, mit dem nach Pettitt geschätzten Bruchpunkt und individuell angepassten Trendgeraden vor und nach 1988.....	46
Abbildung 5-6: Beobachtete Trends der Niedrigwasserabflüsse NQ im Westharz in [%/Jahr] für den Zeitraum 1941 – 2011.....	48
Abbildung 5-7: Beobachtete Trends der Niedrigwasserabflüsse NM7Q im Westharz in [%/Jahr] für den Zeitraum 1941 – 2011 .....	48
Abbildung 5-8: Lage der 268 untersuchten Abflusspegel. Blaue Markierungen kennzeichnen Stationen mit mindestens 30 Jahren Aufzeichnungslänge zwischen 1951 und 2011 .....	49
Abbildung 5-9: Modellgüte des individuell angepassten Stationsmodells (blau) und des regionalen Modells (rot) für den NM7Q an den Pegeln Rethem (oben) und Pionierbrücke (unten).....	51

Abbildung 5-10: Modellgüte des individuell angepassten Stationsmodells (blau) und des regionalen Modells (rot) für D15 an den Pegeln Rethem (oben) und Pionierbrücke (unten) .....	51
Abbildung 5-11: Abweichung des mit Hilfe der Klimamodelldaten geschätzten $NM7Q_{10}$ von der Beobachtung für den Zeitraum 1961-2000 .....	52
Abbildung 5-12: Abweichung der Modellläufe im Kontrollzeitraum 20C gegenüber der Beobachtung (oben), und prognostizierte Änderungen gegenüber dem Kontrollzeitraum für die nahe Zukunft (Mitte) und die ferne Zukunft (unten) für verschiedene Wiederkehrintervalle des $NM7Q$ über alle Stationen. REMO-BfG ist in hellrot, REMO-UBA in dunkelrot und WETTREG in grün dargestellt.....	53
Abbildung 5-13: Räumliche Verteilung der prognostizierten Änderungen im $NM7Q_{10}$ gegenüber dem Kontrollzeitraum für die nahe Zukunft (oben) und die ferne Zukunft (unten) .....	54
Abbildung 5-14: Räumliche Verteilung der Trendstärke nach Theil-Sen für den jährlichen $NM7Q$ im Zeitraum 1966-2010. Signifikant negative Trends sind rot, signifikant positive Trends blau markiert .....	54
Abbildung 5-15: Prognostizierte Änderungen gegenüber dem Kontrollzeitraum für die nahe Zukunft (links) und die ferne Zukunft (rechts) für das $NM7Q$ über ganz Niedersachsen (oben) und die 17 Referenzpegel (unten) .....	55
Abbildung 5-16: Schematische Darstellung der Niedrigwasserkenngrößen $maxD$ , $sumD$ , $maxV$ und $sumV$ .....	56
Abbildung 5-17: Quartalsbezogene mittlere $NM7Q$ und $MQ$ für die Zeitabschnitte Z1, Z2 und Z3 für den Referenzpegel Rethem. Zusätzlich sind die Beobachtung und die Simulation mit historischen Klimarandbedingungen eingetragen .....	57
Abbildung 5-18: Quartalsbezogene auf Z1 normierte, mittlere $NM7Q$ und $MQ$ für die Zeitabschnitte Z2 und Z3 als Flächenmittel über alle Referenzpegel.....	57
Abbildung 5-19: 5 jährliche, auf 20C normierte $NM7Q$ für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.....	58
Abbildung 5-20: 5 jährliche, auf 20C normierte $NM7Q$ für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	58
Abbildung 5-21: 5 jährliche, auf 20C normierte $NM7Q$ für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	58
Abbildung 5-22: Flächengemittelte Abweichungen des $NM7Q$ im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	58
Abbildung 5-23: Auftrittszeitpunkt des $NM7Q$ für den Referenzpegel Rethem innerhalb des hydrologischen Jahres für die Zeiträume Z1, Z2 und Z3 berechnet für die 20 WETTREG-Realisationen .....	59
Abbildung 5-24: Auftrittszeitpunkt des $NM7Q$ für den Referenzpegel Rethem innerhalb des hydrologischen Jahres für die Zeiträume Z1, Z2 und Z3 berechnet für die 2 REMO-Läufe .....	59
Abbildung 5-25: 5-jährliche, auf 20C normierte $maxD$ für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.....	59
Abbildung 5-26: 5-jährliche, auf 20C normierte $maxD$ für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	59
Abbildung 5-27: 5-jährliche, auf 20C normierte $maxD$ für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	59
Abbildung 5-28: Flächengemittelte Abweichungen des $maxD$ im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	60
Abbildung 5-29: Auftrittszeitpunkt des $maxD$ innerhalb des Jahres für Z1, Z2 und Z3 für 20 WETTREG-Realisationen am Referenzpegel Rethem .....	60
Abbildung 5-30: Auftrittszeitpunkt des $maxD$ innerhalb des Jahres für Z1, Z2 und Z3 für 2 REMO-Läufe am Referenzpegel Rethem .....	60
Abbildung 5-31: 5-jährliche, auf 20C normierte $maxV$ für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.....	61
Abbildung 5-32: 5-jährliche, auf 20C normierte $maxV$ für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	61

Abbildung 5-33: 5-jährliche, auf 20C normierte maxV für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	61
Abbildung 5-34: Flächengemittelte Abweichungen des maxV im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	61
Abbildung 5-35: 5-jährliche, auf 20C normierte sumD für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.....	61
Abbildung 5-36: 5-jährliche, auf 20C normierte sumD für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	62
Abbildung 5-37: 5-jährliche, auf 20C normierte sumD für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	62
Abbildung 5-38: Flächengemittelte sumD über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	62
Abbildung 5-39: 5-jährliche, auf 20C normierte sumV für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.....	62
Abbildung 5-40: 5-jährliche, auf 20C normierte sumV für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	62
Abbildung 5-41: 5-jährliche, auf 20C normierte sumV für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	62
Abbildung 5-42: Flächengemittelte Abweichungen des sumV im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	63
Abbildung 5-43: Flächengemittelte Abweichungen der NW-Kenngrößen (NM7Q, maxD, sumD, maxV und sumV) im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 5, 20, und 50. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2 .....	63
Abbildung 6-1: Klimatische Wasserbilanz für das Gesamtjahr, gemittelt über den Zeitraum 1966-2010 .....	67
Abbildung 6-2: Niederwasser-Abflussspende für das Gesamtjahr, gemittelt über den Zeitraum 1966-2010 .....	67
Abbildung 6-3: Gewässertypen nach EG-WRRL mit nennenswerten Sickerverlusten beim Wassertransport.....	67
Abbildung 6-4: Verhältnis von Entnahme-Rechten zur GW-Neubildung, gemittelt über den Zeitraum 2000-2011 .....	67
Abbildung 6-5: Einleitungen durch Kläranlagen, dargestellt als chemischer Sauerstoffbedarf (CSB-Wert) im Ablauf, laut dem Lagebericht 2013 Kommunalabwasser Niedersachsen.....	67
Abbildung 6-6: Klassifizierung der Vulnerabilität gegenüber Trockenheit an ausgewählten Fließgewässern in Niedersachsen .....	69
Abbildung 6-7: Klassifizierung der Vulnerabilität gegenüber Trockenheit von ausgewählten Fließgewässern im Einzugsgebiet von Aller-Leine-Oker zusammen mit Klimasignalen der NWI (Z3) an den Referenzpegeln .....	70
Abbildung 7-1: Qualitative Zusammenfassung der vergangenen Trends und zukünftigen Signale verschiedener Trockenwetter- und Niedrigwasser-Kenngrößen für Niedersachsen bzw. das Einzugsgebiet von Aller und Leine (magenta umrahmt); rote Symbole: Tendenz wärmer / trockener, blaue Symbole: Tendenz kühler / feuchter .....	74

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Mögliche Änderungen von Temperatur und Niederschlag in Norddeutschland (nach Meinke & Gerstner, 2009) und Niedersachsen (eigene Auswertungen) am Ende des 21. Jahrhunderts (2071/2100) gegenüber heute (1961-1990).....	3
Tabelle 2-1: Datenbasis für das Projekt KliBiW Phase 3.....	10
Tabelle 3-1: Liste der betrachteten Trockenwetterindizes.....	16
Tabelle 3-2: Absolute Änderungen der Trockenwetterindizes für das Jahr und die einzelnen Saisons geschätzt nach Theil-Sen, gemittelt über alle Stationen.....	17
Tabelle 3-3: Regionale Klimamodelle aus / für Deutschland mit antreibendem Globalmodell und verfügbaren SRES-Szenarien.....	21
Tabelle 3-4: Ausgewählte Charakteristika der Teileinzugsgebiete der Validierung.....	24
Tabelle 3-5: Ausgewählte Kenngrößen des Niederschlags zur Einschätzung der Modellgüte von Klimamodelldaten.....	25
Tabelle 3-6: Ausgewählte Effizienzkriterien zur Beschreibung der Modellgüte (mit N: Anzahl der Werte einer Reihe, $X_{obs}$ : Beobachtungswerte, $X_{sim}$ : Modellwerte, $\bar{x}$ : Mittelwert).....	25
Tabelle 4-1: Referenzpegel für die Wasserhaushaltmodellierungen.....	35
Tabelle 4-2: Mathematische Gütemaße für die Kalibrierungsperiode vom 01.11.1971 – 31.10.1991 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller.....	40
Tabelle 4-3: Mathematische Gütemaße für die Validierungsperiode vom 01.11.1991 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller.....	41
Tabelle 5-1: Liste der verwendeten Niedrigwasserindizes.....	44
Tabelle 5-2: Absolute und prozentuale Änderung der Niedrigwasserindizes für beide Untersuchungszeiträume, nach Theil-Sen.....	45
Tabelle 5-3: Liste der verwendeten Niedrigwasserindizes.....	49
Tabelle 5-4: Liste der verwendeten meteorologischen Indizes.....	50
Tabelle 5-5: Abweichung der mittleren Schätzungen der Klimamodelle von der Beobachtung im Kontrollzeitraum (20C) und mittlere Änderungen gegenüber dem Kontrollzeitraum für die nahe Zukunft (Z2) und die ferne Zukunft (Z3) für die betrachteten Indizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall.....	52
Tabelle 5-6: Auswertungs-Zeiträume der Wasserhaushaltsmodellierung.....	56
Tabelle 6-1: Klassengrenzen der Kriterien zur Einschätzung der Vulnerabilität von Fließgewässern in Niedersachsen gegenüber Trockenheit.....	69
Tabelle 6-2: Klassengrenzen der Signale der einzelnen NWI zur Einschätzung der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse an den Referenzpegeln im Aller-Leine Gebiet.....	70
Tabelle 6-3: Methoden aus KliBiW und deren beispielhafte Anwendung in der fachlichen Praxis.....	71

## Abkürzungsverzeichnis

20C	Kontrollzeitraum der Klimamodelldaten im 20. Jahrhundert, in dem das gegenwärtige Klima durch die Modelle nachgebildet wird (in der Regel nach 1950)
DSDmax	Maximum Dry Spell Duration: Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage mit Niederschlagsmengen $< 1$ mm [d]
HWDmax	Maximum Heat Wave Duration: Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit maximaler Temperatur $>$ dem tagesspezifischen 90%-Quantil der maximalen Temperatur [d]
maxD	Maximale Unterschreitungsdauer: Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Abfluss $<$ Schwellenwert [d]
maxV	Maximales Defizitvolumen: Größtes aggregiertes Defizit zwischen beobachtetem Abfluss und Schwellenwert [m <sup>3</sup> ]
MQ	Mittlerer Abfluss [m <sup>3</sup> /s]
NMxQ (NQxD)	Niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses über eine bestimmte Anzahl aufeinanderfolgender Tage (z.B. NM7Q bzw. NQ7D) [m <sup>3</sup> /s]
NMxQx	Wert eines Niedrigwasserindex (z.B. NM7Q) für ein definiertes Wiederkehrintervall [m <sup>3</sup> /s]
NWI	Niedrigwasserindex (z.B. NMxQ)
Pav	Mittlerer Niederschlag [mm]
Qs	Abflussschwellwert
SPI	Standardized Precipitation Index: Abweichung der Niederschlagssumme vom langjährigen Normalwert (in Anzahl der Standardabweichungen)
sumD	Summe aller Abflussunterschreitungen eines Zeitraumes [d]
sumV	Summe aller Unterschreitungsolumina eines Zeitraumes [m <sup>3</sup> ]
Tav	Mittlere Temperatur [°C]
TWI	Trockenwetterindex
Z2. Z3	Szenarienzeiträume der Klimamodelldaten, in denen das mögliche Klima auf Basis von Annahmen über zukünftige Entwicklungen abgeschätzt wird (Z2: 2021-2050, Z3: 2071-2100)



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Veröffentlichung des 4. Sachstandsberichtes des Weltklimarates der Vereinten Nationen (IPCC, 2007) hat unmissverständlich verdeutlicht, dass ein Klimawandel stattfindet und dass dieser maßgeblich vom Menschen (mit)verursacht wurde bzw. wird. Auch der 5. Sachstandsbericht, dessen Ergebnisse der Arbeitsgruppe I, „Wissenschaftliche Grundlagen“, im September 2013 veröffentlicht wurden (IPCC, 2013), bestätigt diese Aussage. Demnach kommt es im 21. Jahrhundert global u.a. zu einem Anstieg der Temperatur, zu Veränderungen in der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Niederschläge sowie der Häufigkeit von Extremwetterereignissen. Diese Entwicklungen werden jedoch regional unterschiedlich ausgeprägt sein.

Die Auswirkungen des Klimawandels lassen daher auch für die Bevölkerung und den Wirtschaftsstandort Niedersachsen erhebliche Veränderungen erwarten, insbesondere im Bereich der Wasserwirtschaft. Die mögliche Zunahme der Intensität und Häufigkeit von Hochwasserereignissen, ein eingeschränktes Wasserdargebot und die Niedrigwasserführung der Flüsse in langandauernden Trockenphasen, Einschränkungen bei der Trinkwasser- und Brauchwassernutzung sowie steigende Anforderungen an die Einleitung von Abwässern und Kühlwässern in die Flüsse werden die Wasserwirtschaft vor neue Herausforderungen stellen. Auf Grundlage dieser Einschätzungen wurde im Sommer 2008 das Projekt KliBiW, Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgeabschätzungen für das Binnenland, durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz initiiert. Wesentliche Zielsetzungen waren bzw. sind die Identifikation von Schwerpunkten der wasserwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels sowie die Bewertung der Auswirkungen und Ableitung von möglichen Anpassungsstrategien und Handlungsempfehlungen.

Die Phasen 1 und 2 des Projektes hatten das Thema Klimawandel und Hochwasser als Schwerpunkt. Die entsprechenden Ergebnisse wurden Mitte 2012 in der NLWKN-Schriftenreihe „Oberirdische Gewässer“, Band 33, veröffentlicht (NLWKN, 2012). Die vorliegende Veröffentlichung der Ergebnisse der

Phase 3 setzt sich mit dem Thema Klimawandel und Niedrigwasser auseinander.

Bereits in der Vergangenheit haben Niedrigwasser- und Trockenperioden in Deutschland zu lokalen Problemen geführt, zuletzt 2003 und 2011, und Nutzungen, wie etwa die Energiewirtschaft, die Trinkwasserversorgung, die Land- und Forstwirtschaft sowie die Siedlungswasserwirtschaft beeinträchtigt. Gleichzeitig wurden Defizite in einer entsprechenden Vorsorge deutlich (LAWA, 2007). Bereits 2003 überstiegen die durch Trockenheit hervorgerufenen Schäden auf europäischer Ebene die der Hochwasserereignisse von 2002 (Raschke, 2005). Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass die innerjährliche Verschiebung der Niederschläge im 20. Jahrhundert die extremen Trockenperioden und Hitzewellen auslösenden Großwetterlagen verursachen (LAWA, 2010), welche z.B. im Sommer in Südwestdeutschland zwischen 1881 und 2006 bereits signifikant zugenommen haben. Diese Tendenzen müssen jedoch räumlich differenziert gesehen werden und können nicht ohne Weiteres gleichermaßen auf ganz Niedersachsen übertragen werden. In den Empfehlungen für eine niedersächsische Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels (Regierungskommission Klimaschutz, 2012) wird dargelegt, dass klimatische Faktoren die Entwicklungsmöglichkeiten von Regionen bestimmen und die Nutzungsvielfalt begrenzen können. Entsprechende Veränderungen sind zu quantifizieren.

Aus diesem Grund lagen die Schwerpunkte von KliBiW Phase 3 zum einen in der Schaffung einer entsprechend belastbaren Datenbasis unter dem Aspekt Trockenwetter und Niedrigwasserführung. Die Daten sollten hinsichtlich ihrer zeitlichen und räumlichen Struktur analysiert werden, um Risikogebiete zu identifizieren und anschließend adaptierte Handlungsempfehlungen für die zukünftige Entwicklung abzuleiten.

## 1.2 Aktuelle Klimaforschung

Klima ist keine konstante Größe, sondern ein sich in Raum und Zeit unter dem Einfluss verschiedener Faktoren stets ändernder Zustand von meteorologischen Größen und Prozessen. Die Ursachen für diese Dynamik im Klimasystem können sowohl natürlichen wie auch anthropogenen Ursprungs sein.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Entwicklung des globalen Klimawandels im Verlauf des 20. bis zum Beginn des 21. Jahrhunderts werden in den Sachstandsberichten des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) seit 1990 in regelmäßigen Abständen analysiert und zusammengefasst. Darin heißt es u.a., dass die globale Mitteltemperatur zwischen 1906 und 2005 um 0,74 °C (IPCC, 2007) bzw. zwischen 1880 und 2012 um 0,85 (IPCC, 2013) °C gestiegen ist.

Die Erwärmungsrate für die letzten 50 Jahre ist nahezu doppelt so groß wie die für die vergangenen 100 Jahre. Elf der letzten zwölf Jahre waren unter den zwölf wärmsten Jahren seit Beginn der Beobachtungen um 1850 (IPCC, 2007). Jedes der drei vergangenen Jahrzehnte war wärmer als alle vorhergehenden seit 1850. In den vergangenen 15 Jahren ist die globale Mitteltemperatur weiterhin gestiegen, jedoch war die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs langsamer als in den vorhergehenden Jahrzehnten (IPCC, 2013). Die Zahl der kalten Tage und Nächte sowie Frost hat in den meisten Regionen abgenommen während die der warmen Tage und Nächte seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts zugenommen hat. Zudem traten in Europa, Asien und Australien häufiger Hitzewellen auf.

Der größte Teil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist mit großer Sicherheit durch den beobachteten Anstieg der anthropogenen Treibhausgaskonzentrationen verursacht, insbesondere von Kohlendioxid. Natürliche Faktoren wie Schwankungen der Sonnenaktivität oder Vulkanausbrüche haben auf die langfristige Erwärmung gegenwärtig nur einen geringen Einfluss (IPCC, 2013).

Aussagen zur Entwicklung der Niederschläge sind meist weniger eindeutig bzw. müssen regional differenziert gesehen werden. Es scheint aber, dass diese in feuchten Regionen und mittleren Breiten tendenziell eher zugenommen haben, während sie in trockenen

Regionen eher abnehmen. Extreme Wetterereignisse sind insgesamt häufiger und intensiver geworden (IPCC, 2013).

In Deutschland beträgt die Erwärmung nach Auswertungen des Klima-Trendatlas Deutschland (Schönwiese & Janoschitz, 2008) seit Beginn des 20. Jahrhunderts ungefähr 1 °C. Damit liegt sie deutlich über dem entsprechenden global gemittelten Trend. Es gibt ein Trendgefälle von Südost nach Nordwest Deutschland, wobei der Trend in Norddeutschland zwischen +0,4 und +0,8 °C liegt. Das bisher wärmste Jahr ist in Deutschland demnach das Jahr 2000 gewesen, fast gleichauf mit 2007. Obwohl die Trends im Sommer bzw. Winter tendenziell ähnlich erscheinen, gibt es z.T. deutliche Unterschiede in den interannuellen Variationen und den Maxima. So waren die wärmsten Sommer z.B. 2003, 1947 und 1992/1994, die wärmsten Winter dagegen 2007, 1990 und 1975 (Schönwiese & Janoschitz, 2008).

Ein ebenfalls steigender Trend (von +9%) zeichnet sich in den Jahresniederschlagssummen zwischen 1901 und 2000 ab, wobei die interannuellen Schwankungen hierbei ausgeprägter auftreten als bei den Temperaturen. Zudem gibt es in diesem Zusammenhang Hinweise auf eine steigende Varianz. Die jahreszeitlichen Niederschlagstrends sind entgegengerichtet, d.h. es gab leichte Abnahmen im Sommer (rund -3%), die im Intervall 1951-2000 noch deutlicher werden (-16%, Norddeutschland bis zu -20%), denen deutliche Anstiege im Winter entgegenstehen (in beiden Zeitintervallen rund +20%) (Schönwiese & Janoschitz, 2008). Nach Angaben des 5. Sachstandsberichts (IPCC, 2013) werden die Gegensätze in den Niederschlägen zwischen feuchten und trockenen Jahreszeiten, aber auch zwischen trockenen und feuchten Regionen zunehmen, auch wenn es regionale Ausnahmen geben kann.

Die mögliche zukünftige Entwicklung des Klimas beruht in der heutigen Klimawissenschaft auf angenommenen Szenarien, denen grundsätzlich keine Wahrscheinlichkeitsaussage anhaftet, d.h. jedes Szenario ist gleich wahrscheinlich. Im 4. Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC, 2007) beschreiben diese (Emissions-)Szenarien demographische, ökonomische, politische sowie technologische Entwicklungen, die in bestimmten Treibhausgaskonzentrationen am Ende des 21. Jahrhunderts münden (Nakicenovic et al., 2000). Im 5. Sachstandsbericht (IPCC, 2013) geht man zunächst von einem unterschiedlich ausgepräg-

ten anthropogenen Strahlungsantrieb (ausgedrückt in  $W/m^2$ ) am Ende des 21. Jahrhunderts aus. Dieser kann durch unterschiedliche Entwicklungspfade, sog. Repräsentative Konzentrationspfade (Moss et al., 2010) erreicht werden, die wiederum auf sozio-ökonomischen Entwicklungen und klimapolitischen (Anpassungs-)Maßnahmen und den daraus resultierenden Treibhausgaskonzentrationen beruhen.

Mittels komplexer gekoppelter Klimamodelle (auch Erdsystemmodelle genannt), die die prozessualen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozeanen und Landökosystemen simulieren und global in einem dreidimensionalen Gitter (Auflösung 100 bis 200  $km^2$ ) in Form numerischer Differentialgleichungen beschreiben, kann die Reaktion des Klimasystems auf die veränderten Treibhausgaskonzentrationen dargestellt werden. Regionale Muster werden über sogenannte „Downscaling-Verfahren“ mittels regionaler Klimamodelle auf räumlich höher aufgelösten Skalen (bis etwa 10  $km^2$ ) berechnet.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass jedes Modell nur ein vereinfachtes Abbild der Realität darstellt. Aufgrund des beschränkten Wissens über das genaue Prozessgeschehen im Klimasystem, der beschränkte Modellgenauigkeit (Auflösung) sowie der

natürlichen Variabilität vieler Klimaparameter, ergeben sich Unsicherheiten, die eine Bandbreite von Ergebnissen verschiedener Klimamodelle verursachen. Diese Bandbreite möglicher Entwicklungen sollte bei der Darstellung und Interpretation der Ergebnisse in Form eines Modell-Ensembles verdeutlicht werden.

Basierend auf den zuvor genannten Emissionsszenarien und verschiedenen regionalen Klimamodellen ergeben sich beispielhaft für Norddeutschland Änderungssignale für die Klimagrößen Temperatur und Niederschlag in der Zukunft entsprechend Tabelle 1-1 (Meinke & Gerstner, 2009).

Um die Folgen des Klimawandels unter verschiedenen Gesichtspunkten auf regionaler Ebene abschätzen zu können und entsprechende Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln, werden diese Daten der Klimamodelle in sogenannten Wirk- bzw. Impaktmodellen als Antrieb genutzt. Für den Bereich der Wasserwirtschaft können dies z.B. Wasserhaushalts-, hydrologische oder Grundwassermodelle sein. Im folgenden Kapitel wird ein Überblick auf entsprechende Untersuchungen und Studien für (Nord-)Deutschland gegeben und gewonnene Erkenntnisse im Zusammenhang mit den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse kurz vorgestellt.

Tabelle 1-1: Mögliche Änderungen von Temperatur und Niederschlag in Norddeutschland (nach Meinke & Gerstner, 2009) und Niedersachsen (eigene Auswertungen) am Ende des 21. Jahrhunderts (2071/2100) gegenüber heute (1961-1990)

Änderung 2071/2100 gegenüber 1961/1990	Jahr	Sommer (Juni, Juli, August)	Winter (Dezember, Januar, Februar)
Durchschnittliche Temperatur [ $^{\circ}C$ ]			
Norddeutschland <sup>1)</sup>	2,0 bis 4,7	1,8 bis 5,0	1,9 bis 4,6
Niedersachsen <sup>2)</sup>	1,6 bis 4,2	1,4 bis 5,0	2,0 bis 4,8
Niederschlagsmenge [%]			
Norddeutschland <sup>1)</sup>	1 bis 9	-8 bis -40	11 bis 41
Niedersachsen <sup>2)</sup>	-7 bis 8	-2 bis -28	5 bis 35

1) Modell-Ensemble: REMO/ECHAM5 Lauf 1 (A1B, A2, B1), REMO/ECHAM5 Lauf 2 (A1B), CCLM/ECHAM5 Lauf 1 (A1B, B2), CCLM/ECHAM5 Lauf 2 (A1B, B2), RCAO/ECHAM4 (A2, B2), RCAO/Hadley (A2, B2)

2) Modell-Ensemble: REMO/ECHAM5 Lauf 1 (A1B, A2, B1), CCLM/ECHAM5 Lauf 1 (A1B, B2), WETTREG2006/ECHAM5 Lauf 1 (A1B, A2, B1), WETTREG2010/ECHAM5 Lauf 1 (A1B, A2, B1)

### 1.3 Erkenntnisse aus anderen Klimaprojekten

Es gibt zahlreiche Forschungsarbeiten, in denen Niedrigwasserkenngößen erarbeitet wurden, die Aufschluss über die Entwicklung des Abflussregimes geben. Ein Blick auf die Anzahl der Publikationen zu Niedrigwasser, die sich mit den zu erwartenden Folgen auf die Wasserwirtschaft beschäftigen, fällt hingegen eher spärlich aus. Insbesondere die Anwendung von Klimamodelldaten, aus denen Abschätzungen auf das zukünftige Abflussregime abgeleitet werden können, wurde bislang nur in wenigen Studien verfolgt. Eine dieser Studien ist das Forschungsvorhaben KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft). In KLIWA beschäftigen sich Wissenschaft und Behörden bereits seit 1998 mit klimagesteuerten Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in Süddeutschland. In einem der Teilprojekte untersuchen Hennegriff et al. (2008) die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg bis 2050. Über regionale Klimamodelle (WETTREG) in Verbindung mit statistischen Auswertungen von Niedrigwasserkennwerten wurden zukünftige Abflussprojektionen erzeugt. Die Ergebnisse zeigen, dass die größten Abnahmen der mittleren Niedrigwasserabflüsse künftig in den Monaten Juli, August und September auftreten können. Die Zeiträume von Niedrigwasserperioden können sich zudem flächendeckend verlängern. Sehr ähnliche Tendenzen zeigen sich auch in anderen KLIWA-Projekten aus Bayern und Rheinland-Pfalz (KLIWA 2012). Unter anderem wurden aus den Ergebnissen Handlungsempfehlungen und Anpassungsstrategien bis hin zu Klimaschutzprogrammen für den Freistaat Bayern erarbeitet (Henschel 2012).

Das Niedrigwasser im Sommer 2003 veranlasste das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) auf Anraten vieler Schifffahrtsverbände und Industriebetriebe vielseitige Untersuchungen über die zukünftige Nutzbarkeit der wirtschaftlich bedeutsamen großen Flüsse und Seegewässer der Nordsee durchführen zu lassen. Das übergeordnete Ziel bestand darin, wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft zu produzieren, die für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS 2008) genutzt werden sollen. Das BMVBS beauftragte da-

raufhin die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und den Deutschen Wetterdienst (DWD) mit dem Projekt KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland). Mit einer Laufzeit von 2009 bis 2013 wurden in KLIWAS auf Basis der Regionalmodelle REMO und CLM u.a. die Flüsse Rhein, Elbe und Donau sowie die Küstengewässer der Nordsee untersucht und bewertet. Die Ergebnisse zeigen für den Rhein und die Elbe bis zum Jahr 2100 Tendenzen von trockener werdenden Sommermonaten mit einer Abnahme der mittleren Abflüsse und Niedrigwasserabflüsse. Für die Donau sind keine eindeutigen Änderungen festgestellt worden, jedoch gibt es auch hier eine Tendenz von Abflussabnahmen im hydrologischen Sommerhalbjahr (BMVBS 2013).

In Anlehnung an derartige Untersuchungen betont die LAWA in ihrem Strategiepapier 2009, dass eine gewisse Vorsicht bei der Auswertung von Klimamodelldaten geboten sein sollte. Die daraus gewonnenen klimatischen Erkenntnisse müssen nicht zwingend direkte Auswirkungen auf das hydrologische Niedrigwasserregime haben. Auch wenn tendenziell von zunehmend wärmeren und trockeneren Sommern durch bestimmte Großwetterlagen auszugehen sein mag und sich dadurch Niedrigwasserperioden in den Sommermonaten verschärfen können, muss dies nicht unweigerlich zu einer Abnahme der mittleren monatlichen Abflüsse führen.

Weitere verwandte Niedrigwasseranalysen mit Nutzung von Klimamodelldaten wurden unter anderem von Hausmann et al. (2011) oder Huang et al. (2013) durchgeführt, in denen die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf Abflussregime simuliert werden. Unter Verwendung von unterschiedlichen Klimamodellszenarien (WETTREG, CLM) simulieren Hausmann et al. für das 21. Jahrhundert extremwertstatistische Kenngrößen an der Rur (Eifel). Für Wiederkehrintervalle bis zu 20 Jahren liegen die NM7Q-Werte unterhalb der Werte des Zeitraumes 1970-1990. Für die ferne Zukunft (2080-2100) werden mit dem auf WETTREG-Daten basierenden feuchteren Szenario größere Werte simuliert als für die nahe Zukunft (2030-2050). Der maximal prognostizierte Rückgang sommerlicher NM7Q-Werte wird anhand des trockeneren CLM-Szenarios in der nahen Zukunft mit ca. 26% simuliert. Vergleichende Studien an der Maas, die in

Hausmann et al. aufgeführt werden, weisen noch stärkere Tendenzen zur Abnahme von NM7Q-Werten in der (v.a. fernen) Zukunft auf. Auch bei Huang et al. zeigen die Ergebnisse der an fünf großen deutschen Flüssen durchgeführten Untersuchungen mit den Klimamodellen REMO, CLM und WETTREG ähnliche Tendenzen für die Zukunft.

Neben den genannten Projekten mit direktem Bezug zum Klimawandel leisten die zahlreichen wissenschaftlichen Studien zu Niedrigwasseranalysen, insbesondere nach der Trockenperiode 2003, einen wichtigen Beitrag zur Einschätzung der Entwicklungstrends von Abflussregimen seit dem 20. Jahrhundert. Die Studien können damit als einer der Antreiber für die auf Niedrigwasser ausgerichtete Klimaforschung betrachtet werden. Dallmann (2004), Belz (2005) und Groß (2009) führen in ihren Studien statistische Trenduntersuchungen von Niedrigwasserkenngößen im Rheingebiet und in Niedersachsen durch (s. Kapitel 5.1). Die Ergebnisse zeigen unter anderem eine Abnahme der mittleren Abflüsse in den Sommermonaten und eine Zunahme in den Wintermonaten im 21. Jahrhundert. Aufgrund der feuchter werdenden Winter kam es im Rheingebiet zu einer Abmilderung von Niedrigwasserextremen. Weitere Studien wurden in anderen Bundesländern z.B. von Willems (2004) und Haupt (2008) durchgeführt. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde untersuchte die extremen Niedrigwasserperioden in den Jahren 2003 und 2011 für Deutschland. Für statistische Einordnungen der Ereignisse wurden Trendanalysen durchgeführt (BfG 2006, BfG 2014). Bormann (2010) konstatierte in einer Studie an den fünf größten deutschen Flüssen ebenfalls überwiegend steigende Trends der mittleren winterlichen Abflüsse und sinkende Trends der sommerlichen.

In der Wissenschaft besteht weitreichende Einigkeit darüber, dass zukünftig mit feuchteren Winterhalbjahren und trockeneren Sommerhalbjahren zu rechnen sein muss, wobei letztere von zunehmenden Starkregenereignissen begleitet werden. An diese Erkenntnisse anlehnend hat die LAWA (2007) ein Paper veröffentlicht, in dem sie ein an den Klimawandel angepasstes Niedrigwassermanagement mit Handlungsempfehlungen vorstellt (z.B. zur Vorsorge oder Gewässerbewirtschaftung).

Im Rahmen des niedersächsischen Klimaforschungsprojektes KLIFF (Klimafolgenforschung in Niedersachsen) wurden im Teilprojekt KLIFWA unter anderem

Untersuchungen zu Niedrigwasserstatistiken auf Basis von WETTREG2006 durchgeführt. Die Ergebnisse wiesen für das 21. Jahrhundert auf keine signifikanten Änderungen der Niedrigwasserkenngößen hin (KLIFF 2014).

## 2 Projektgrundlagen

### 2.1 Zielsetzungen von KliBiW

Die globale Erwärmung und der damit einhergehende Klimawandel lassen befürchten, dass der Sektor der Wasserwirtschaft in absehbarer Zukunft erheblichen Veränderungen unterworfen sein wird. Bereits heutige Analysen zeigen Trends in der (saisonalen) Niederschlags- und Temperaturentwicklung der letzten 50-100 Jahre, die sich regional in veränderten Hochwasser- bzw. Niedrigwasserverhältnissen bemerkbar machen. Die Projektionen möglicher Klimawandel-Szenarien lassen für die Bevölkerung und den Wirtschaftsstandort Niedersachsen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erhebliche Nachteile erwarten. Insbesondere die wasserwirtschaftlichen Standortfaktoren können erhebliche Beeinträchtigungen erfahren. Zunehmende Hochwassergefährdungen, eingeschränktes Wasserdargebot und Niedrigwasserführung der Flüsse in langandauernden Trockenphasen, Einschränkungen bei der Trinkwasser- und Brauchwassernutzung sowie steigende Anforderungen an die Einleitung von Abwässern und Kühlwässern in die Flüsse werden die Wasserwirtschaft vor neue Herausforderungen stellen.

Damit sich Niedersachsen frühzeitig auf mögliche Veränderungen einstellen kann, hat das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz gemeinsam mit dem NLWKN das Projekt „Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgen für das Binnenland (KliBiW)“ initiiert, in dem schrittweise die einzelnen Bereiche untersucht und Handlungsempfehlungen erarbeitet werden sollen.

Während der Phasen 1 und 2 des Projektes wurden verschiedene Methoden zur Analyse der Daten und Simulation der wasserwirtschaftlichen Szenarien getestet und im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels auf zukünftige Hochwasserverhältnisse angewendet (NLWKN, 2012). Wesentliche Ziele waren dabei

- die landesweite Zusammenstellung, Aufbereitung und Auswertung von Grundlagendaten
- die Weiterentwicklung eines Wasserhaushaltsmodells zur Langzeit-Simulation von Abflüssen

- die Identifikation von Schwerpunkten der wasserwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels (Hochwasser) für das niedersächsische Binnenland
- der Ausbau der fachlichen und methodischen Kompetenzen des Gewässerkundlichen Landesdienstes (GLD)

Die Phase 3, die fachlich auf den Erkenntnissen und Erfahrungen mit den Modellen und Methoden aus den Phasen 1 und 2 aufbaut, hat das Thema der Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftigen Niedrigverhältnisse im Fokus. Wesentliche Ziele sind hierbei

- die zeitlich und räumlich differenzierte Analyse von gegenwärtigen und zukünftigen Trockenwetterverhältnissen
- die Erweiterung des Wasserhaushaltsmodells zur verbesserten Abbildung von niedrigwasserrelevanten Abfluss(bildungs)prozessen
- die Modellierung und Analyse von gegenwärtigen und zukünftigen Niedrigwasserverhältnissen (auf Basis von Klimamodelldaten)
- die Identifikation der regionalen Vulnerabilität gegenüber Trockenheit / Niedrigwasser auf Basis der modellierten Abflussszenarien
- der Ausbau der fachlichen Kompetenzen des Gewässerkundlichen Landesdienstes in Fragen des Niedrigwassermanagements

Das Thema Niedrigwasser ist in Deutschland erst zu Beginn des 21. Jahrhunderts in Untersuchungen vertieft thematisiert worden (z.B. LAWA, 2007; Prellberg, 2005). Die Phase 3 des Projektes KliBiW soll dabei helfen, diese Erkenntnisse für den niedersächsischen Raum auszubauen und die möglichen Veränderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts aufzuzeigen. Basierend darauf können die Folgen für die Bevölkerung und den Wirtschaftsstandort Niedersachsen abgeschätzt und angepasste Handlungsempfehlungen entwickelt werden.

## 2.2 Organisation

Das Projekt KliBiW wird gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU). Projektbeginn war im Sommer 2008 mit der Phase 1. Wesentliche Inhalte waren die Entwicklung und Testung von Methoden für die Klimadatenanalyse sowie der Aufbau bzw. die Erweiterung eines Wasserhaushaltsmodells. Im Mai 2009 wurde dem MU ein Zwischenbericht vorgelegt (NLWKN, 2009). In der anschließenden Phase 2 wurden die Methoden der Phase 1 z.T. erweitert und auf das Untersuchungsgebiet von Niedersachsen bzw. das Einzugsgebiet von Aller und Leine mit Fokus auf die Hochwasserverhältnisse angewendet. Die Phase 2 des Projektes endete mit der Erstellung des Abschlussberichts im April 2012 (NLWKN, 2012). Die Phase 3 hatte eine Laufzeit von zwei Jahren (Mai 2012 bis April 2014) und umfasst den Themenkomplex der Niedrigwasserverhältnisse. Folgende Institutionen waren an der Bearbeitung beteiligt:

- Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Josef Hölscher)
- Das Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Leibniz Universität Hannover (Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt)
- Das Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abt. Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz der Technischen Universität Braunschweig (Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Günter Meon)
- Die Harzwasserwerke GmbH (Projektleitung: Dr.-Ing. Andreas Lange)

Die Koordination der Arbeiten zwischen den genannten Projektpartnern erfolgte wie in den Phasen 1 und 2 durch den NLWKN über eine Lenkungsgruppe, in der neben den o.g. Vertretern Frau Gerhild Lienau als Vertreterin des Umweltministeriums teilnahm. Der fachliche Austausch zwischen den Projektpartnern bzw. Teilprojekten (s. Kapitel 2.3) erfolgte über regelmäßige Sitzungen der Bearbeiter aus den jeweiligen Institutionen.

## 2.3 Methodik

Die Phase 3 des Projektes KliBiW umfasst folgende Themenkomplexe bzw. Teilprojekte (TP):

- 1) Bewertung der regionalen Klimaentwicklung
- 2) Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt
- 3) Identifikation regionaler Bereiche mit erhöhter Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasser
- 4) Detailanalyse der Niedrigwasserverhältnisse im Harz
- 5) Information und Kommunikation
- 6) Projektleitung und Koordination

Das TP 1 „Bewertung der regionalen Klimaentwicklung“ beschäftigte sich zum einen mit der räumlich und zeitlich differenzierten Trend-Analyse von Messreihen auf Basis ausgewählter Trockenwetter- und Niedrigwasserindizes. Nach der Validierung der Klimamodell-daten wurden diese in ähnlicher Weise auf ihre zeitliche Entwicklung bzw. räumliche Struktur in der Zukunft analysiert. Zum anderen wurde versucht, über Zusammenhangsanalysen mit Hilfe multipler Regressionen von beobachteten Trockenwetter- und Niedrigwasserindizes ein statistisches Prognosemodell abzuleiten, mit dessen Hilfe zukünftige Niedrigwasserabflüsse aus Klimamodell-daten abgeschätzt werden können.

Im TP 2 „Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt“ erfolgte die Modellierung des Wasserhaushalts für den Betrachtungsraum des Aller-Leine Einzugsgebiets auf Tageswertbasis anhand von ausgewählten Klimamodell-daten. Hierzu wurde das aus Phase 2 bestehende Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI u.a. im Hinblick auf Prozesse im Bodenwasserhaushalt optimiert. Die simulierten Zeitreihen wurden für die Gegenwart und den Zukunftszeitraum statistisch ausgewertet und die Ergebnisse mit denen aus dem statistischen Prognosemodell aus TP1 verglichen.

Die Ergebnisse aus den TP 1 und 2 wurden anschließend im TP 3 „Identifikation von Regionen mit erhöhter Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasser“ genutzt, um Gebiete mit besonderer Gefährdung gegenüber Trockenheit bzw. Niedrigwasser unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen zu klassifizieren. Hierzu wurden entsprechend sensible Nutzungen, wie z.B.

Trinkwassergewinnungsgebiete oder bestimmte Fließgewässertypen lokalisiert und mit den Abschnitten, die zukünftig starken Veränderungen unterworfen sein könnten, räumlich verschnitten.

Im TP 4 „Detailanalyse der Niedrigwasserverhältnisse im Harz“ erfolgte eine Analyse der aktuellen und zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse für die Gewässer bzw. Pegel im Einzugsgebiet des Harzes, in Anlehnung an die Methoden aus TP 1 und 2. Ein besonderer Schwerpunkt lag hierbei auf den Möglichkeiten der Harztalsperren, gezielten Einfluss auf die zukünftigen Veränderungen nehmen zu können.

Die TP 5 und 6 bilden übergeordnete Querschnittsthemen des Projektes. In TP 5 „Information und Kommunikation“ ging es besonders um die Entwicklung von Anpassungsstrategien und Handlungsempfehlungen auf Basis der Ergebnisse der anderen TP sowie um die Übertragung der Methoden in die fachliche Praxis des Gewässerkundlichen Landesdienstes. Das TP 6 „Projektleitung und Koordination“ befasste sich schließlich mit der Bereitstellung und dem Management von (Basis)Daten sowie der Koordination der Arbeiten innerhalb und zwischen den Projektpartnern. Ein Ablaufschema mit den wesentlichen Arbeitsschritten der Teilprojekte ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

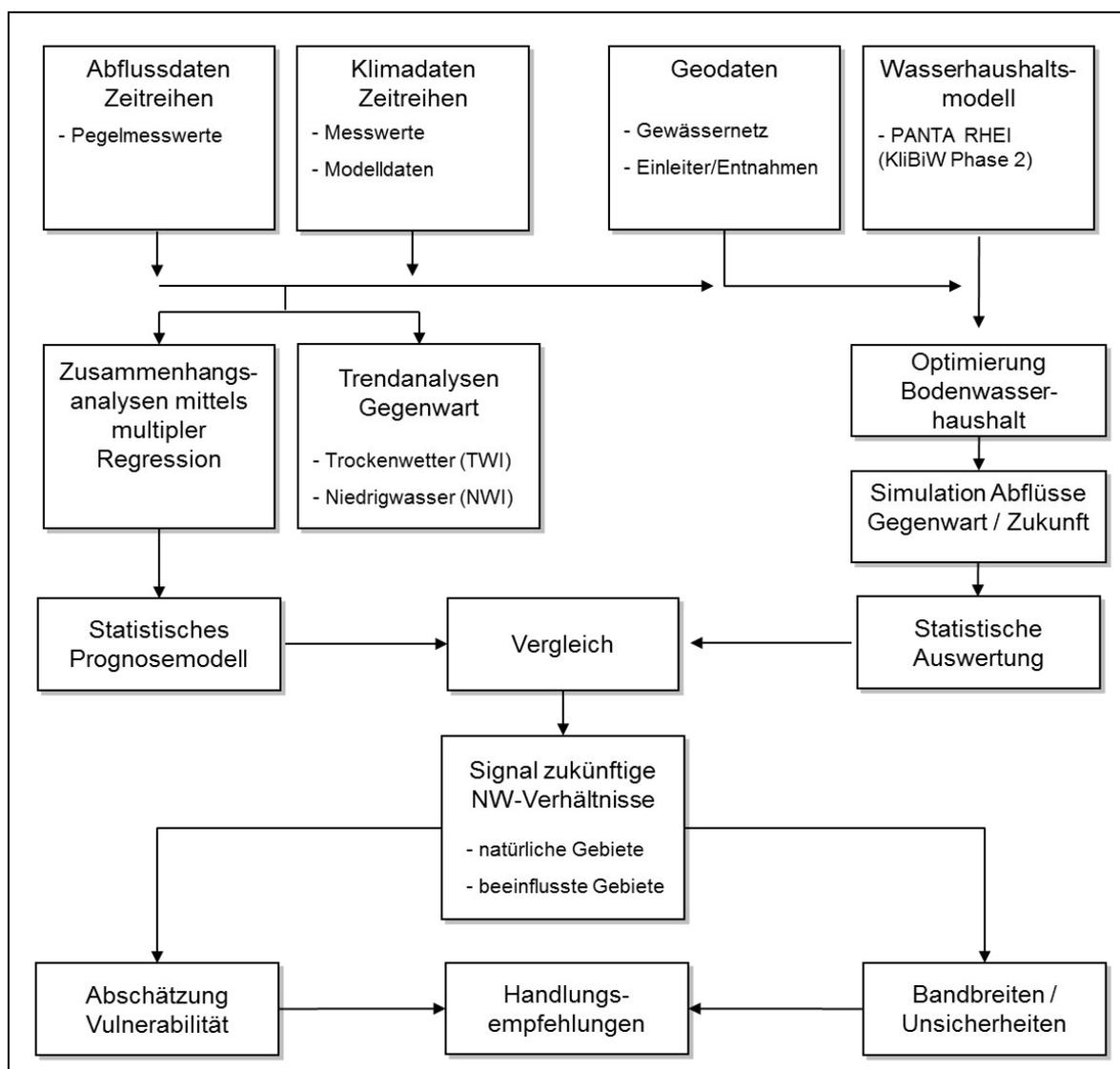


Abbildung 2-1: Ablaufschema der einzelnen Arbeitsschritte in KliBiW Phase 3

## 2.4 Untersuchungsgebiet

Die Analyse der klimatischen und wasserwirtschaftlichen Verhältnisse wird im Teilprojekt 3 analog den Teilprojekten 1 und 2 für das gesamte Bundesland Niedersachsen durchgeführt. Mit einer Flächengröße von 47.624 km<sup>2</sup> ist die Repräsentanz der unterschiedlichen naturräumlichen Einheiten und topographischen Gegebenheiten des norddeutschen Raumes gewährleistet sowie eine flächenhafte Bewertung der Klimasignale möglich. Während das nördliche Niedersachsen mit seinen flachen Marsch- und Geestlandschaften von maritimem Westwindklima dominiert wird, sind die südlichen Regionen durch die topographischen Einflüsse der Mittelgebirge (Harz, Weserbergland) und zunehmender Entfernung zur See von kontinentalerem Klima geprägt. Der Süden ist demnach trockeneren Sommern und kälteren Wintern ausgesetzt, im Norden fallen die Wintermonate milder und die Sommermonate verhältnismäßig feucht aus.

Während die Ableitung der Trockenwetterindizes aus den regionalen Klimamodelldaten für ganz Niedersachsen erfolgt, werden die daraus abgeleiteten hydrologischen Untersuchungen und Erkenntnisse zum zukünftigen Niedrigwasserhaushalt auf das südöstlich in Niedersachsen gelegene Einzugsgebiet der Aller und Leine angewendet. Das Gebiet umfasst eine Flächengröße von rund 15.700 km<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 2-2). Gründe für die Wahl des Untersuchungsgebietes sind zum einen die Mittelgebirgsausläufer und der Harz, die für einen Großteil der Gewässer die Oberläufe prägen und für die erhebliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot erwartet werden. In einer Detailanalyse wird daher besonderes Augenmerk auf den Westharz gelegt, der durch den Einfluss der Talsperren für die zukünftige Bewertung und das Management von Niedrigwasserabflüssen für die Unterläufe von großer Bedeutung ist. Zum anderen repräsentiert das Gebiet eine Vielzahl unterschiedlicher Naturräume und topographischer Verhältnisse in Niedersachsen. Letztlich liegt für das Gebiet bereits ein Wasserhaushaltsmodell vor, das bereits in den vorangegangenen Phasen Anwendung fand und sich u.a. auch in der Hochwasservorhersagezentrale Niedersachsen (HWVZ) bewährt hat. Im Rahmen von KliBiW wurde es für die speziellen Fragestellungen modifiziert und erweitert (s. Kapitel 4). Die Erkenntnisse und Methoden, die für dieses Gebiet exemplarisch gewonnen

bzw. entwickelt werden, sollen künftig für die Analyse weiterer Flusseinzugsgebiete in Niedersachsen übertragen werden. Für die Einzugsgebiete der Hase und der Hunte liegen seit 2012 und seit 2013 bereits Wasserhaushaltsmodelle vor.

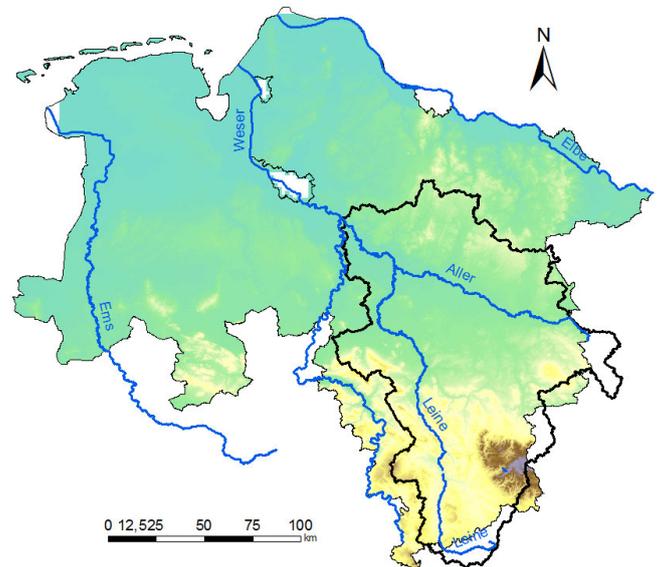


Abbildung 2-2: Niedersachsen mit Einzugsgebiet von Aller und Leine inkl. Harz

## 2.5 Datengrundlage

Eines der wesentlichen Ziele von KliBiW ist die nachhaltige Zusammenstellung von Grundlagendaten für die Bewertung und Analyse des gegenwärtigen und zukünftigen Klimas sowie der daraus resultierenden wasserwirtschaftlichen Verhältnisse im niedersächsischen Binnenland. Zu diesem Zweck wurden sämtliche verfügbaren klimatologischen und hydrologischen Informationen über die Betrachtungsräume gesammelt. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Stationszeitreihen von gemessenen Klimagrößen und Abflüssen. Gegenüber KliBiW Phase 1 und 2 wurden die Zeitreihen der Tagesabflüsse bis Ende 2011 verlängert, um das besonders trockene Jahr 2011 mit zu erfassen. Für die Darstellung der zukünftigen Klimaentwicklung wurden zwei bzw. drei verschiedene Klimamodelldatensätze herangezogen. Die Datensätze stammen zum einen vom statistischen Modell WETTREG2006 (Spekat et al., 2007), zum anderen vom dynamischen Modell REMO mit den Rechenläufen 1 (UBA, Jacob et al. 2008) und 2 (BfG, Nilson et al. 2009). Beide Regionalmodelle werden von dem Globalmodell ECHAM5/MPI-OM angetrieben. Weiterfüh-

rende Informationen hierzu befinden sich im Anhang 15. Alle Klimamodelldaten repräsentieren das Szenario A1B, ein hinsichtlich der zukünftigen klimatischen Entwicklung „gemäßigtes“ Szenario. Sämtliche Klimadaten lagen für ganz Niedersachsen sowie vereinzelt für Bereiche außerhalb davon vor, etwa für den Teil des Aller-Gebietes in Sachsen-Anhalt sowie den thüringischen Bereich des Leine-Gebietes (vgl. Abbildung 2-3). Die Daten lagen zumeist in geprüfter Form vor,

wurden aber bzgl. ihrer Verwendbarkeit bei den einzelnen Untersuchungen und Analysen zum Teil nochmals validiert. Hinzu kamen verschiedene Geodaten, z.B. Landnutzungsdaten und digitale Geländehöhen. Wie viele der verfügbaren Daten innerhalb der einzelnen Teiluntersuchungen verwendet wurden, wird in den Kapiteln 3 und 4 erläutert. Eine Übersicht der Datenbasis ist in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Tabelle 2-1: Datenbasis für das Projekt KliBiW Phase 3

	Herkunft	Daten	Räumliche Auflösung (Anzahl)	Zeitliche Auflösung	Zeitraum
MESS-DATEN	DWD	Niederschlag	Stationsdaten (771)	Tageswerte	1951-2011
	DWD	Temperatur	Stationsdaten (68)	Stundenwerte	1949-2011
	DWD	Klimadatensatz *)	Stationsdaten (123)	Tageswerte	1890-2011
	GLD	Abfluss-Pegel	Stationsdaten (339)	Tageswerte	1831-2011
	NLWKN	AKN Lagebericht	Stationsdaten (471)	-	2012
MODELL-DATEN	CEC	WETTREG2006; A1B (Niederschlag)	Stationsdaten (159)	Tageswerte	1961-2100
	CEC	WETTREG2006; A1B (Klima) **)	Stationsdaten (36)	Tageswerte	1961-2100
	MPI	REMO_UBA; A1B ***)	10x10 km	Stundenwerte	1951-2100
	MPI	REMO_BFG; A1B ***)	10x10 km	Stundenwerte	1951-2100
GEO-DATEN	NLWKN	Gewässernetz	-	-	-
	NLWKN	Hydrographische Karte	-	-	-
	NLWKN	Wasserkoerper	-	-	-
	NLWKN	Wasserkoerper-EZG	-	-	-
	LGN	DLM25	1:25000	-	-
	LGN	DGM5	5x5m	-	-
	LGN	DTK25	1:25000	-	-
	LGN	TK50	1:50.000	-	-
	LGN	TK100	1:100:000	-	-

\*) Wind, Luftdruck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Schneehoehe, Temperatur, Feuchte, Dampfdruck, Bedeckungsgrad, Wolkendichte

\*\*) Bedeckungsgrad, Dampfdruck, Feuchte, Luftdruck, Sonnenscheindauer, Temperatur, Wind

\*\*\*) Globalstrahlung, Nettostrahlung, Niederschlag, Feuchte, Temperatur, Wind



Abbildung 2-3: Räumliche Übersicht zur Datengrundlage. Links: Verfügbare Pegel in Niedersachsen. Mitte: verfügbare Niederschlagstationen in Niedersachsen. Rechts: verwendete Klimamodellstationen (in grau: Einzugsgebiet Aller-Leine)

### 3 Bewertung der regionalen Klimaentwicklung

#### 3.1 Aufbereitung von Klima(modell)daten

##### 3.1.1 Regionalisierung der Beobachtungsdaten

Die Anwendung fachspezifischer Wirkmodelle erfordert in der Regel Zeitreihen unterschiedlicher Klimavariablen als Eingangsdaten. Zum Beispiel sind für Wasserhaushaltssimulationen u.a. tägliche Werte des Niederschlags und der Lufttemperatur erforderlich. Die diesbezüglich wichtigste Datenbasis in Deutschland sind die Stationsmessungen des DWD (s. Kapitel 2.5). Bei den Aufzeichnungen des DWD handelt es sich im Allgemeinen um Punktmessungen an den Standorten der jeweiligen Station. In der Regel werden für groß- und mesoskalige Betrachtungen jedoch flächenmäßige Mittelwerte der Eingangsdaten benötigt. Ein gängiger Weg, flächenhafte Eingangsdaten zu generieren, ist die Regionalisierung. Hierbei werden die Werte der einzelnen Klimavariablen für jeden Zeitschritt auf ein Raster mit einer entsprechenden räumlichen Auflösung interpoliert. Zeitreihen von räumlich gemittelten Werten können dann im Anschluss für beliebige Gebiete ausgelesen werden.

Die im Rahmen des Projekts regionalisierten Beobachtungsdaten umfassen den Zeitraum von Januar 1950 bis November 2011. Speziell in Phase 3 erfolgte eine Verlängerung der Regionalisierungsperiode für die Beobachtungsdaten von 2009 bis 2011. Die Zeitreihen der Tageswertstationen folgender Klimavariablen wurden unter Verwendung geostatistischer Methoden auf ein Raster mit der räumlichen Auflösung von 1 x 1 km interpoliert: Niederschlag (pcp), mittlere/minimale/maximale Tagestemperatur (tav/tmi/tma), relative Luftfeuchte (hum), Sonnenscheindauer (sun) und Windgeschwindigkeit (win). Einzelheiten bezüglich der Interpolation sind in Haberlandt et al. (2013) zu finden. Die Interpolation von WETTREG erfolgte in Phase 2. Der Vollständigkeit halber erfolgt im Folgenden eine kurze Beschreibung der Vorgehensweise.

Die folgenden Verfahren wurden jeweils für die räumliche Interpolation der einzelnen Variablen mittels Kreuzvalidierung getestet:

- Nächster Nachbar (NN)
- Inverse-Distanz-Gewichtung (InvD)
- Ordinary Kriging (OK)
- External Drift Kriging (EDK)

Hierbei wird sukzessive für jeden Stationsstandort interpoliert, wobei der Wert der Klimavariablen an der entsprechenden Station weggelassen wird und nur die Nachbarstationen verwendet werden. Aus Zeitreihen beobachteter ( $Z$ ) und durch Interpolation geschätzter Werte ( $Z^*$ ) lassen sich dann Fehlerstatistiken berechnen und letztendlich die Qualität der Interpolation bewerten. Ein gängiges Gütekriterium hierfür ist das sogenannte Nash-Sutcliffe Effizienzkriterium [3-1] mit einem Wertebereich zwischen  $-\infty$  und 1. Je höher der Wert des Kriteriums, desto besser ist die Interpolationsqualität.

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z(u_i) - Z^*(u_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z(u_i) - \bar{Z}(u))^2} \quad [3-1]$$

Das Verfahren External Drift Kriging erlaubt die Berücksichtigung von Zusatzinformationen für die Interpolation. Für die Kreuzvalidierungsuntersuchungen wurden hier die Informationen eines digitalen Geländemodells verwendet. Die geostatistischen Methoden Ordinary Kriging und External Drift Kriging erfordern eine Variogrammschätzung, d.h. die Bestimmung der räumlichen Persistenz der entsprechenden Variablen vor der Interpolation.

Für den Niederschlag wurde vor der Interpolation eine Korrektur des täglichen systematischen Messfehlers nach einem Verfahren von Richter (1995) vorgenommen. Die vom DWD gemessenen Winddaten sowie die Daten der regionalen Klimamodelle werden als Windstärke bezogen auf die Beaufort-Skala herausgegeben. Für die hydrologische Modellierung wird zu meist jedoch nicht die Windstärke sondern die Windgeschwindigkeit benötigt, sodass eine Umrechnung mit einer Näherungsbeziehung (DVWK-Merkblatt 238/1996) vor der Interpolation erfolgte. Da viele Modelle nicht die als Beobachtung zur Verfügung stehende Sonnenscheindauer als Eingangsdaten benötigen, sondern die Globalstrahlung, wurde im Anschluss an die Interpolation eine Umwandlung vorgenommen. Dabei wurde nach DVWK-Merkblatt 238/1996 (S.43)

eine Formel nach Ångström (1924) verwendet. Wenn die minimale ( $t_{mi}$ ), maximale ( $t_{ma}$ ) und mittlere Tages-temperatur ( $t_{av}$ ) unabhängig voneinander interpoliert werden, dann kann dies dazu führen, dass das Konsistenzkriterium  $t_{mi} \leq t_{av} \leq t_{ma}$  an einzelnen Rasterpunkten nicht für jeden Zeitschritt erfüllt ist. Deshalb wurde zuerst die mittlere Tagestemperatur interpoliert. Für  $t_{mi}$  und  $t_{ma}$  erfolgte dann eine Interpolation der Differenzen zu dieser und eine anschließende Subtraktion bzw. Addition der Differenzen zum Mittelwert. Abbildung 3-1 liefert einen Überblick über die Ergebnisse des NSC-Kriteriums bei der Kreuzvalidierung. Es wurde anschließend jeweils das beste Verfahren für die Interpolation ausgewählt. Für Niederschlag, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit wurde die beste Interpolationsgüte mit OK erreicht. EDK erzielte das beste Ergebnis für die Interpolation der relativen Luftfeuchte und der Temperaturvariablen.

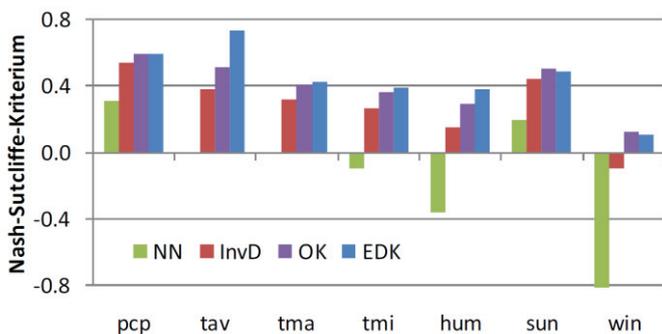
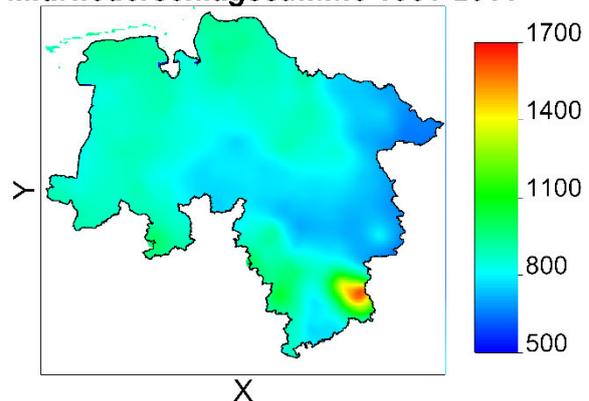


Abbildung 3-1: Kreuzvalidierung der Interpolationsverfahren unter Angabe des Nash-Sutcliffe Effizienzkriteriums für den Zeitraum von 1981 bis 1985 (Beobachtungsdaten)

Im Anschluss erfolgte eine Prüfung der interpolierten Raster. Für ausgewählte Stationen wurden Scatterplots zwischen der beobachteten Stationszeitreihe und der Zeitreihe des entsprechenden Rasterpunkts erstellt (siehe Haberlandt et al., 2013). Zusätzlich erfolgte die Erstellung von Karten des langjährigen Mittels der Klimagrößen. Abbildung 3-2 enthält exemplarisch die Karten des langjährigen Mittels der mittleren Tagestemperatur und der jährlichen Niederschlagssumme.

**Mit. Niederschlagssumme 1951-2011**



**Mit. Temperatur 1951-2011**

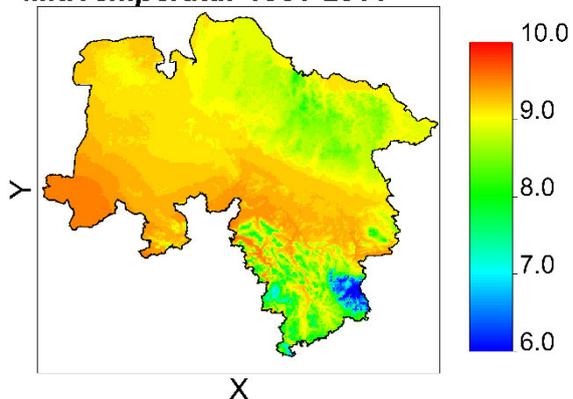


Abbildung 3-2: Karten der langjährigen Mittelwerte aus den Beobachtungsdaten von mittlerem Jahresniederschlag (Einheit in mm) und mittlerer Tagestemperatur (Einheit in °C)

### 3.1.2 Regionalisierung der Klimamodelldaten

Im Folgenden ist die Regionalisierung des WETTREG2006-Datensatzes für das Untersuchungsgebiet Niedersachsen zusammenfassend beschrieben. Haberlandt et al. (2013) enthält detailliertere Angaben diesbezüglich.

Bei WETTREG2006 handelt es sich um ein statistisches Downscaling des globalen Klimamodells ECHAM5. Im Allgemeinen wird bei statistischem Herunterskalieren der Zusammenhang zwischen großräumigen Wetterlagen und lokalen Beobachtungen hergestellt und für die Generierung der Zeitreihen der Klimavariablen verwendet. Zur Erhöhung der statistischen Sicherheit enthält WETTREG2006 10 Realisationen. Jede Dekade des Datensatzes wird durch eine generierte Zeitreihe mit einer Länge von 7300 Tagen (20 Jahre) repräsentiert. Für die hier beschriebene Regionalisierung wurde angenommen, dass jeweils 20

Realisierungen zu 10 Jahre für die zwei Perioden vorhanden sind.

Es wurde jeweils eine Interpolation aller 20 Realisierungen des 20C-Kontrolllaufs (Zeitraum: 1961 bis 2000) und aller 20 Realisierungen des SRES-Emissionsszenarios A1B (Zeitraum: 2001 bis 2100) durchgeführt. Im Vergleich zur Interpolation der Beobachtungsdaten wurde eine gröbere räumliche Auflösung von 5 x 5 km gewählt. Wie bei den Beobachtungsdaten wurden die Klimavariablen Niederschlag (pcp), mittlere/minimale/maximale Tagestemperatur (tav/tmi/tma), relative Luftfeuchte (hum), Sonnenscheindauer (sun) und Windgeschwindigkeit (win) interpoliert, wobei die gleichen Methoden hinsichtlich der Niederschlagskorrektur, Umwandlung von Sonnenscheindauer in Globalstrahlung und Konsistenz der Temperaturvariablen verwendet wurden.

Die Auswahl der Interpolationsmethode erfolgte ebenfalls anhand der Kreuzvalidierungsergebnisse, wobei die Kreuzvalidierung wieder mit NN, InvD, OK und EDK durchgeführt wurde. Abbildung 3-3 zeigt das Nash-Sutcliffe Effizienzkriterium. Es wurde jeweils das Verfahren mit der besten Interpolationsqualität für die finale Interpolation verwendet.

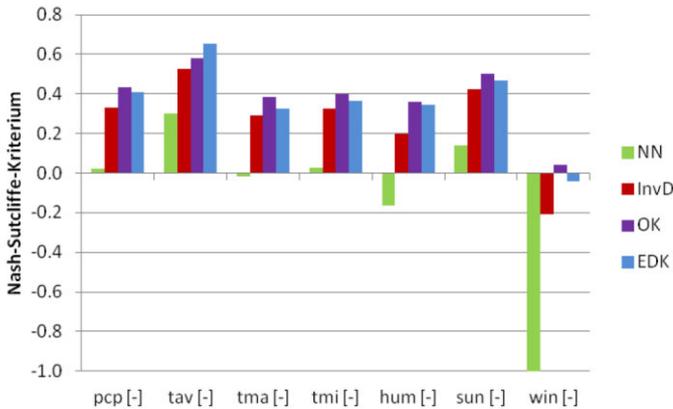


Abbildung 3-3: Kreuzvalidierung der Interpolationsverfahren unter Angabe des Nash-Sutcliffe Effizienzkriteriums für den Zeitraum von 1981 bis 1985 (WETTREG2006)

Bei allen Variablen bis auf die mittlere Tagestemperatur (tav) wurde das beste Ergebnis mit OK erreicht. Temperaturdifferenzen tmi – tav und tma – tav wurden im Gegensatz zu den Beobachtungsdaten mit OK interpoliert. Für tma und tmi resultiert hieraus ein kombiniertes Interpolationsverfahren, da tav mit EDK interpoliert wurde.

Die Plausibilität der Interpolationsraster wurde ebenfalls mit Scatterplots und Karten langjähriger Mittelwerte getestet. Abbildung 3-4 enthält exemplarisch die

Karten der langjährigen Mittel der mittleren Tagestemperatur und der jährlichen Niederschlagssumme aus der ersten Realisation des 20C-Laufs.

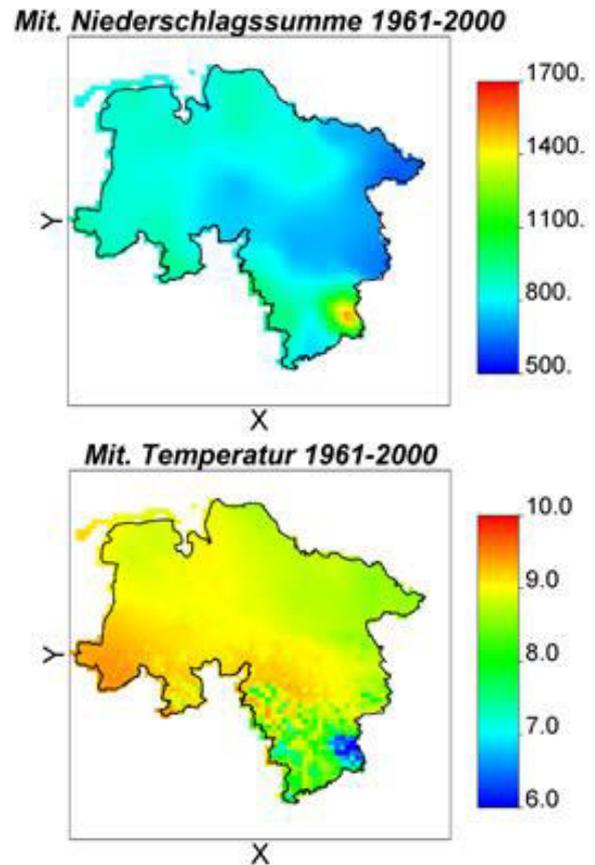


Abbildung 3-4: Karten der langjährigen Mittelwerte aus dem 20C-Lauf der ersten WETTREG2006-Realisation von mittlerem Jahresniederschlag (Einheit in mm) und mittlerer Tagestemperatur (Einheit in °C)

### 3.1.3 Auswahl von WETTREG-Realisationen

WETTREG ist ein statistisches Regionalisierungsverfahren, dessen Realisationen im Grunde jeweils eine mehr oder weniger repräsentative Stichprobe aus der Grundgesamtheit möglicher Klimaentwicklungen darstellen. Aufgrund der natürlichen Klimavariabilität, d.h. der zeitlichen, nicht anthropogen bedingten Schwankungen im Klimasystem um einen Mittelzustand sowie den damit verbundenen Unsicherheiten in der zukünftigen Klimaentwicklung, kann in der Theorie nur ein Ensemble von Modellläufen eine repräsentative Darstellung der möglichen Zukunft gewährleisten.

WETTREG2006 umfasst standardmäßig je Dekade des simulierten Zeitraumes von 1961 bis 2100 10 Realisationen mit Daten von jeweils 20 Jahren. Im Zuge

der räumlichen Interpolation der Daten (s. Kapitel 3.1.2) wurden daraus 20 Realisationen mit jeweils 10 Jahren pro Dekade bzw. 140 Jahren für den Gesamtzeitraum erstellt. Um die möglichen wasserwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels in der Zukunft zu verdeutlichen, dienen diese Datenreihen als Eingangsdaten in der anschließenden Wirk- bzw. Impactmodellierung (s. Kapitel 5.2.2). Eine Langzeit-Kontinuums-Simulation mit einem komplexen Wasserhaushaltsmodell (wie PANTA RHEI) für ein Gebiet der Größe des Einzugsgebietes von Aller und Leine (rund 15.700 km<sup>2</sup>) erfordert eine hohe Rechenleistung gepaart mit einer langen Simulationsdauer. Entsprechende Ressourcen standen im Zuge von KliBiW 3 nur begrenzt zur Verfügung. Daher wurden von den Projektpartnern drei Realisationen ausgewählt, die als möglichst repräsentativ für das gesamte Ensemble aller 20 Realisationen im Hinblick auf Niedrigwasser relevante Kenngrößen gesehen werden können. D.h. die ausgewählten Realisationen sollten die Bandbreite aller Realisationen hinsichtlich oberer und unterer Grenze sowie dem Mittelwert möglichst gut abbilden.

Die Auswahl erfolgte mit Hilfe eines Modells, das statistische Zusammenhänge zur Schätzung von Niedrigwasserindizes auf Basis einer Reihe klimatischer Kenngrößen benutzt (s. Kapitel 5.2.1). Als Auswahlkriterium wurde das NM7Q bzw. das NM7Q10 herangezogen. Die Herausforderung bestand darin, drei Reali-

sationen zu identifizieren, die sowohl hinsichtlich der beiden Betrachtungszeiträume in der Zukunft (2021-2050 und 2071-2100) als auch an allen ausgewählten Referenzpegeln das oben genannte Kriterium (repräsentative Bandbreite) hinreichend erfüllten. Erste Analysen zeigten, dass es sowohl bei den Zeiträumen als auch bei den Pegeln jeweils z.T. erhebliche Unterschiede im Ranking der Realisationen gab. Daher wurde das Ranking aus beiden Zeiträumen gemittelt, und zwar über alle Referenzpegel in Niedersachsen (vgl. Abbildung 3-5). Anschließend erfolgte die Auswahl von drei Realisationen, die, bezogen auf die Zeiträume und alle Pegel, hauptsächlich eher trockenere (R10), mittlere (R06) und nassere (R09) Verhältnissen abbilden.

Das Verfahren ist nur teilweise als objektiv zu bezeichnen. Es zeigte jedoch auch, dass es trotz der Tatsache, dass alle Realisationen von WETTREG als Stichproben einer Grundgesamtheit angesehen werden können, die Ausprägungen der einzelnen Läufe bzgl. bestimmter Kenngrößen durchaus Unterschiede aufweisen. Auf Basis dieser Methode wurden schließlich drei Realisationen identifiziert, die gesamtheitlich betrachtet zumindest tendenziell eher trockenere, mittlere und nassere Verhältnisse innerhalb der Bandbreite von WETTREG2006 widerspiegeln und somit, bezogen auf die betrachteten Kenngrößen, als repräsentativ angesehen werden können.

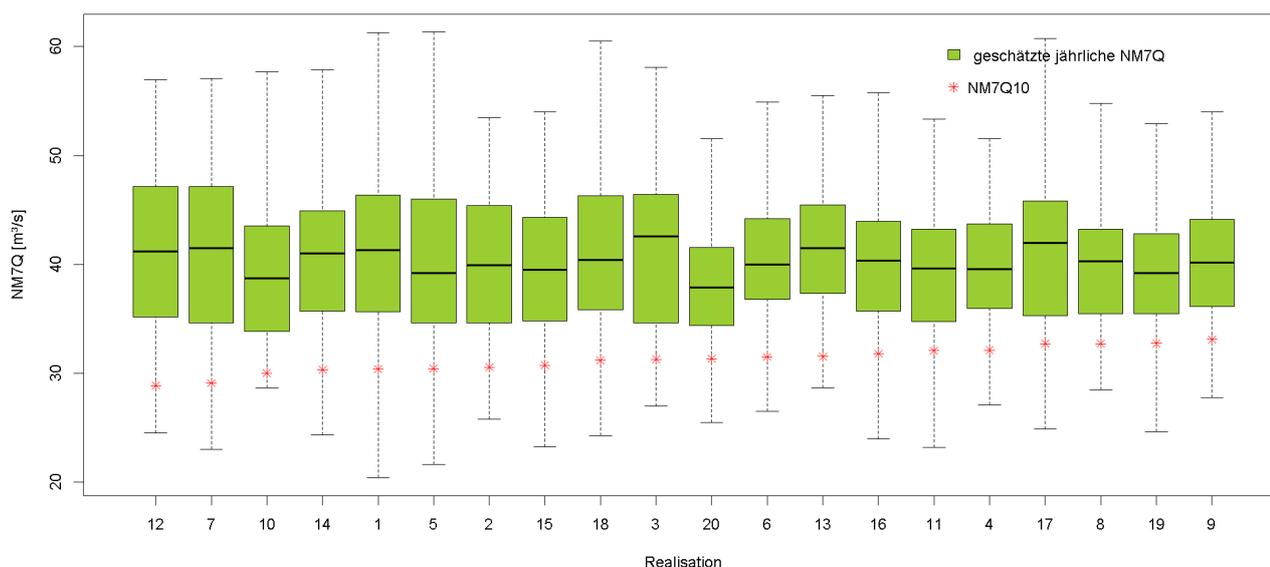


Abbildung 3-5: Ranking der 20 WETTREG-Realisationen anhand der Bandbreiten des NM7Q bzw. der Ausprägung des NM7Q10 am Pegel Rethem, abgeleitet aus dem Zusammenhang von klimatischen Kenngrößen und resultierenden Niedrigwasserindizes mittels eines statistischen Prognosemodells, auf Basis der jährlichen geschätzten NM7Q-Werte von 2021-2050 und 2071-2100

## 3.2 Analyse der Beobachtungsdaten

Der erste Schritt bei der Bewertung der regionalen Klimaentwicklung ist der Blick in die Vergangenheit. Die Analyse von Änderungen beobachteter klimatischer Größen kann Anhaltspunkt für zukünftige Entwicklungen sein. Um den Fokus der Analysen speziell auf die Niedrigwasser-relevanten Extreme der Klimavariablen legen zu können, eignet sich die Verwendung von Trockenwetterindizes. Diese werden zur Identifikation und Beschreibung von Trockenwetterperioden, d.h. Perioden mit unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen und/oder überdurchschnittlich hoher Evapotranspiration, genutzt. Ein Index stellt dabei einen spezifischen Wert für einen bestimmten Zeitraum dar, der auf unterschiedliche Weise bestimmt werden und somit Auskunft über die verschiedenen Ausprägungen der Trockenheit, wie Intensität oder Dauer in der betrachteten Periode, geben kann. Die Anpassung von Trendgeraden an Zeitreihen der Indizes kann somit Auskunft über Richtung und Stärke möglicher Veränderungen geben.

### 3.2.1 Datenbasis

Untersuchungsgebiet ist das gesamte Bundesland Niedersachsen. Als Ausgangsgrößen für die Berechnung der Indizes wurden Tageszeitreihen des Niederschlags und der mittleren und maximalen Lufttemperatur genutzt. Für eine adäquate Durchführung der Zeitreihenanalysen sowie zur Wahrung der Konsistenz mit früheren Untersuchungen (Haberlandt et al. 2010), wurde ein Beobachtungszeitraum von 55 Jahren (1951-2005) für die Analysen gewählt, für welchen 263 Niederschlags- und 18 Temperaturstationen des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung standen (vgl. Abbildung 3-6)

### 3.2.2 Methodik

Fünf Trockenwetterindizes wurden für die Trendanalysen aus den Tageszeitreihen der meteorologischen Größen extrahiert. Alle Indizes wurden sowohl auf jährlicher als auch auf saisonaler Basis für die Jahreszeiten Winter (Dezember – Februar), Frühling (März – Mai), Sommer (Juni – August) und Herbst (September – November) berechnet. Eine Übersicht über die verwendeten Indizes befindet sich in Tabelle 3-1.

Die eigentliche Trendanalyse wurde in mehreren Schritten ausgeführt. Zunächst wurde die Signifikanz der Trends an den einzelnen Stationen mit Hilfe des rangbasierten Mann-Kendall Trendtest (Kendall, 1975) ermittelt. Dieser Test ist nicht-parametrisch und legt die Nullhypothese zugrunde, dass kein Trend in der zu untersuchenden Zeitreihe enthalten ist. Die Prüfgröße, Kendalls S, berechnet sich dabei aus den Summen der Vorzeichen der Differenzen aller chronologisch geordneten Wertepaare. Die Signifikanz des Trends lässt sich mit Hilfe der standardisierten Varianz der Prüfgröße ermitteln. Liegt diese unter einem Niveau von 5% wird die Nullhypothese verworfen und der Trend gilt als signifikant. Im nächsten Schritt wurde die Trendstärke nach Theil (Theil, 1950a-c) und Sen (Sen 1968) geschätzt. In diesem wiederum nicht-parametrischen Verfahren wird die Steigung des Trends als Median der Steigungen der Linien durch alle möglichen Punktepaare berechnet.



Abbildung 3-6: Lage der verwendeten Niederschlags- (oben) und Temperaturstationen (unten)

Tabelle 3-1: Liste der betrachteten Trockenwetterindizes

Index	Abkürzung	Einheit	Beschreibung
Standardized Precipitation Index	SPI	-	Abweichung der Niederschlagssumme vom Normalwert (nach McKee et al. 1993)
Maximale Trocken-dauer	DSDmax	d	Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Niederschlag < 1 mm/d
Mittlere Temperatur	Tav	°C	Mittelwert der Tagesmittelwerte der Temperatur
Maximale Hitzewel-lendauer	HWDmax	d	Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Maximaltemperatur > 90%-Quantil des Kalendertages
Trockenheitsindex	ETP/P	-	Verhältnis der mittleren potentiellen Eva-potranspiration zur mittleren Niederschlags-menge.

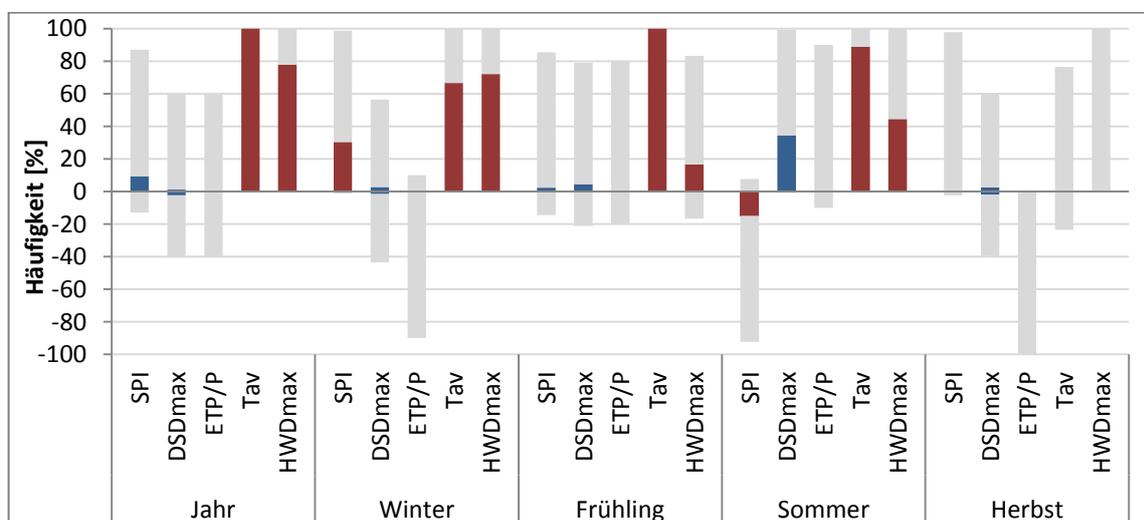


Abbildung 3-7: Ergebnisse des Mann-Kendall-Trendtests. Die gesamte Anzahl an Trends ist in grau, die Anzahl lokal signifikanter Trends in blau, feldsignifikante Trends in rot dargestellt

Um die Möglichkeit des zufälligen Auftretens lokaler signifikanter Trends einzuschätzen, wurde zusätzlich zu den lokalen Trends an den einzelnen Stationen, die globale Signifikanz für das gesamte Untersuchungsgebiet untersucht. Der angewandte globale Signifikanztest basiert auf der Nullhypothese, dass die Zeitreihen aller Stationen im Untersuchungsgebiet stationär sind. Abgelehnt wird die Nullhypothese unter einem regionalen Signifikanzniveau, welches mit Hilfe der Verteilung der Anzahl lokaler signifikanter Trends ermittelt werden kann. Diese Verteilung wird in einem Bootstrapping-Verfahren (Efron, 1979) wie folgt geschätzt: Zunächst wird die Reihenfolge der Jahre durch Ziehen mit Zurücklegen zufällig festgelegt. Entsprechend der neuen Jahresfolge werden die Zeitreihen an allen Stationen im Untersuchungsgebiet angeordnet. Im nächsten Schritt wird der Mann-Kendall-Trendtest an allen Station ausgeführt und die Anzahl

der signifikanten Trends gezählt. Dieses Vorgehen wurde insgesamt 1.000 Mal wiederholt, um so die empirische Verteilungsfunktion der Anzahl der signifikanten Trends ermitteln zu können. Das 95%-Quantil gibt die Anzahl der signifikanten Trends an, die erreicht werden müssen, um global signifikant zu sein, d.h. nicht zufällig aufzutreten. Bei diesem Verfahren wird durch äquivalente Permutation der Zeitreihen zudem die räumliche Korrelation zwischen den einzelnen Stationen berücksichtigt. So kann eine übersteigerte Anzahl lokaler signifikanter Trends aufgrund von räumlicher Abhängigkeit relativiert werden.

### 3.2.3 Ergebnisse

Abbildung 3-7 zeigt die Ergebnisse des Mann-Kendall Trendtests für die fünf Trockenwetterindizes in den vier Jahreszeiten und im Gesamtjahr. Die eindeutigs-

ten Aussagen über die Trendrichtung können für die temperaturbasierten Indizes Tav und HWDmax getroffen werden. Die mittlere Temperatur zeigt, mit Ausnahme des Herbstes, in allen Saisons signifikante Anstiege an einem Großteil der Stationen im Untersuchungsgebiet. Ähnlich verhalten sich die Trends in der maximalen Hitzewellendauer, die, ebenfalls mit Ausnahme des Herbstes, durchweg positiv und feldsignifikant ausfallen. Die ermittelten Trends im SPI sind überwiegend positiv. Globale Signifikanz der Anstiege kann jedoch nur im Winter festgestellt werden. Im Sommer sinkt der SPI an der Mehrzahl der Stationen. Die Abnahme ist feldsignifikant. Die maximale Trockendauer zeigt weniger eindeutige Ergebnisse in den einzelnen Saisons. Bis auf den Sommer gleichen sich die Anzahl lokaler positiver und negativer Trends weitestgehend aus. Im Sommer jedoch konnten Zunahmen an allen 263 Stationen festgestellt werden. Änderungen im Trockenheitsindex sind in keiner Saison lokal oder global signifikant. Tendenzen weisen jedoch auf einen Anstieg in Frühling und Sommer sowie auf eine Abnahme in Herbst und Winter hin. Gesamtjährliche Änderungen sind nicht eindeutig.

Die absoluten mittleren Änderungen der Trockenwetterindizes sind in Tabelle 3-2 aufgelistet. Im Falle des SPI ist erkennbar, dass die winterlichen Zunahmen (+0,78) im Mittel weitaus größer ausfallen als die sommerlichen Abnahmen (-0,48), während die maximale Trockendauer mit 3,27 Tagen die größte Zunahme im Sommer zeigt. Die mittlere Temperatur und die maximale Hitzewellendauer weisen mit durchschnittlichen 1,84°C, bzw. 3,58 Tagen, die größten Anstiege im Winter auf. Obwohl nicht signifikant, sinkt der Trockenheitsindex im Herbst stark mit einer mittleren Abnahme von 3,29.

Räumliche Muster in der Trendverteilung sind vor allem in den niederschlagsbasierten Indizes SPI und DSDmax zu erkennen. Wie Abbildung 3-8 zeigt, ist die winterliche Zunahme des SPI flächendeckend. Die sommerliche Abnahme hingegen beschränkt sich vornehmlich auf den südöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes hinsichtlich Stärke und Signifikanz.

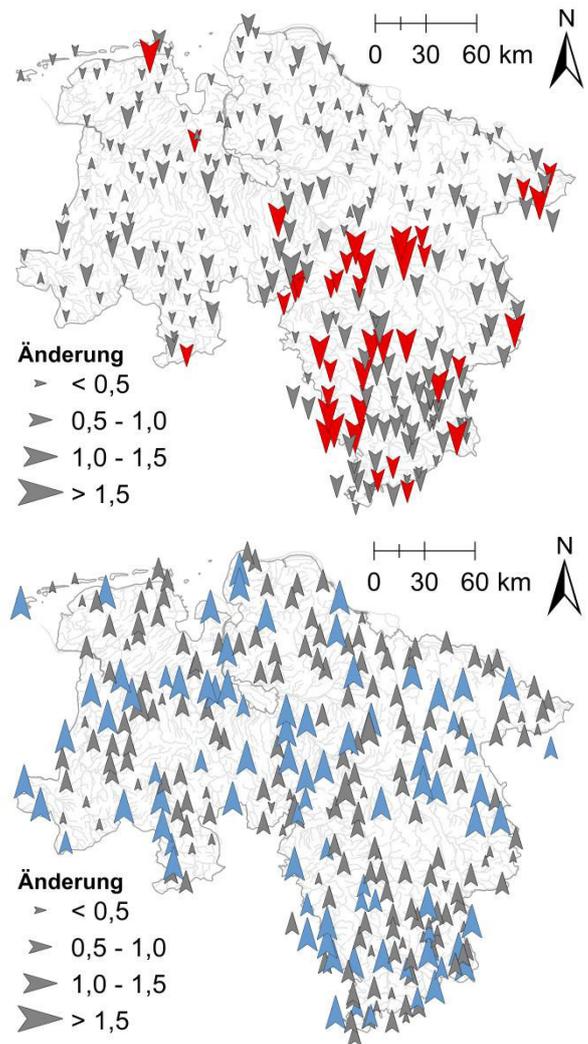


Abbildung 3-8: Räumliche Verteilung der Trendstärke nach Teil-Sen für den Standardized Precipitation Index im Sommer (oben) und Winter (unten) im Zeitraum 1951-2005. Signifikant negative Trends sind rot, signifikant positive Trends blau markiert

Tabelle 3-2: Absolute Änderungen der Trockenwetterindizes für das Jahr und die einzelnen Saisons geschätzt nach Teil-Sen, gemittelt über alle Stationen

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Jahr
SPI [-]	+0,78	+0,28	-0,48	+0,70	+0,53
DSDmax [d]	+0,12	+1,19	+3,27	-1,65	-0,73
ETP/P [-]	+0,06	+0,18	-0,20	-3,29	-0,70
Tav [°C]	+1,84	+1,80	+1,41	+0,42	+1,31
HWDmax [d]	+3,58	+0,84	+2,10	+1,43	+3,10

Die Trends in der maximalen Trockendauer hingegen sind eher im Sommer über ganz Niedersachsen gleichverteilt, wie in Abbildung 3-9 zu sehen ist. Lediglich die nordwestlichen Stationen weisen geringere Stärke und fehlende Signifikanz auf. Die Verteilung der Trends im Winter zeigt eine klare Trennung zwischen positiven Trends in der nordwestlichen und negativen Trends in der südwestlichen Hälfte des Landes. Der winterliche Anstieg des DSDmax im Nordwesten bei simultaner Zunahme des SPI, lässt auf eine Umverteilung des Winterniederschlags zu weniger häufigen Niederschlagsereignissen mit größeren Niederschlagsmengen schließen.

Die Temperaturindizes zeigen eine weitaus homogenere Verteilung in Bezug auf Signifikanz, Stärke und Richtung der Trends. Auffällig ist lediglich das Muster im HWDmax, das in Abbildung 3-10 am Beispiel des jährlichen HWDmax dargestellt ist. Hier ist ein Gradient von starken, signifikanten Anstiegen im Nordwesten zu nicht signifikanten, schwächeren Trendsteigungen im Westen zu erkennen.

### 3.2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Ergebnisse der Trendanalysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Trends in den Niederschlagsindizes SPI und DSDmax weisen auf eine starke Zunahme der Niederschlagsmenge und -häufigkeit im Winter sowie eine Abnahme im Sommer hin. Über das Gesamtjahr betrachtet steigt der Niederschlag.
- Die Temperaturindizes zeigen positive Trends in allen Saisons und in ganz Niedersachsen. Die Anstiege sind im Winter am größten.
- Trends in Temperatur- und Niederschlagsindizes zeigen Unterschiede zwischen der nordwestlichen und südöstlichen Hälfte Niedersachsens. Der südöstliche Teil ist wesentlich von den sommerlichen Niederschlagsabnahmen betroffen, während im nordwestlichen Teil ganzjährig stärkere Anstiege in der Hitze-wellendauer zu verzeichnen sind.

Detaillierte Auswertungen und weitere Untersuchung finden sich in Fangmann et al. (2013).

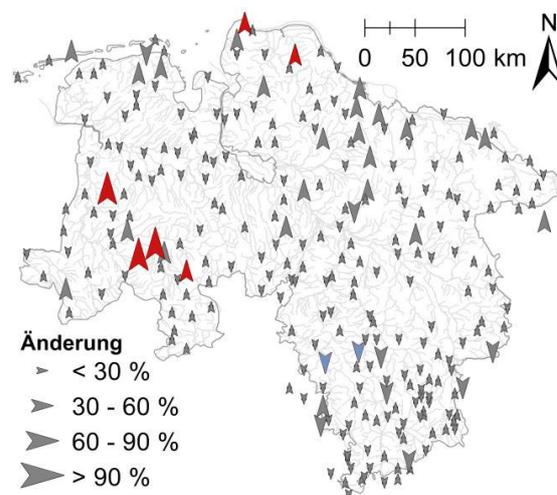
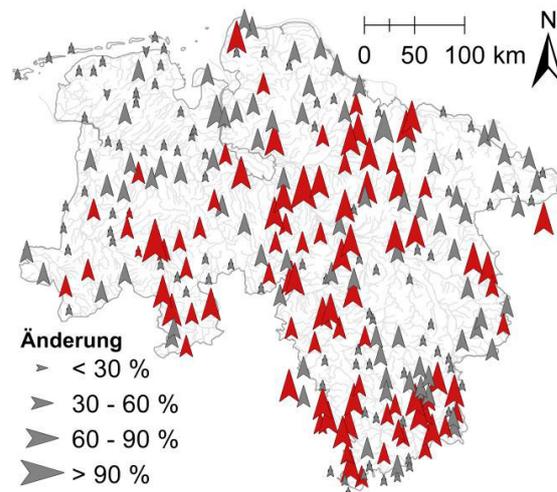


Abbildung 3-9: Räumliche Verteilung der Trendstärke nach Theil-Sen für die maximale Trockendauer im Sommer (oben) und Winter (unten) im Zeitraum 1951-2005. Signifikant positive Trends sind rot, signifikant negative Trends blau markiert

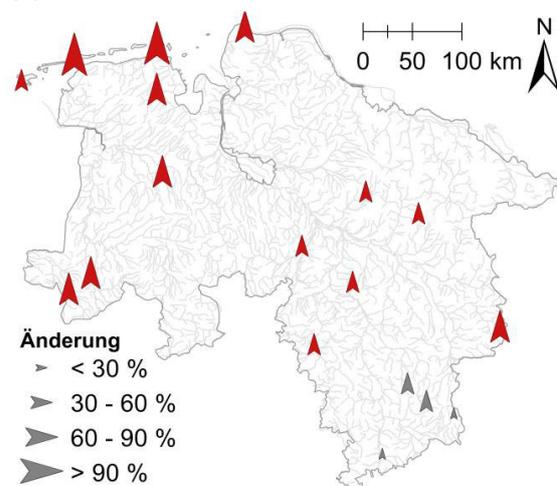


Abbildung 3-10: Räumliche Verteilung der Trendstärke nach Theil-Sen für die maximale Hitzewellendauer im Gesamtjahr im Zeitraum 1951-2005. Signifikante Trends sind rot markiert

### 3.3 Das Modell-Ensemble von KliBiW 3

#### 3.3.1 Festlegung der Ensemble-Mitglieder

Klimamodelldaten zeigen stets nur ein vereinfachtes (modellhaftes) Abbild des realen Klimas aus Vergangenheit, Gegenwart oder Zukunft.

Aufgrund des begrenzten Wissens über die Prozesse und Wechselwirkungen innerhalb des Klimasystems sowie die unterschiedlichen Ansätze und Umsetzungen der bekannten Prozesse in den Klimamodellen, kann es zu Abweichungen zwischen den Ergebnissen der einzelnen Modelle kommen (Modellunsicherheit). Die Bandbreite möglicher Entwicklungen von klimatischen Kenngrößen wird daher häufig in Form von Modell-Ensembles dargestellt. Die Interpretation dieser Bandbreite erweist sich jedoch häufig als ebenso unsicher wie schwierig (Knutti, 2008). Um die Aussagekraft dieser Bandbreite bzw. die Verlässlichkeit einzelner Ensemble-Mitglieder näherungsweise bewerten zu können, gibt es verschiedene Ansätze (vgl. u.a. Merz, 2012; Bronstert, 2007).

Die Qualität der Wiedergabe der aktuellen Klimaverhältnisse ist dabei eines der Bewertungskriterien. Da eine entsprechende Betrachtung aller für Deutschland verfügbaren regionalen Klimamodelldaten aufgrund der begrenzten Ressourcen im Zuge des KliBiW-Projektes nicht möglich war, erfolgte zunächst eine Vorauswahl. Es wurden folgende regionale Klimamodelldaten in das Ensemble von KliBiW einbezogen (alle mit dem Szenario A1B):

- ECHAM5 Lauf 1 – REMO (UBA)
- ECHAM5 Lauf 2 – REMO (BfG)
- ECHAM5 Lauf 1 – WETTREG2006

Anschließend erfolgte eine erste Bewertung der Ensemble-Mitglieder in KliBiW Phase 2 für den Bereich des Einzugsgebietes von Aller und Leine (vgl. NLWKN, 2012).

Im Zuge von KliBiW Phase 3 wurde überlegt, dieses Ensemble um den Modelllauf ECHAM5 Lauf 3 – REMO (ENS) zu erweitern. Dazu wurde dieser Datensatz zunächst in gleicher Weise aufbereitet (regionalisiert) wie die anderen Ensemble-Mitglieder (s. Kapitel 3.1.2). Anschließend erfolgte eine erste Prüfung der Daten auf Plausibilität. Dazu wurden die Klimagrößen Temperatur und Niederschlag der Beobachtung und des bisherigen Modell-Ensembles den Werten des neuen Modelllaufs gegenübergestellt.

Abbildung 3-11 zeigt zunächst die Bandbreite der über Niedersachsen gemittelten Zeitreihen der Jahreswerte der entsprechenden Klimagrößen als Box-Whisker Plot. Hierbei markiert der mittlere (rote) Balken den Median aller Jahreswerte, die (blaue) Box den Bereich vom 25%- bis 75%-Quantil, also das mittlere Quartil, und die sog. Antennen (engl. Whisker) die darüber bzw. darunter liegenden Werte. Es ist zu erkennen, dass weder bei der Temperatur noch beim Niederschlag der neue REMO-Lauf (ENS) gegenüber den bisherigen Ensemble-Mitgliedern besonders auffällig ist bzw. als Ausreißer einzustufen ist, auch wenn er bei der Temperatur knapp den oberen Rand des Ensembles neu definiert.

Anders sieht es bei der Betrachtung der räumlichen Muster der gemittelten Werte aus (vgl. Abbildung 3-12). Bei der Temperatur sind grundsätzlich ähnliche Strukturen bei den Beobachtungsdaten und den Daten von REMO (ENS) zu erkennen, auch wenn die Absolutwerte des REMO-Laufs insgesamt höher liegen als die der Beobachtung. Bei den langjährigen Niederschlagsmustern zeigen sich jedoch zum Teil deutliche Unterschiede. Zum einen liegen die Absolutwerte von REMO (ENS), speziell im Küstenbereich, wesentlich über denen der Beobachtung. Zum anderen scheint der Niederschlags Schwerpunkt über dem Harz bei REMO (ENS) um etwa eine bis anderthalb Rasterzellen (also rund 10 bis 15 km) in südwestlicher Richtung gegenüber der Beobachtung verschoben. Dies könnte wiederum erhebliche Unterschiede bei den resultierenden (Niedrigwasser-)Abflussverhältnissen im Betrachtungsraum Aller-Leine Einzugsgebiet verursachen, abhängig davon, ob sich die Niederschläge gleichmäßig über dem Harz verteilen (Beobachtung) oder ob ein wesentlicher Teil über den Südharz in die Leine abfließt, während Oker und Aller im Norden weniger Niederschlag erhalten (REMO ENS).

Aufgrund dieser räumlichen, zunächst nicht plausibel erscheinenden Verschiebung der Abflussverhältnisse, die sich möglicherweise gleichermaßen „falsch“ in der Zukunft fortsetzen würde, wurde von den Projektpartnern entschieden, den Modelllauf REMO (ENS) aus dem Ensemble von KliBiW Phase 3 auszuschließen.

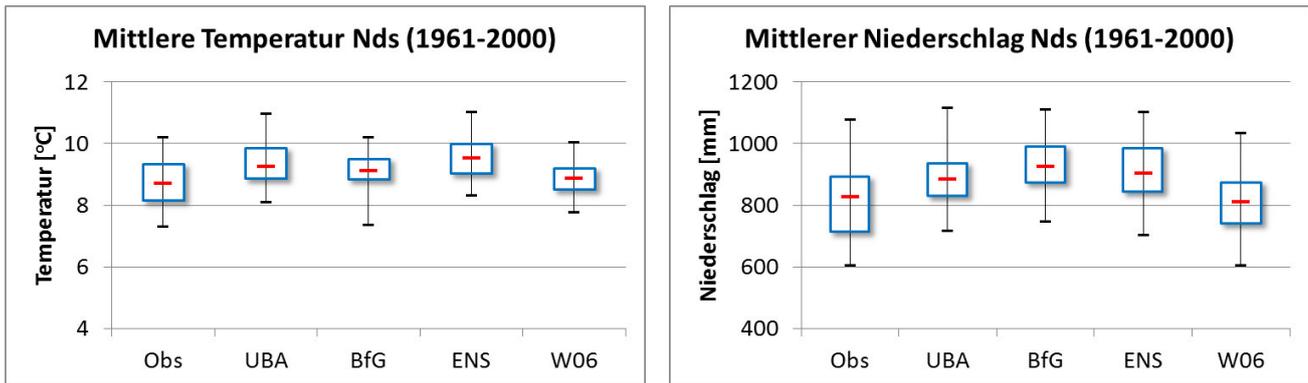


Abbildung 3-11: Bandbreiten verschiedener Klimagrößen aus Beobachtung und regionalen Klimamodellen, gemittelt über Niedersachsen, über den Zeitraum 1961-2000; links: Temperatur, rechts: Niederschlag; Obs: Beobachtung, UBA: ECHAM5 Lauf 1 / REMO, BfG: ECHAM5 Lauf 2 / REMO, ENS: ECHAM5 Lauf 3 / REMO, W06: ECHAM5 Lauf 1 / WETTREG2006

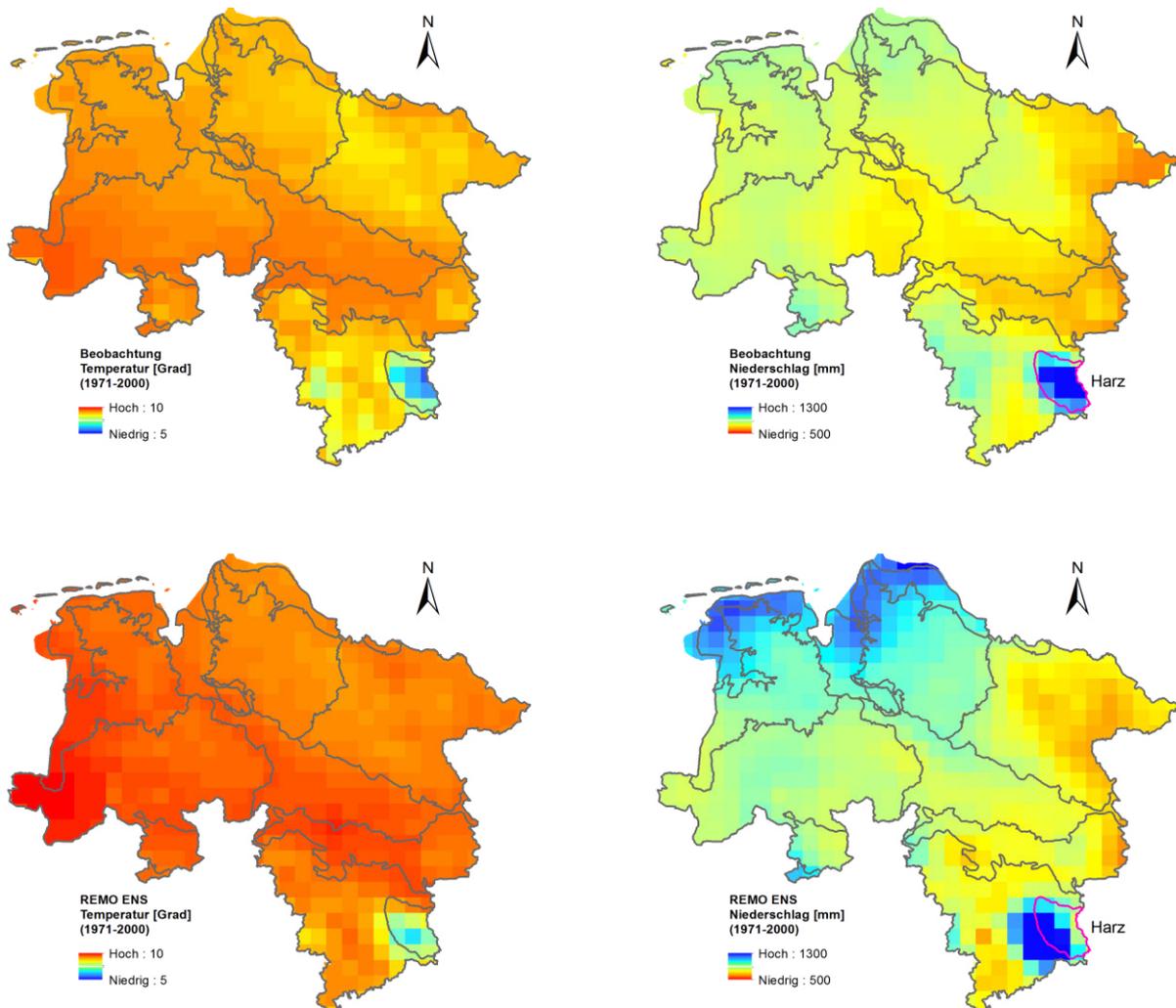


Abbildung 3-12: räumliche Muster der langjährigen mittleren Temperatur (links) und Niederschläge (rechts) von Beobachtung (oben) und ECHAM Lauf 3 / REMO-ENS (unten) über den Zeitraum 1971-2000; die grauen Linien umgrenzen naturräumliche Einheiten

### 3.3.2 Stellung des KliBiW-Ensembles innerhalb der Bandbreite heutiger Klimaprojektionen

Nach der Veröffentlichung des 4. Sachstandsberichts des IPCC (IPCC, 2007) stand für Europa im Zuge des ENSEMBLES Projektes (van der Linden, 2009) ein Ensemble von regional hochaufgelösten Klimaprojektionen zur Verfügung. Speziell für die Region Deutschland gab es zudem eine Auswahl von dynamischen und statistischen Klimamodellen, die alle mit dem globalen Klimamodell ECHAM5/MPIOM angetrieben wurden (Roeckner et al., 2003). Diese für Deutschland heute „gängigen“ Klimaprojektionen auf Basis der SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios; Nakicenovic et al., 2000) sind in Tabelle 3-3 aufgeführt.

Um die Stellung der in KliBiW 3 benutzten Klimamodell­daten innerhalb der Bandbreite der nach heutigem Stand der Forschung möglichen Entwicklungen des Klimas einzuschätzen, wurde das Modell-Ensemble von KliBiW dem Ensemble „gängiger“ Regionalmodelle anhand der projizierten Entwicklung der mittleren Temperatur und des Niederschlags, jeweils für Niedersachsen gemittelt, über den Zeitraum 1961-2100 gegenübergestellt.

Anhand von Abbildung 3-13 wird deutlich, dass sich das KliBiW-Ensemble in Bezug auf die zukünftigen Temperatursignale ab dem Jahr 2020 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts tendenziell im mittleren Bereich der Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen bewegt und damit zukünftig weder extrem „warme“ noch extrem „kühle“ Verhältnisse projiziert. In Bezug auf die Jahresniederschlagssummen (vgl. Abbildung 3-14) zeigt das KliBiW-Ensemble ein ähnliches Verhalten. Auch hier bewegen sich die drei Modellläufe etwa im Mittelfeld möglicher Entwicklungen, wobei sie in der nahen Zukunft (2021-2050) eher in der unteren, trockeneren Hälfte zu finden sind; in der fernen Zukunft (2071-2100) eher in der oberen, feuchteren Hälfte des gesamten Ensembles. Beschränkt man die Betrachtung auf das hydrologische Sommerhalbjahr (vgl. Abbildung 3-15) ergibt sich ungefähr das gleiche Bild, wobei sich das KliBiW-Ensemble in der fernen Zukunft im Mittelfeld der gesamten möglichen Bandbreite bewegt. Insgesamt deckt das KliBiW-Ensemble den Szenarien-Korridor relativ gut ab,

erreicht aber kaum die maximale Bandbreite nach oben oder unten.

Tabelle 3-3: Regionale Klimamodelle aus / für Deutschland mit antreibendem Globalmodell und verfügbaren SRES-Szenarien

Regionales Klimamodell	Version	antreibendes Globalmodell	Szenario
CLM	CLM1	ECHAM5 Lauf 1	A1B, B1
	CLM2	ECHAM5 Lauf 2	A1B, B1
REMO	UBA	ECHAM5 Lauf 1	A1B, B1, A2
	BfG	ECHAM5 Lauf 2	A1B
WETTREG	2006	ECHAM5 Lauf 1	A1B, B1, A2
	2010	ECHAM5 Lauf 1	A1B, B1, A2
STARS	II	ECHAM5 Lauf 1	A1B

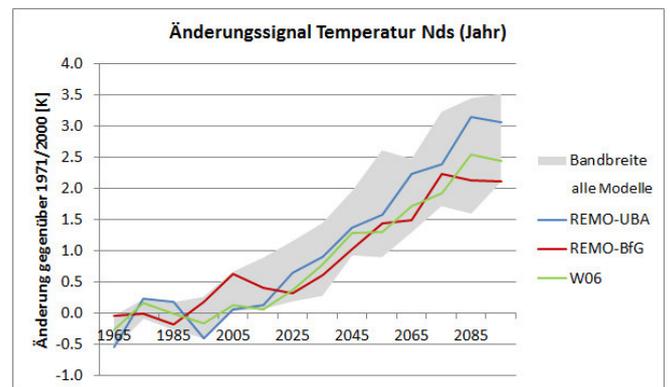


Abbildung 3-13: Änderungssignal der mittleren Jahrestemperatur für Niedersachsen; Bandbreite über 15 Regionale Klimamodelle

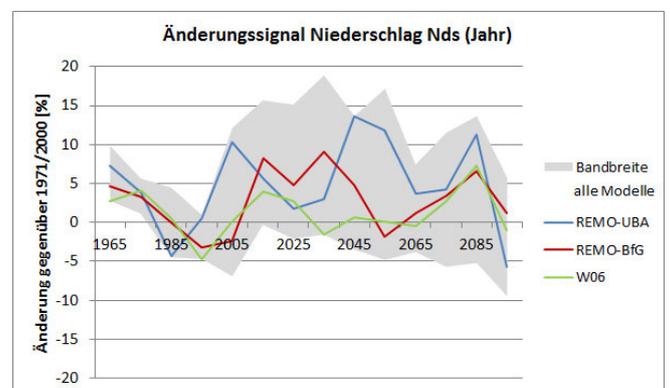


Abbildung 3-14: Änderungssignal der Jahresniederschlagssummen für Niedersachsen; Bandbreite über 15 Regionale Klimamodelle

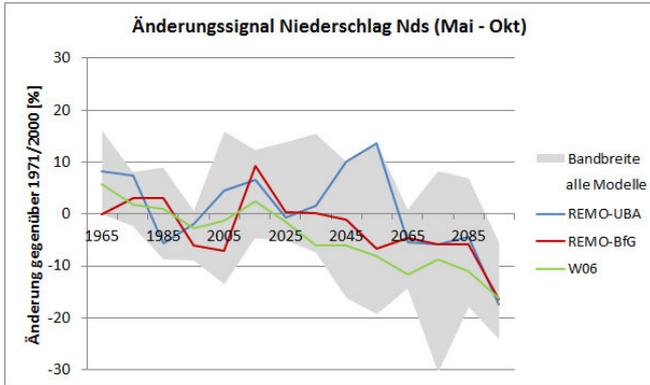


Abbildung 3-15: Änderungssignal der Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Okt) für Niedersachsen; Bandbreite über 15 Regionale Klimamodelle

Alle hier gezeigten Regionalen Klimamodellläufe basieren entsprechend Tabelle 3-3 auf dem globalen atmosphärischen Zirkulationsmodell ECHAM5 des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie. Um jedoch die Bandbreite aller möglichen zukünftigen Entwicklungen abzubilden, sollten, ebenso wie bei den Regionalen Klimamodellen, verschiedene Globale Klimamodelle bei der Ensemble-Betrachtung berücksichtigt werden. Im Zuge des Projektes ENSEMBLES (van der Linden, 2009) wurden verschiedene globale und regionale Klimamodelle, die in Europa entwickelt wurden, für gleiche Gebiete und Zeiträume kombiniert und deren Projektionen miteinander verglichen, basierend auf dem Szenario A1B.

In Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17 sind die Entwicklungen bzw. Bandbreiten von 16 Global- / Regionalmodell-Kombinationen für die Sommermonate (Juni, Juli, August) als gleitendes 31-Jahresmittel von 1961-2100 für Deutschland anhand der Veränderungen der Temperatur bzw. des Niederschlags (jeweils gegenüber dem Zeitintervall 1971-2000) dargestellt. Betrachtet man den Szenarien-Korridor, der durch die mit ECHAM5 angetriebenen Regionalen Klimamodelle aufgespannt wird, ergibt sich folgendes Bild. In Bezug auf die sommerliche Temperaturentwicklung bewegt sich ECHAM5 im Szenarien-Zeitraum im Vergleich zu den anderen Global-/Regionalmodell Kombinationen tendenziell in der unteren Hälfte der durch alle Modelle dargestellten Bandbreite. Das bedeutet, dass ECHAM5 in diesem Fall für die Zukunft eine eher geringere Zunahme der Temperatur projiziert als die meisten anderen europäischen Globalmodelle. Bei der Entwicklung der Niederschläge zeigt ECHAM5 in diesem Zusammenhang ein umgekehrtes Bild. Hier bewegen sich die Projektionen im Vergleich zu den an-

deren Globalmodellen eher in der oberen Hälfte der Bandbreite aller möglichen Entwicklungen.

Allerdings sind die Entwicklungstendenzen gemittelt für ganz Deutschland nicht ohne weiteres auf Niedersachsen oder das Einzugsgebiet von Aller und Leine übertragbar. Daher wurden die gezeigten Analysen mit freundlicher Unterstützung des Climate Service Centers 2.0 (CS2.0) nochmals für den Betrachtungsraum Niedersachsen durchgeführt (vgl. Abbildung 3-18 und Abbildung 3-19). Grundsätzlich zeigen sich hier ähnliche Tendenzen wie für ganz Deutschland.

Das heißt, dass die mit ECHAM5 angetriebenen Regionalmodelle bzgl. der Änderungssignale eher feuchtere und kühlere Verhältnisse projizieren als die meisten anderen europäischen Globalmodelle.

Diese Erkenntnisse geben einen Hinweis darauf, dass sich die Bandbreite möglicher Entwicklungen der Niedrigwasserverhältnisse für den Betrachtungsraum von KliBiW bei der Berücksichtigung weiterer Global- / Regionalmodell-Kombinationen verschieben könnte bzw. ggf. sogar zunehmen würde.

Für die Ergebnisse von KliBiW bedeutet dieser Umstand, dass die hier gezeigten Tendenzen und Signale ausschließlich Gültigkeiten für das benutzte Modell-Ensemble REMO-UBA, REMO-BfG und WETT-REG2006 besitzen, auf Basis des Emissionsszenarios A1B und im Vergleich zum Kontrollzeitraum 1971-2000 (20C). Die gewonnenen Erkenntnisse sollten aufgrund des gewählten Ensembles und der generellen Ensemble-Dynamik, z.B. aufgrund der neuen RCP-Läufe im Zuge des IPCC5 (IPCC, 2013), entsprechend interpretiert und nicht ohne weiteres verallgemeinert werden.

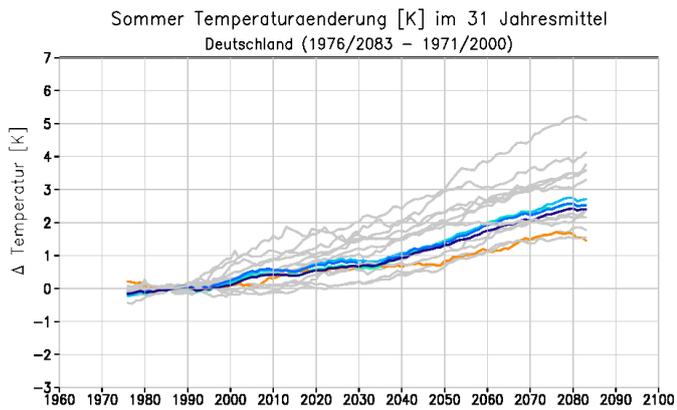


Abbildung 3-16: Änderungssignal der Temperatur simuliert mit 16 Global- / Regionalmodell-Kombinationen in den Sommermonaten (Juni – August) als Gebietsmittel für Deutschland relativ zu 1971/2000, gleitendes 31-Jahresmittel (nach CS2.0)

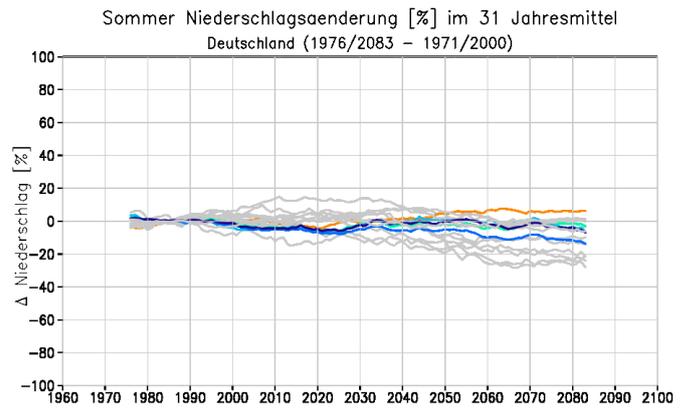


Abbildung 3-17: Änderungssignal des Niederschlags simuliert mit 16 Global- / Regionalmodell-Kombinationen in den Sommermonaten (Juni – August) als Gebietsmittel für Deutschland relativ zu 1971/2000, gleitendes 31-Jahresmittel (nach CS2.0)

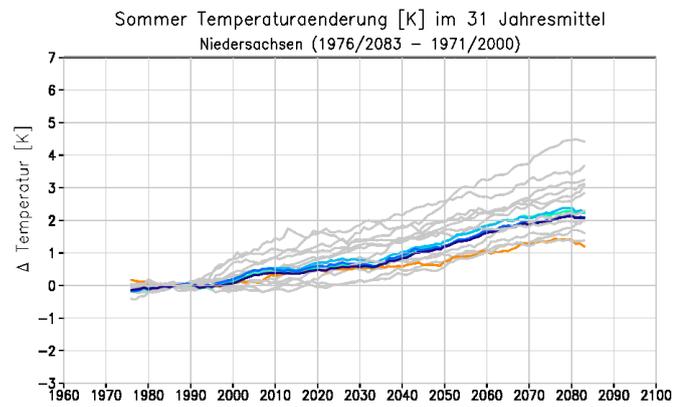


Abbildung 3-18: Änderungssignal der Temperatur simuliert mit 16 Global- / Regionalmodell-Kombinationen in den Sommermonaten (Juni – August) als Gebietsmittel für Niedersachsen relativ zu 1971/2000, gleitendes 31-Jahresmittel (nach CS2.0)

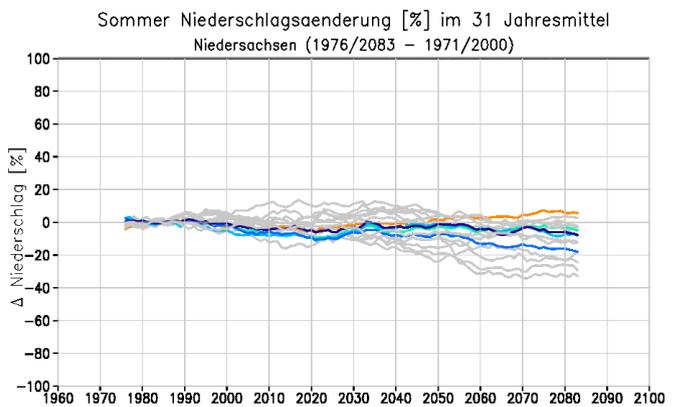


Abbildung 3-19: Änderungssignal des Niederschlags simuliert mit 16 Global- / Regionalmodell-Kombinationen in den Sommermonaten (Juni – August) als Gebietsmittel für Niedersachsen relativ zu 1971/2000, gleitendes 31-Jahresmittel (nach CS2.0)

— RCA3_HadCM3Q16	— HadRM3Q3_HadCM3Q3
— CNRM-RM5.1_ARPEGE	— REGCM3_ECHAM5
— HIRHAM5_ARPEGE	— RACM02_ECHAM5
— HIRHAM5_BCM	— REMO_ECHAM5
— HIRHAM5_ECHAM5	— REMO_IPSL
— CLM_HadCM3Q0	— RCA_BCM
— HadRM3Q0_HadCM3Q0	— RCA_ECHAM5
— HadRM3Q16_HadCM3Q16	— RCA_HadCM3Q3

### 3.4 Bewertung der Klimamodelldaten

#### 3.4.1 Bewertung auf Einzugsgebietsebene

Zur Einschätzung der Belastbarkeit der späteren Aussagen zu möglichen Klimafolgen wurde zunächst eine Bewertung der Klimamodelldaten auf der Ebene verschiedener Einzugsgebiete durchgeführt. Ziel hierbei war es u.a. die Wirkung der Betrachtungsskala auf die Qualität der Modelldaten im Hinblick auf deren Fähigkeit zu untersuchen, die beobachteten Verhältnisse nachzubilden. Dies ist vor allem dann von Bedeutung, wenn es um die Interpretation von wasserwirtschaftlichen Klimafolgenabschätzungen geht, die in der Regel auf Wirkmodellen (z.B. Wasserhaushaltsmodellen) basieren, die die Klimamodelldaten als eine Eingangsgröße nutzen. Bandbreiten bei den modellierten Abflüssen eines Klimamodell-Ensembles müssen dahingehend beurteilt werden können, ob diese Unsicherheiten von den Klimamodellen oder dem anschließenden Wirkmodell herrühren.

Als Betrachtungsraum wurde das Aller-Leine Einzugsgebiet gewählt, für welches im Zuge von KliBiW Phase 3 die zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse anhand eines Klimamodell-Ensembles mit einem Wasserhaushaltsmodell simuliert wurden (s. Kapitel 5). Für die Untersuchung der Skalenabhängigkeit wurde das gesamte Einzugsgebiet in neun weitere mesoskalige Teileinzugsgebiete untergliedert (vgl. Abbildung 3-20, s. Tabelle 3-4). Für diese (Teil-)Einzugsgebiete wurden aus den regionalisierten Klimadaten der Beobachtung und der Modelle (s. Kapitel 3.1) jeweils Teilgebietsmittelzeitreihen des Niederschlags gebildet. Da die Modelle lediglich in der Lage sind, die Statistik der Reihen über längere Zeiträume nachzubilden, nicht aber die Chronologie der Einzelwerte, wurden für diese Zeitreihen jährliche Serien und saisonale Mittel für ausgewählte Kennwerte berechnet (s. Tabelle 3-5). Die Bewertung der Klimadaten erfolgte dann anschließend anhand von verschiedenen Gütekriterien, die unterschiedlich sensitiv auf Abweichungen in bestimmten Bereichen der Werteskala reagieren (s. Tabelle 3-6). Eine ausführliche Darstellung der Vorgehensweise kann in Petry et al. (2015) gefunden werden. An dieser Stelle wird exemplarisch das Gütekriterium des Nash-Sutcliffe Effizienzkoeffizienten mit dem Exponenten 1 ( $NSE_1$ ) betrachtet.

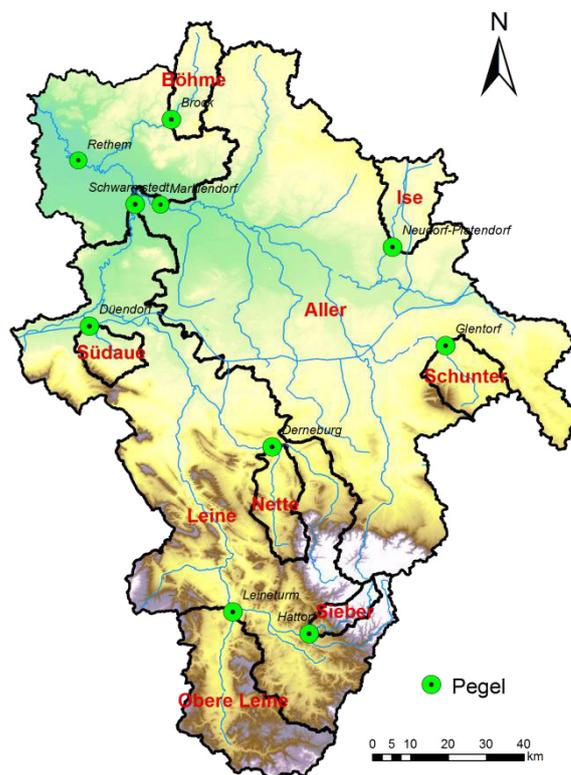


Abbildung 3-20: Lage der Teileinzugsgebiete für die Validierung innerhalb des Betrachtungsraumes von Aller und Leine

Tabelle 3-4: Ausgewählte Charakteristika der Teileinzugsgebiete der Validierung

Gebietsname	Größe [km <sup>2</sup> ]	Mittlere Höhe [m]
Aller-Leine	15.733	139
Aller	7.428	92
Leine	6.448	203
Obere Leine	993	250
Ise	341	76
Nette	304	208
Schunter	292	137
Böhme	288	77
Südaue	191	93
Sieber	129	480

Tabelle 3-5: Ausgewählte Kenngrößen des Niederschlags zur Einschätzung der Modellgüte von Klimamodelldaten

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
Pav0	mm	Mittelwert des Niederschlags (für Tage mit $N \geq 0\text{mm}$ )
Px1d	mm	Größte Niederschlagssumme über 1 Tag
Px3d	mm	Größte Niederschlagssumme über 3 Tage
Pnnd	Tage	Anzahl der Trockentage (Tage mit $N < 1\text{mm}$ )
Pxcdd	Tage	Maximale Anzahl aufeinander folgender Tage mit $N < 1\text{mm}$

Tabelle 3-6: Ausgewählte Effizienzkriterien zur Beschreibung der Modellgüte (mit N: Anzahl der Werte einer Reihe,  $X_{obs}$ : Beobachtungswerte,  $X_{sim}$ : Modellwerte,  $\bar{x}$ : Mittelwert)

Abkürzung	Beschreibung
NSE	Nash-Sutcliffe Effizienzkoeffizient: $= 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{obs}^i - X_{sim}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_{obs}^i - \bar{X}_{obs})^2}$
NSE <sub>rel</sub>	Relativer Nash-Sutcliffe Effizienzkoeffizient: $1 - \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{X_{obs}^i - X_{sim}^i}{X_{obs}^i} \right)^2}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{X_{obs}^i - \bar{X}_{obs}}{\bar{X}_{obs}} \right)^2}$
NSE <sub>1</sub>	Nash-Sutcliffe Effizienzkoeffizient mit dem Exponenten 1: $= 1 - \frac{\sum_{i=1}^N  X_{obs}^i - X_{sim}^i }{\sum_{i=1}^N  X_{obs}^i - \bar{X}_{obs} }$
PBIAS	Prozentualer Fehler: $= 100 * \frac{\sum_{i=1}^N (X_{sim}^i - X_{obs}^i)}{\sum_{i=1}^N X_{obs}^i}$

Die Größe des NSE<sub>1</sub> kann Werte zwischen  $-\infty$  und 1 annehmen. Je näher der Wert bei 1 liegt, desto besser kann das betrachtete Modell die beobachteten Werte wiedergeben. Im Gegensatz zu dem NSE bzw. dessen Variante NSE<sub>rel</sub> reagiert der NSE<sub>1</sub> weder besonders empfindlich auf Abweichungen im größeren noch im kleineren Wertebereich von zwei zu vergleichenden Reihen, wodurch es zu einer ausgeglichenen Bewertung der Modellgüte kommt.

Für die Zeitreihen der einzelnen Teileinzugsgebiete wurden nun die in Tabelle 3-5 aufgeführten Kennwerte als jährliche Serie für die Beobachtung und die Modelldaten gebildet, jeweils der Größe nach sortiert und anschließend der NSE<sub>1</sub> berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3-21 dargestellt. Die Klassifizierung des NSE<sub>1</sub> wurde hierbei frei gewählt.

Es zeigt sich, dass das dynamische Modell REMO in beiden Varianten (UBA und BfG) über alle Teilgebiete hinweg die schlechtere Modellgüte aufweist als das statistische Modell WETTREG. Dies macht sich vor allem bei den klimatischen Kenngrößen bemerkbar, die einen wesentlichen Einfluss auf die Niedrigwasserverhältnisse haben, nämlich die Anzahl der Trockentage (pnnd) und die maximale Dauer von Trockenperioden (pxcdd). Besonders der Lauf REMO-BfG zeigt hier größere Abweichungen. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Modellgüte von allen betrachteten Modelldaten bei kleineren Betrachtungsräumen tendenziell schwächer ausfällt, was vermuten lässt, dass die Klimamodelle in diesen Bereichen aufgrund der hohen räumlichen Variabilität der Größe Niederschlag sowie der geringen Stations- bzw. Gitterpunktdichte auf dieser räumlichen Skala ihre Grenze der Verlässlichkeit und damit auch der Anwendbarkeit erreicht haben. Dies muss bei der späteren Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der Richtung der Abweichungen zwischen Beobachtung und Modellen kann bemerkt werden, dass REMO-UBA die maximalen Niederschläge bzw. Trockenphasen z.T. erheblich überschätzt, REMO-BfG die Mittelwerte und Trockenphasen meist zu „nass“ abbildet und WETTREG bei den maximalen Niederschlägen und Trockenphasen zu „homogen“ verläuft und kaum Extreme produziert (vgl. Petry et al., 2015). Diese Tendenzen müssen sich nicht in gleicher Weise in den Zukunftsszenarien fortsetzen, sollten aber bei der Interpretation der Ergebnisse aus der Wirkmodellierung Berücksichtigung finden.

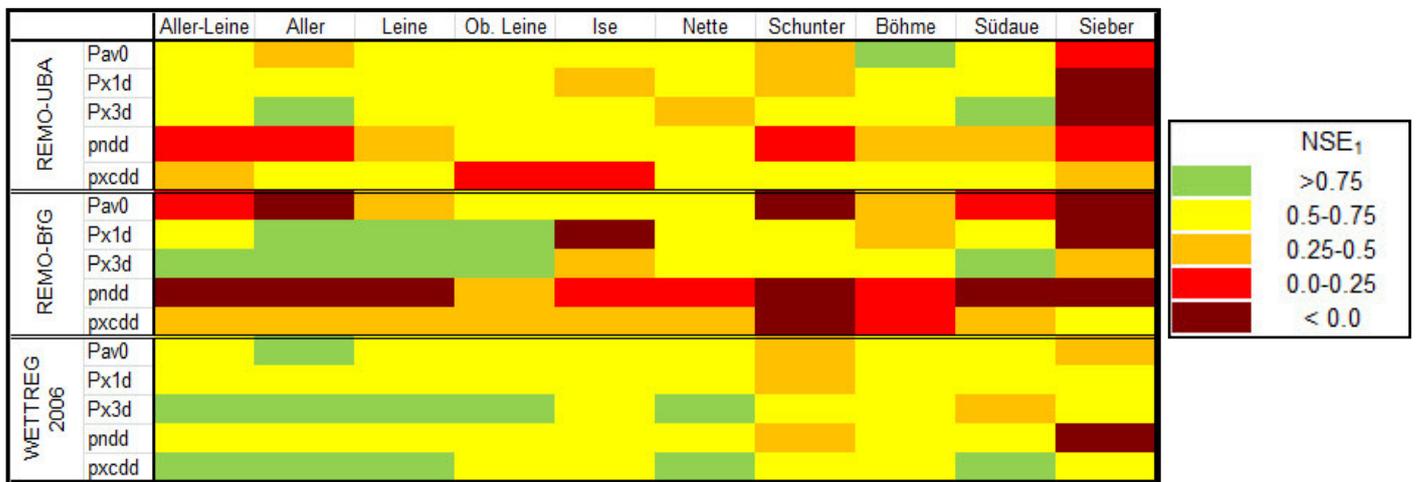


Abbildung 3-21: Graphische Darstellung der Modellgüte ( $NSE_1$ ) für alle betrachteten Modelle und Kennwerte des Niederschlags, differenziert nach Teilgebieten (mit von links nach rechts abnehmender Einzugsgebietsgröße)

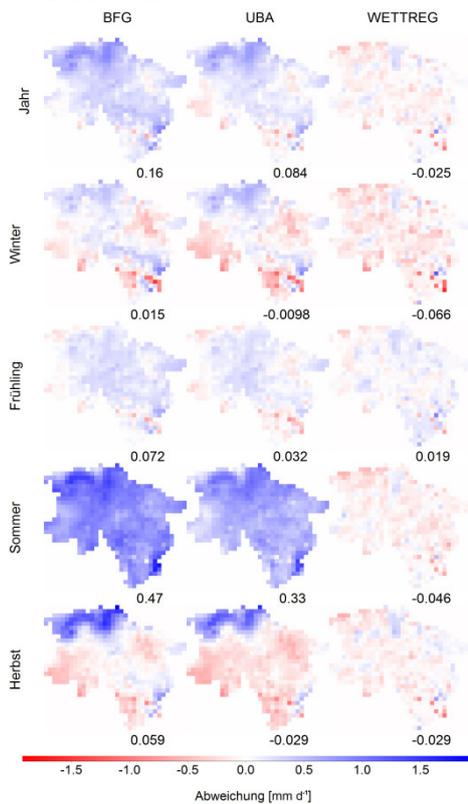
### 3.4.2 Bewertung für Niedersachsen

Die Einschätzung zukünftiger wasserwirtschaftlich relevanter klimatischer Bedingungen, die im Falle des Niedrigwasserbereiches vor allem durch Trockenwetterindizes abgebildet werden können, ist abhängig von der Reproduzierbarkeit jener Indizes durch Klimamodelle. Dieses Kapitel gibt einen generellen Überblick über das Potenzial der in Kapitel 3.3.1 vorgestellten regionalen Klimamodelldaten zur Prognose unterschiedlicher Trockenwetterindizes. Die Untersuchung bezieht sich dabei auf das gesamte Bundesland Niedersachsen. Die Güte der Nachbildung der Indizes in den einzelnen Modellläufen wird durch den Vergleich mit Beobachtungsdaten im Kontrollzeitraum 1971-2000 bewertet.

Als Beobachtungsdaten standen Tageszeitreihen des Niederschlags und der mittleren und maximalen Temperatur zur Verfügung; die Stationen entsprechen den in Kapitel 3.1.3 verwendeten. Die Modelldaten wurden im Falle der beiden REMO-Läufe aus dem Originalraster und im Falle der WETTREG-Realisationen aus den Modellstationen entnommen. Aus Beobachtungs- und Modelldaten wurden jeweils zwei Trockenwetterindizes, d.h. die maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage < 1mm (DSDmax) und die maximale Hitzewellendauer (HWDmax) sowie die nicht-trockenwetterspezifischen mittleren Temperaturen ( $T_{av}$ ) und Niederschläge ( $P_{av}$ ) extrahiert (s. Tabelle 3-1, s. Kapitel 3.1.3). Die Größen wurden dabei sowohl auf jährlicher als auch auf saisonaler Basis direkt

an den Beobachtungsstationen bzw. den Modellrasterzellen/-stationen ermittelt. Um den Vergleich zwischen Beobachtung und Modell zu ermöglichen, wurden die jährlichen und saisonalen Indexzeitreihen respektive ihre Kennwerte, mit Hilfe der inversen Distanzwichtung auf ein einheitliches 10 x 10 km-Raster interpoliert. Die beiden REMO-Läufe BfG und UBA wurden dabei gesondert betrachtet, während für WETTREG jeweils das Mittel über alle 20 Realisationen ermittelt wurde. Als Gütekriterien dienen die absolute und relative Abweichung der simulierten von den beobachteten Kennwerten (simulierter – beobachteter Mittelwert) sowie der in Kapitel 3.4.1 beschriebene  $NSE_1$  als Maß der Anpassungsgüte der geordneten Reihenwerte.

### Pav Mittelwert



### DSDmax Mittelwert

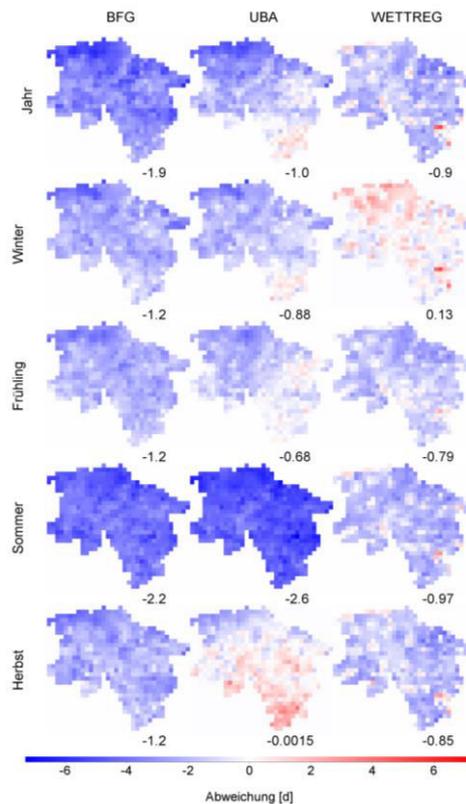
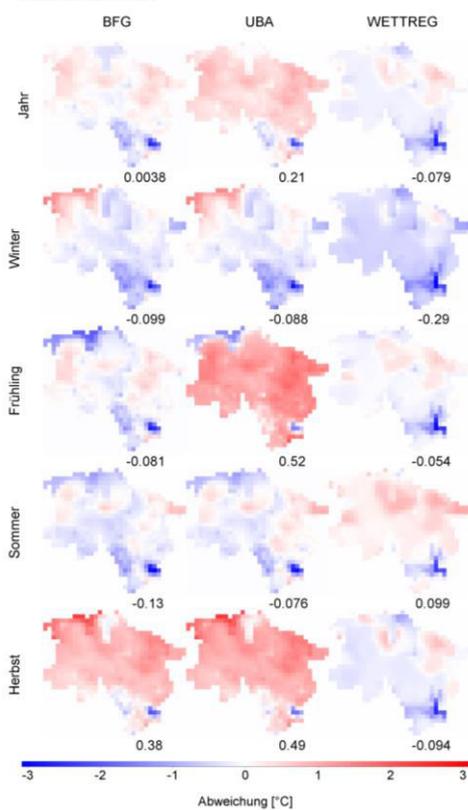


Abbildung 3-22: Absolute Abweichung des mittleren Niederschlags (links) und der maximalen Trockendauer (rechts) von der Beobachtung für REMO-BfG und -UBA und WETTREG im 20C-Zeitraum 1971-2000. Die Zahlen unter den Karten geben die mittleren Abweichungen an

### Tav Mittelwert



### HWDmax Mittelwert

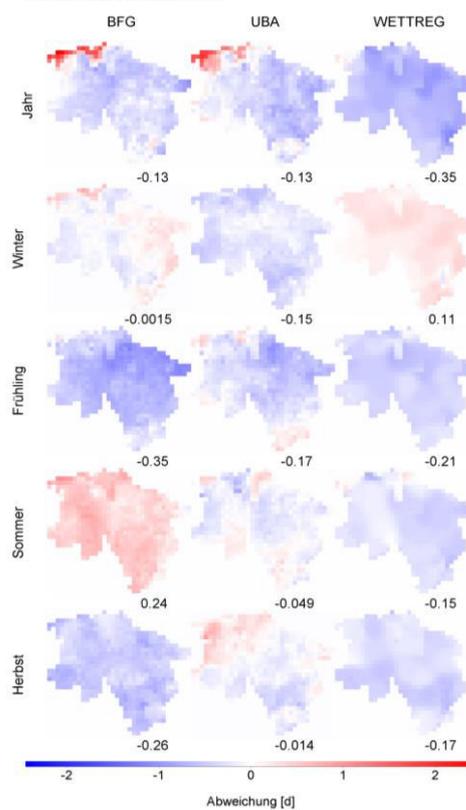


Abbildung 3-23: Absolute Abweichung der mittleren Temperatur (links) und der maximalen Hitze-wellendauer (rechts) zur Beobachtung für REMO-BfG und -UBA und WETTREG im 20C-Zeitraum 1971-2000. Die Zahlen unter den Karten geben die mittleren Abweichungen an

Die verschiedenen Indizes werden mit unterschiedlicher Qualität von den einzelnen Modellen reproduziert. Die größten Abweichungen von der Beobachtung wurden für die beiden REMO-Läufe sowohl für den mittleren Niederschlag als auch für die maximale Anzahl an Trockentagen (vgl. Abbildung 3-22) im Sommer festgestellt. Hier liegt die Überschätzung des mittleren Niederschlags im Mittel über das gesamte Untersuchungsgebiet bei 35% bzw. 24% für den BfG- und den UBA-Lauf. Die maximale Trockendauer wird um 2,2 bzw. 2,6 Tage unterschätzt. Im Allgemeinen wird der Niederschlag von den REMO-Läufen in allen Jahreszeiten und im Gesamtjahr tendenziell überschätzt. Nur im Herbst werden mit Ausnahme der Küstenregion die größten Teile Niedersachsens unterschätzt. WETTREG zeigt größtenteils leichte Unterschätzungen des mittleren Niederschlags mit den größten Abweichungen im Winter. Hier wird folglich auch die maximale Trockendauer überschätzt. Allerdings unterschätzt WETTREG ebenfalls die Trockendauer für die übrigen Saisons und das Jahr, mit einer maximalen Abweichung im Sommer. Die Überlegenheit von WETTREG gegenüber beiden REMO-Läufen bei der Nachbildung der sommerlichen Niederschlagsverhältnisse wird sowohl beim mittleren Niederschlag, als auch bei der maximalen Trockendauer ersichtlich. Für die anderen Jahreszeiten und das Jahr lassen sich lediglich minimale Unterschiede feststellen.

Die Qualität der Reproduktion der mittleren Temperatur variiert beträchtlich zwischen den einzelnen Modellen und den Saisons. Die größte Überschätzung wurde für den UBA-Lauf im Frühling beobachtet (Abbildung 3-23 links). Hier zeigt sich auch die größte Differenz zum BfG-Lauf, der die mittlere Temperatur im Frühling größtenteils unterschätzt. Die größte Unterschätzung zeigt WETTREG im Winter. Generell neigt WETTREG, mit Ausnahme des Sommers, zu einer leichten Unterschätzung der mittleren Temperatur, zeigt aber generell geringere Abweichungen als die REMO-Läufe. Die maximale Hitzewellendauer (Abbildung 3-23 rechts) wird größtenteils in allen Modelldatensätzen unterschätzt. Eindeutige Überschätzungen können nur für WETTREG im Winter und REMO-BfG im Sommer beobachtet werden.

Die Analyse der Anpassungsgüte, d.h. die Ähnlichkeit der geordneten Indexzeitreihen der Beobachtung und der Modelldaten, zeigt, dass im Falle der Temperatur-

größen der trockenwetterspezifische Index teilweise weitaus besser von den Modellen nachgebildet wird als die mittleren Bedingungen, wie beim Vergleich der Nash-Suttcliff-Effizienz der mittleren Temperatur und der maximalen Hitzewellendauer (vgl. Abbildung 3-24) deutlich wird. Während bei der mittleren Temperatur vor allem für REMO-UBA schlechte Anpassungsgüten von etwa -0,32 im Frühling und -0,48 im Herbst festgestellt wurden, liegt der niedrigste  $NSC_1$  für den UBA-Lauf bei der Hitzewellendauer bei durchschnittlich 0,55 im Sommer. Bei Untersuchung der Anpassungsgüte bei den Niederschlagsgrößen (vgl. Abbildung 3-25) hingegen ist keine klare Überlegenheit der Simulation des Trockenwetterindex gegenüber der des mittleren Niederschlags zu erkennen.

Generell variiert die Simulationsgüte der unterschiedlichen klimatischen Eigenschaften beträchtlich zwischen den Modellen und den Saisons. Aussagen über die Überlegenheit eines Datensatzes kann lediglich für die Niederschlagsgrößen getroffen werden, wo WETTREG, vor allem im Sommer, geringere Abweichungen zeigt als die REMO-Läufe. Bezüglich der Reproduktion von trockenwetterspezifischen Indizes lässt sich sagen, dass diese generell nicht schlechter, im Falle der maximalen Hitzewellendauer sogar weitaus besser ausfällt, als die der mittleren Bedingungen.

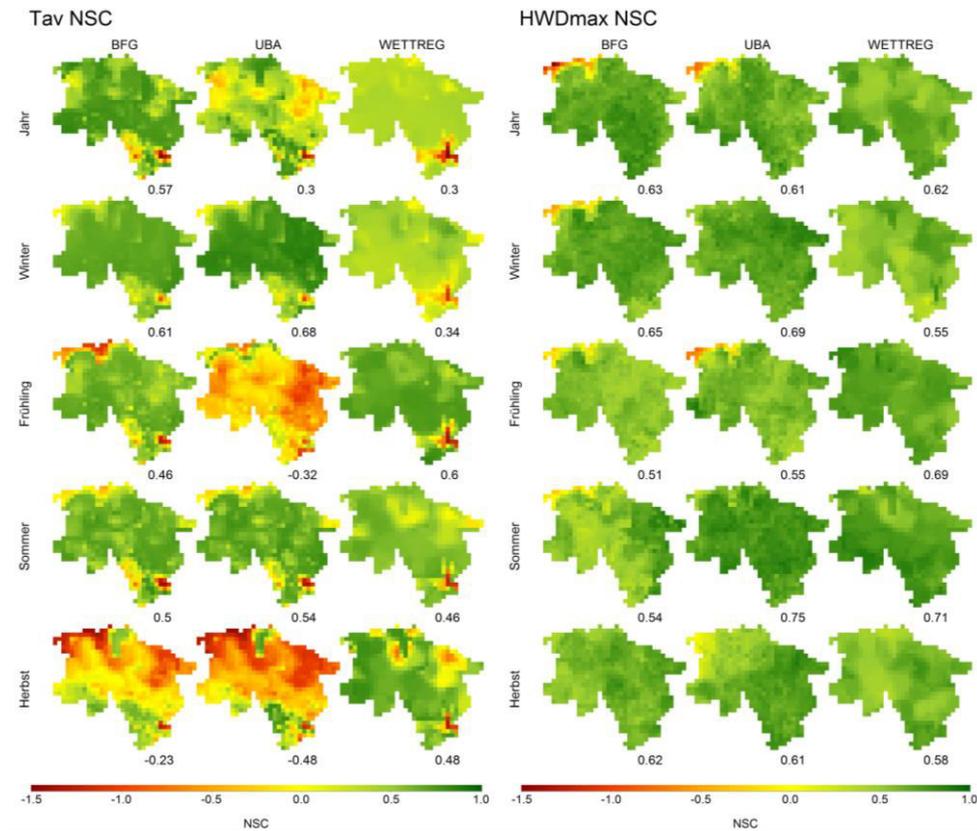


Abbildung 3-24: Nash-Sutcliffe-Effizienzen der geordneten Reihewerte der mittleren Temperatur (links) und der maximalen Hitzewelldauer (rechts) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG im 20C-Zeitraum 1971-2000. Die Zahlen unter den Karten geben den mittleren NSC<sub>1</sub> an

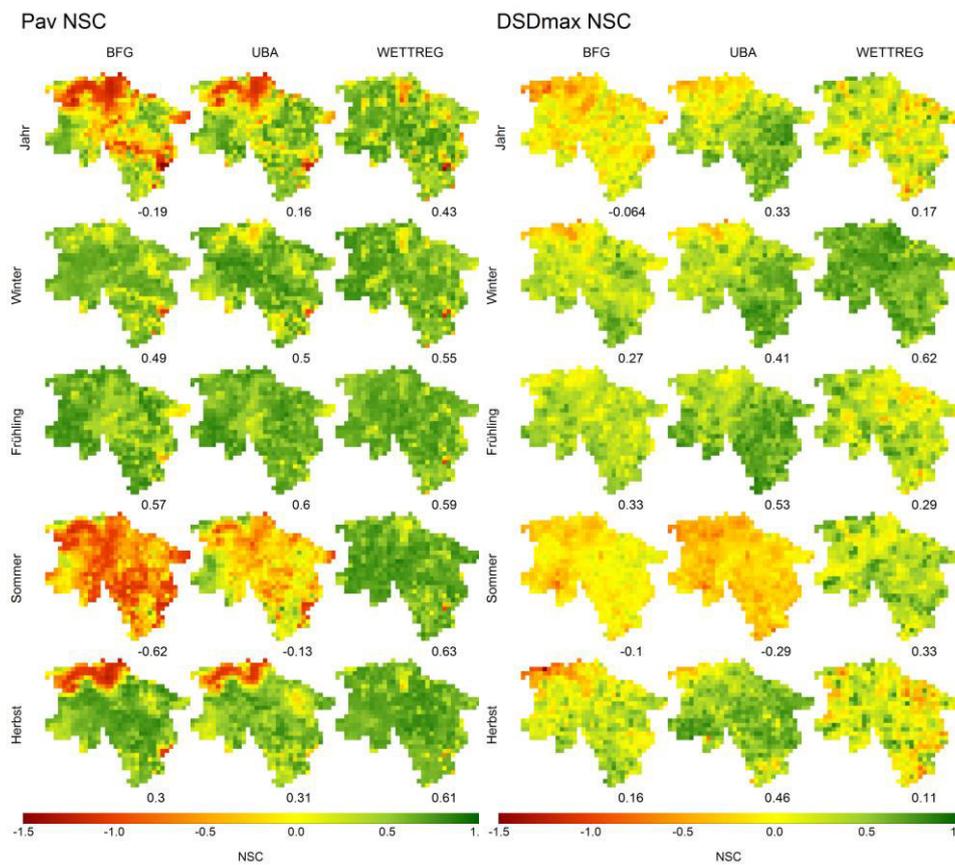


Abbildung 3-25: Nash-Sutcliffe-Effizienzen der geordneten Reihewerte des mittleren Niederschlags (links) und der maximalen Trockendauer (rechts) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG im 20C-Zeitraum 1971-2000. Die Zahlen unter den Karten geben den mittleren NSC<sub>1</sub> an

### 3.5 Analyse der Klimamodellsignale

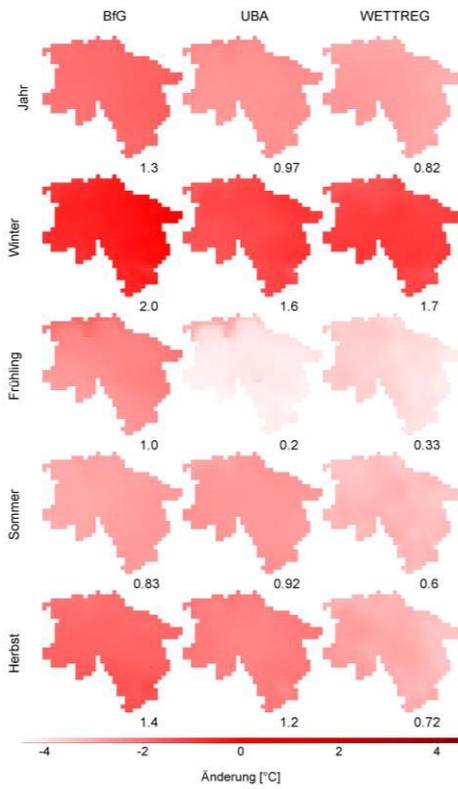
Zur Untersuchung der Änderungen der mittleren und trockenwetterspezifischen Kenngrößen des Niederschlags und der Temperatur wurden die regionalen Klimamodell Datensätze REMO-BfG und -UBA und WETTREG2006 für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 mit den 20C-Kontrollläufen für 1971-2000 verglichen. Das gewählte Szenario ist A1B. Wie in Kapitel 3.4.2 werden die mittlere Temperatur, die maximale Hitzewellendauer, der mittlere Niederschlag und die maximale Trockendauer für alle Saisons über ganz Niedersachsen betrachtet. Für die regionalen Klimamodelle wurden die Indexzeitreihen an den verfügbaren Rasterzellen bzw. Stationen berechnet und anschließend auf ein einheitliches 10 x 10 km-Raster interpoliert, um die Änderungen für das gesamte Gebiet einschätzen zu können.

Die eindeutigsten Änderungen konnten für die mittlere Temperatur festgestellt werden (vgl. Abbildung 3-26). Hier prognostizieren alle Modelle ausnahmslos einen Anstieg über das gesamte Untersuchungsgebiet. Für die nahe Zukunft variieren die Zunahmen zwischen durchschnittlich +0,2°C (REMO-UBA im Frühling) und +2,0°C (REMO-BfG im Winter). In allen Datensätzen finden sich die stärksten Anstiege in der mittleren Temperatur im Winter. Für den Zeitraum 2071-2100 liegen die Zunahmen zwischen +1,0°C (WETTREG im Frühling) und +4,2°C (WETTREG im Winter). Auch hier sind die stärksten Zunahmen in allen Modellen im Winter zu verzeichnen. Für beide Zeiträume in der Zukunft fallen die prognostizierten Temperaturanstiege durch WETTREG, mit Ausnahme des Winters, geringer aus als durch die REMO-Läufe. Dies macht sich auch in den Jahresbilanzen beider Zukunftszeiträume, vor allem der fernen Zukunft, deutlich (REMO-BfG: +3,1°C, WETTREG: +2,3°C).

Anders als bei der mittleren Temperatur liefern die projizierten Hitzewellendauern ein weitaus heterogeneres Bild (vgl. Abbildung 3-27), vor allem für den Zeitraum 2021-2050. Mit Ausnahme des Sommers werden hierfür von REMO-BfG in den größten Teilen Niedersachsens Anstiege projiziert, mit einem Maximum von durchschnittlich 0,34 Tagen im Herbst. REMO-UBA zeigt Abnahmen für das Jahr und die Wintermonate, während sich Ab- und Zunahmen in den übrigen Saisons über das Untersuchungsgebiet verteilt

ausgleichen. WETTREG, welches wesentlich schwächere Änderungen zeigt, prognostiziert vorwiegend abnehmende Hitzewellendauern für das Jahr, den Sommer und den Herbst sowie Zunahmen für die Winter- und Frühlingsmonate. Für den späteren Zeitraum sind die Änderungen innerhalb des Untersuchungsgebiets homogener, jedoch höchst unterschiedlich zwischen den Saisons und den einzelnen Modellen. WETTREG zeigt in allen Saisons und im Gesamtjahr Abnahmen der Hitzewellendauer. REMO-BfG zeigt die stärksten Anstiege mit durchschnittlich 0,88 Tagen im Frühling, 0,69 Tagen im Herbst und 0,66 Tagen im Jahr. Gleichzeitig prognostiziert es die größte Abnahme mit 0,55 Tagen im Sommer. Für REMO-UBA können schwächere Änderungen beobachtet werden, die im Winter und Herbst entgegengesetzt der Änderungsrichtung des BfG-Laufs sind.

Tav 2021-2050



Tav 2071-2100

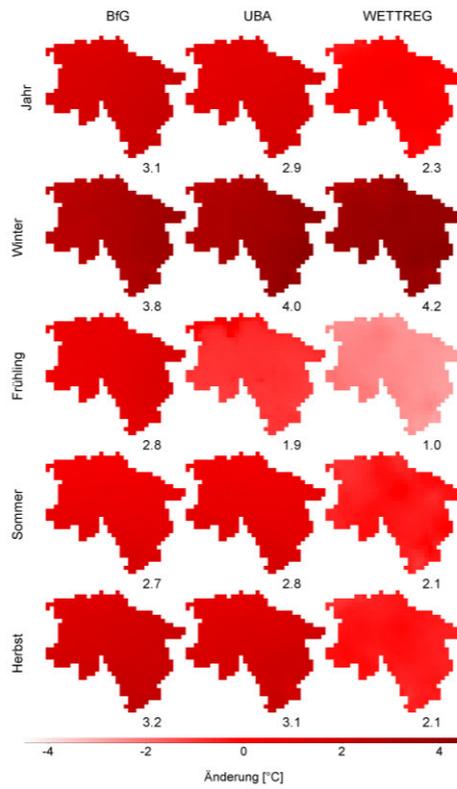
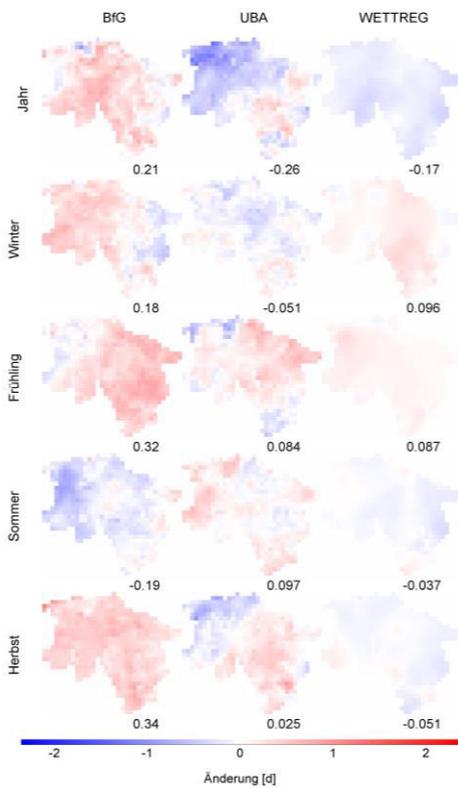


Abbildung 3-26: Änderung der mittleren Temperatur gegenüber dem 20C-Zeitraum (1971-2000) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts). Die Zahlen unter den Karten geben die mittlere Änderung an

HWDmax 2021-2050



HWDmax 2071-2100

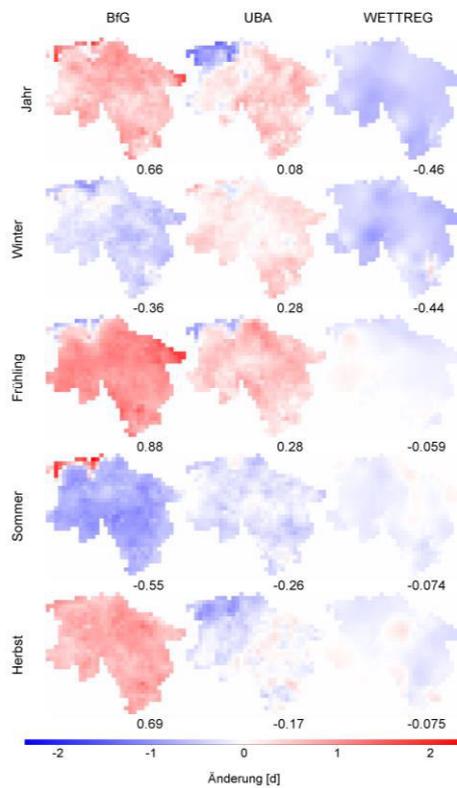


Abbildung 3-27: Änderung der maximalen Hitzewellendauer gegenüber dem 20C-Zeitraum (1971-2000) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts). Die Zahlen unter den Karten geben die mittlere Änderung an

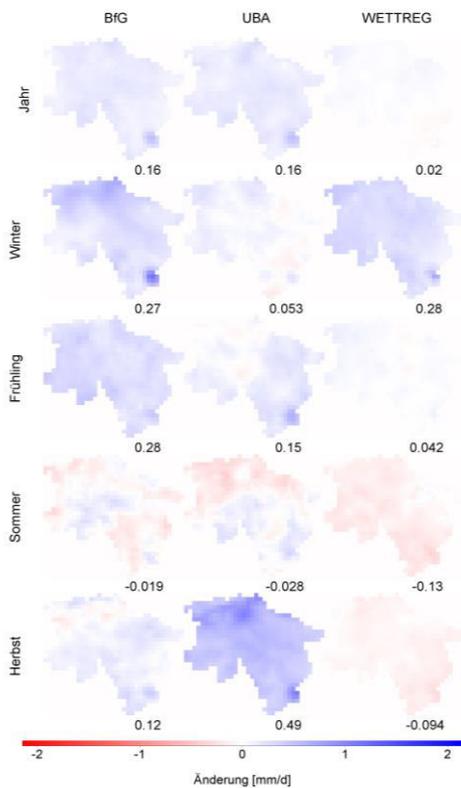
Der Mittlere Niederschlag (vgl. Abbildung 3-28) hingegen zeigt ein eindeutiges Muster. Alle Modelldatensätze signalisieren für die nahe Zukunft einen Anstieg des mittleren Niederschlags in allen Jahreszeiten, mit Ausnahme des Sommers, wo größtenteils leichte Abnahmen prognostiziert werden. WETTREG prognostiziert als einziges Modell eine Abnahme im Herbst. REMO-BFG und WETTREG zeigen die stärksten Zunahmen im Winter (+0,27 bzw. +0,28mm), während REMO-UBA mit +0,49mm die stärkste Zunahme im Herbst simuliert. Für den Zeitraum 2071-2100 verstärken sich die Trends. Hier zeigen alle Datensätze einen starken Anstieg des mittleren Niederschlags im Winter (maximal +0,8mm für WETTREG) sowie etwa gleichwertig starke Abnahmen im Sommer.

Anders als beim mittleren Niederschlag werden bei der maximalen Trockendauer teilweise große Unterschiede zwischen den einzelnen Modellläufen ersichtlich (vgl. Abbildung 3-29). Beispielsweise werden in der nahen Zukunft für das Jahr eine mittlere Zunahme von 1.3 Tagen durch REMO-BfG und mittlere Abnahmen von 0.71, bzw. 0.42 Tagen durch REMO-UBA und WETTREG projiziert. Dies spricht für eine geringere Robustheit der Vorhersage der Trockenwetter-spezifischen Indizes. Auch die saisonale Variabilität der Änderungen scheint bei der Trockendauer größer als beim Niederschlag. Größte negative Änderungen werden für die nahe Zukunft durch REMO-UBA für den Frühling vorhergesagt (-3,5 Tage), die größten positiven durch REMO-BfG im Herbst (+2,5 Tage). Für die ferne Zukunft werden die potentiellen Änderungen innerhalb der Saisons homogener und entsprechen vor allem in Winter und Sommer den projizierten Entwicklungen im mittleren Niederschlag mit Abnahmen im Winter (-0,8 Tage REMO-UBA bis -4,4 Tage WETTREG) und Zunahmen im Sommer (+1,7 Tage REMO-BfG bis +2,7 Tage REMO-UBA).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die projizierten Änderungen der Trockenwetterindizes weitaus weniger eindeutig ausfallen als die der Mittelwerte des Niederschlags und der Temperatur, sowohl im Vergleich zwischen den beiden Projektionszeiträumen als auch zwischen den einzelnen Modellen. Während für die Mittelwerte die Änderungsrichtung klar erkennbar ist, die – wenn auch nicht in gleichem Ausmaß – von allen Modellen größtenteils gleichermaßen projiziert wird, unterscheiden sich die Prognosen der Hitzewellen- und Trockendauer zwischen den betrachteten

Zeiträumen und Modellen teils beträchtlich voneinander. Selbst zwischen den beiden REMO-Läufen können für einzelne Saisons Unterschiede in der Richtung der Änderungen beobachtet werden. Dieses Ergebnis muss bei der Verwendung von Trockenwetterindizes aus Klimamodelldaten zur Einschätzung zukünftiger Entwicklungen berücksichtigt werden.

Pav 2021-2050



Pav 2071-2100

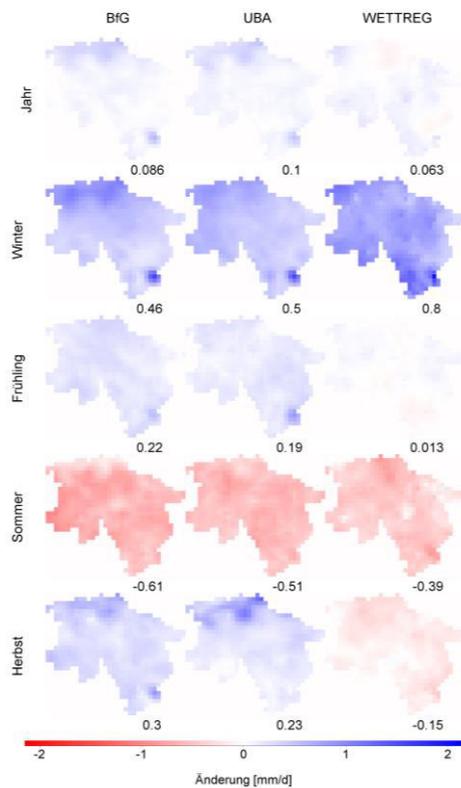
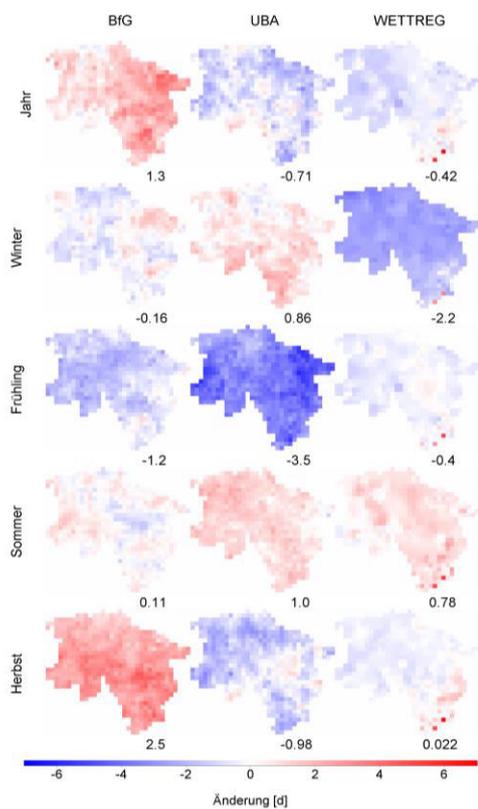


Abbildung 3-28: Änderung des mittleren Niederschlags gegenüber dem 20C-Zeitraum (1971-2000) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts). Die Zahlen unter den Karten geben die mittlere Änderung an

DSDmax 2021-2050



DSDmax 2071-2100

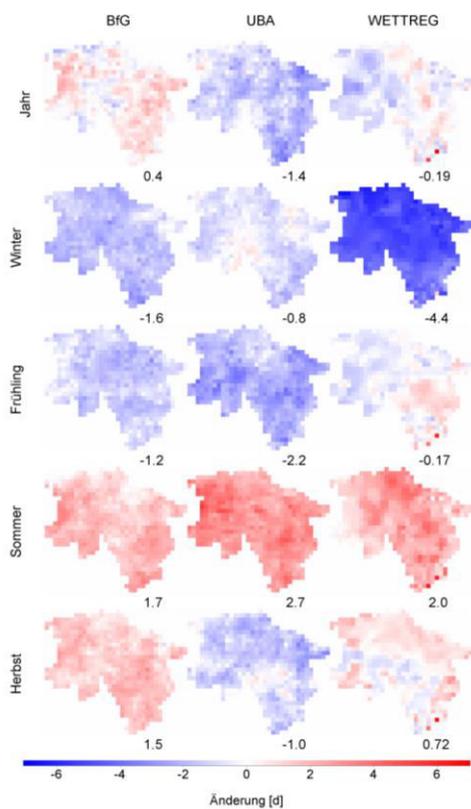


Abbildung 3-29: Änderung der maximalen Trockendauer gegenüber dem 20C-Zeitraum (1971-2000) für REMO-BfG und -UBA und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts). Die Zahlen unter den Karten geben die mittlere Änderung an

## 4 Das Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI

### 4.1 Allgemeine Beschreibung

Für die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft wurde ein hydrologisches Modell für das Einzugsgebiet der Aller mit Leine und Oker (ALO) erstellt. Als Modellsystem wurde die Software PANTA RHEI verwendet, welche im Zuge einer Kooperation des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig (Abt. Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz) und dem Institut für Wassermanagement IfW GmbH entwickelt wurde. PANTA RHEI ist ein deterministisches hydrologisches Modell mit einer Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Derzeit wird PANTA RHEI für die Berechnung von Bemessungsabflüssen, für die Hochwasservorhersage in Niedersachsen sowie für Klimawandel bezogene Untersuchungen eingesetzt.

Das Modellsystem PANTA RHEI untergliedert ein Flussgebiet in Systemelemente, für deren Simulation elementspezifische Rechenverfahren (Prozeduren) implementiert sind. Systemelemente sind Flächen (Teileinzugsgebiete und deren Unterelemente: Hydrotope) und Bauwerke. Ein Hydrotop fasst Flächen mit ähnlichem hydrologischem Verhalten zusammen. Sie dienen der Beschreibung der Variabilität innerhalb einer Teilfläche. Typische Eigenschaften eines Hydrotops sind z.B. die Bodenart und die Landnutzung.

Da in hydrologischen Modellkonzepten die tatsächliche räumliche Ausdehnung von Bauwerken keine direkte Berücksichtigung findet, werden die Bauwerke im Modell als Stationen, also mit nur punktueller Ausdehnung verwaltet. Die tatsächliche räumliche Ausdehnung und ihre hydrologische Wirkung (z.B. Talsperre und ihre Oberfläche) wird über Eigenschaften und Parameter des Bauwerks definiert. Folgende Bauwerke können berücksichtigt werden: Düker, Hochwasserrückhaltebecken, Talsperre, Retentionsraum (Polder), Verzweigung.

Weitere Informationen zum Modellsystem PANTA RHEI kann dem Bericht des Vorgängerprojektes „Globaler Klimawandel, - Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland, Phase 2“ entnommen werden (NLWKN, 2012).

### 4.2 Modellerstellung

Die Grundstruktur des hydrologischen Modells wurde von den Arbeiten des Vorgängerprojektes „Globaler Klimawandel, - Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland, Phase 2“ übernommen. In Phase 2 wurde das Einzugsgebiet der Aller bis zur Mündung in die Weser im Modellsystem PANTA RHEI abgebildet. Als Grundlagen wurden die Hydrographische Karte Niedersachsens, digitale Geländemodelle sowie Boden- und Landnutzungskarten herangezogen. In den außerniedersächsischen Gebieten der Aller wurden entsprechende Daten der Nachbarbundesländer bzw. kleinmaßstäbige, bundesweit verfügbare Datensätze verwendet. Das Einzugsgebiet mit einer Größe von ca. 15.700 km<sup>2</sup> wurde in 4.200 Teilflächen untergliedert, welche sich weiter in ca. 60.000 Hydrotope unterteilen. In das Modell wurden 156 Pegel und 6 Talsperren sowie zahlreiche Düker, Überleitungen und Hochwasserrückhaltebecken integriert. Zusätzlich zu den in Phase 2 verarbeiteten Kennwerten wurde der topographische Index berechnet. Dieser berechnet sich nach Beven und Kirkby (1979) als:

$$TI = Ln\left(\frac{FlowAcc \cdot A}{Tan(Slope/100)}\right) \quad [4-1]$$

Mit:

TI	Topographischer Index	[-]
FlowAcc	Flow Accumulation	[1/m <sup>2</sup> ]
Slope	Geländeneigung	[%]
A	Rasterzellengröße	[m <sup>2</sup> ]

Weiterhin wurden detailliertere Bodenparameter als in Phase 2 anhand der Bodenübersichtskarte 1:50.000 (Hrsg.: J. Boess et al., 2004) und dem deutschen Klassifizierungssystem (Sponagel, 2005) erstellt.

Abbildung 4-1 zeigt das Einzugsgebiet von Aller, Leine und Oker mit Teilflächendifferenzierung und den wesentlichen Gewässern sowie Referenzpegeln.

Die in der Auswertung betrachteten Pegelgebiete (Referenzpegel) wurden in Redundanz zu Phase 2 ausgewählt und sind in Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Referenzpegel für die Wasserhaushaltmodellierungen

Pegelgebiet	Fließgewässer	Fläche [km <sup>2</sup> ]	MQ* [m <sup>3</sup> /s]
Rethem	Aller	14.730	108,15
Marklendorf	Aller	7.209	41,26
Herrenhausen	Leine	5.304	48,00
Poppenburg	Leine	3.463	34,27
Groß-Schwülper	Oker	1.734	10,26
Northeim	Rhume	1.176	15,11
Heinde	Innerste	897	7,48
Ohrum	Oker	813	5,21
Göttingen	Leine	633	5,23
Reckershausen	Leine	321	2,65
Derneburg	Nette	309	2,90
Glentorf	Schunter	296	1,44
Brock	Böhme	285	3,01
Pionierbrücke	Sieber	45	1,47
Altenau	Oker	31	0,93
Harzburg	Radau	18	0,42
Wunstorf	Westaue	588	4,19

\* Mittelwert für die Jahre 1971-1991

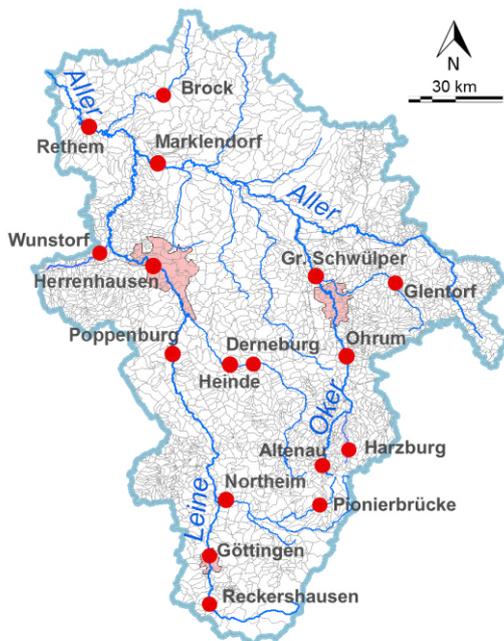


Abbildung 4-1: Das Einzugsgebiet der Aller im südöstlichen Teil Niedersachsens mit Referenzpegeln (rot) an den Flüssen Aller, Leine, Oker, Innerste, Nette, Rhume, Schunter, Sieber, Böhme Radau und Westaue

### 4.3 Modellerweiterungen

Der Fokus der Projektphase 3 liegt auf der Niedrig- bis Mittelwasseranalyse. Um aussagekräftige und wissenschaftlich belastbare Modellergebnisse zu erreichen, war es erforderlich, die für Niedrig- bis Mittelwasser maßgebenden Modellansätze (Bodenspeicher, Verdunstung) zu erweitern.

Aufbauend auf Kreye et al. (2010, 2012) wurde für KliBiW Phase 3 ein neues Teilmodul zur Simulation des Bodenwasserhaushalts entwickelt. Das Bodenwasserspeichermodell DYVESOM (**D**ynamic **V**egetation **S**oil **M**odel) ist in Abbildung 4-2 schematisch dargestellt. Der vertikale Wasseraustausch in der ungesättigten Zone mit den Prozessen Infiltration, Perkolation und kapillarem Aufstieg wird u.a. durch die Verwendung der matrixpotentialabhängigen Darcy-Buckingham Beziehung realisiert (vgl. z.B. Jury und Horton, 2004). Der Bestandsniederschlag („P<sub>interz.</sub>“) bildet nach der Passage des Interzeptions-Moduls von PANTA RHEI den Input für das Bodenmodell. Die Retentionsbeziehungen der Bodenspeicher werden mit Hilfe der Software Rosetta Lite 2003 (Schaap et al., 2001) durch Transferfunktionen nach van Genuchten (1980) parametrisiert. Die Mächtigkeit des oberen Speichers wird mit 30 cm angenommen, da der Wassergehalt der obersten Bodenschicht ausschlaggebend für die Infiltrationsrate ist (vgl. z.B. Binley et al., 1989; Beven, 1995; Coles et al., 1997; Bronstert und Bardossy, 1999; Entin et al., 2000; Hasenauer et al., 2009). Die Mächtigkeiten der Speicher 2 und Speicher 3 werden durch die Durchwurzelungstiefe landnutzungsabhängig auf Hydrotopbasis angepasst.

Die Parametrisierung des Bodenmodells erfolgt nicht durch einen „effektiven“ Parametersatz, sondern berücksichtigt die natürliche räumliche Subgrid-Variabilität. Diese wird auch von kleinräumigen Hydrotopen nicht aufgelöst, was zu physikalisch unplausiblen Parameterkombinationen führen kann. Besonders für die Modellierung des Niedrigwasserbereichs spielen die Prozesse der Abflussbildung in und auf der ungesättigten Bodenzone eine große Rolle. Dazu gehören nicht nur Infiltrations- und Perkulationsraten, sondern auch die Reduktion der potentiellen Evapotranspiration. Diese ist speziell in Trockenzeiten (wo vorwiegend Niedrigwasser auftreten kann) sehr einflussreich auf das letztendlich resultierende Abflussverhalten eines Gebiets. Das für dieses Projekt entwickelte Bodenmodul verfolgt einen innovativen Ansatz

zur Berücksichtigung der Subgrid-Variabilität: Es werden 5 parallel rechnende Bodenmodelle mit unterschiedlichen Parametersets betrieben. Die jeweiligen Submodelle (Domänen) sind durch Austauschprozesse 1. Ordnung miteinander gekoppelt. Diese Anordnung ist in Abbildung 4-2 durch die vertikale Gliederung angedeutet und in Abbildung 4-3 verdeutlicht.

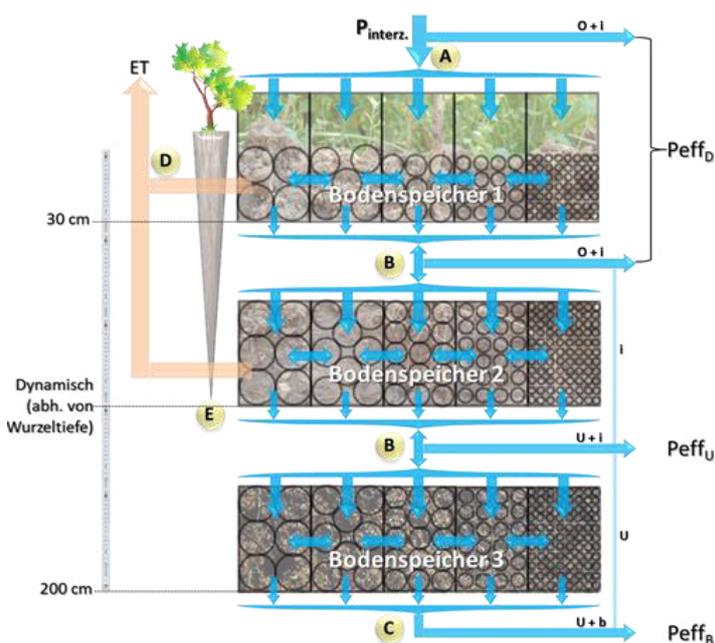


Abbildung 4-2: Bodenmodell DYVESOM. A = Aufteilung Direktabfluss/Infiltration. B = Perkolation/kapillarer Aufstieg sowie laterale Abflusskomponente. C = Ausfluss aus unterem Speicher, Grundwasserneubildung. D = Evapotranspiration mit dynamischen Anteil aus Speicher 1 und 2, abhängig vom GSI (Growing Season Index). E = mittlere Durchwurzelungstiefe, abhängig von der Landnutzung

Die nach Penman-Monteith (s. Penman, 1948; Monteith, 1965) berechnete Evapotranspiration wird nach Feddes et al. (1976) in Abhängigkeit der Matrixpotentiale der oberen Speicher reduziert. Die aktuelle Evapotranspiration wird ausschließlich aus Speicher 1 und Speicher 2 entnommen. Das Wasser in Speicher 3 kann kapillar aufsteigen oder als Grundwasserneubildung aussickern (Unit Gradient Randbedingung).

Die prozentualen Anteile an der gesamten Evapotranspiration für Speicher 1 und 2 werden von einer dynamischen adaptierten Wurzeldichte in Abhängigkeit vom Growing Season Index (GSI) gestellt. Der GSI ist eine aus Klimavariablen einfach zu berechnende Größe und dient als normiertes Maß für die Aktivität der Vegetation im Jahresverlauf (Jolly et al., 2005). Förster et al. (2012) haben die Gültigkeit dieses Ansatzes für die betrachteten Einzugsgebiete in Niedersachsen validieren können. In Gleichung [4-2] wird der prozentuale Anteil der Evapotranspiration an Speicher 1 mit der Tiefe beschrieben. In Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 ist Gleichung [4-2] für verschiedene GSI-Werte für zwei unterschiedliche Gesamttiefen der Wurzeln graphisch dargestellt. Es wird deutlich, dass bei hoher Aktivität der Vegetation die Wurzeldichte mit der Tiefe deutlich erhöht wird, was insgesamt zu einer erhöhten Transpiration führt. Typische Jahresverläufe für den GSI sind in Abbildung 4-6 für eine zufällige Teilfläche im ALO Gebiet dargestellt. Die große Variabilität, vor allem zu Beginn der Vegetationszeit, hat einen großen Einfluss auf den Gebietswasserhaushalt und kann durch den GSI, welcher Rückkopplungen auf das Bodenmodell ausübt, auch für Simulationen mit Klimaszenarien modellhaft abgebildet werden.

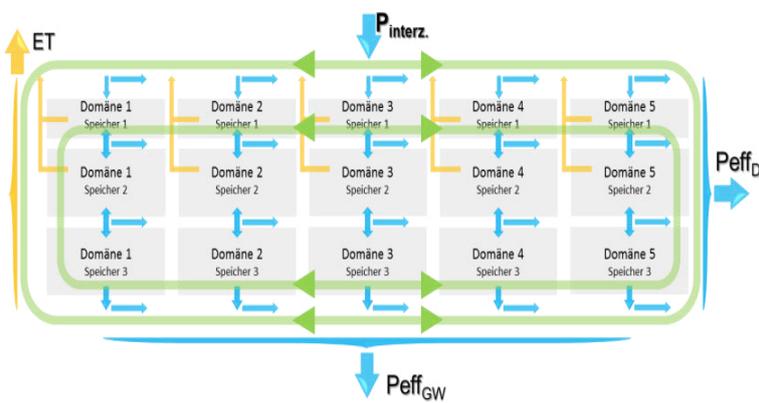


Abbildung 4-3: Schematische Übersicht des Bodenmodells DYVESOM mit den 5 parallel betriebenen Submodulen (Domänen)

$$G(z) = 100 \cdot \frac{\left( z - k \cdot z \left( \frac{z}{Z_{Ges}} \right)^{0.15} \right)}{(1 - k) \cdot Z_{Ges}} \quad [4-2]$$

Wobei:  $Z_{Ges} = dz1 + dz2 \cdot GSI^2$

Mit:

G(z)	Anteil der Evapotranspiration an Speicher 1 (tiefenabhängig)	[%]
GSI	Growing Season Index	[-]
k	Koeffizient (= 0,8)	[-]
$Z_{Ges}$	Gesamt-Wurzeltiefe	[cm]
z	Tiefe	[cm]
dz1	Mächtigkeit Speicher 1	[cm]
dz2	Mächtigkeit Speicher 2	[cm]

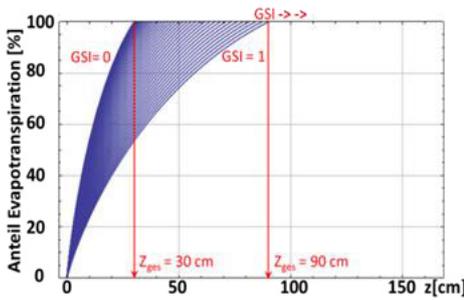


Abbildung 4-4: Prozentualer Anteil der Evapotranspiration an Speicher 1 in Abhängigkeit von der Tiefe z für verschiedene GSI. Gesamttiefe der Wurzeln = 90 cm

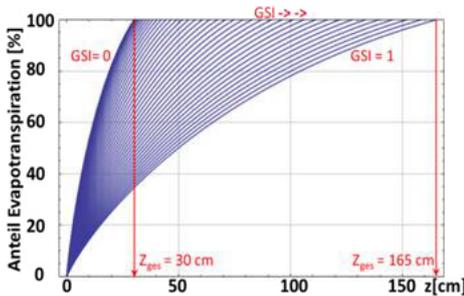


Abbildung 4-5: Prozentualer Anteil der Evapotranspiration an Speicher 1 in Abhängigkeit von der Tiefe z für verschiedene GSI. Gesamttiefe der Wurzeln = 165 cm

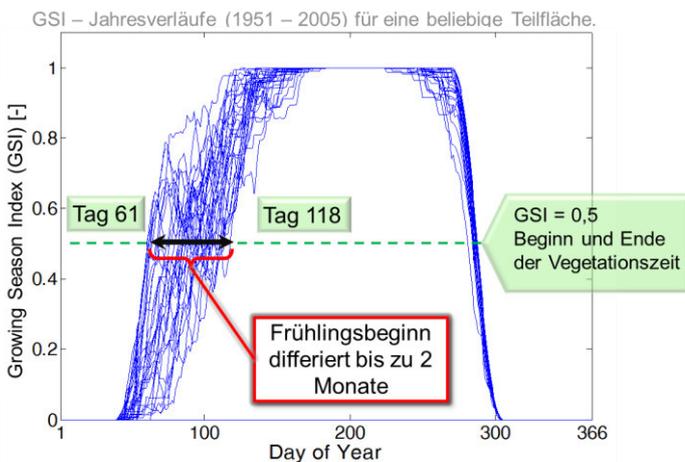


Abbildung 4-6: Jahresverläufe (1951-2005) für den GSI für eine beliebige Teilfläche im ALO Gebiet

## 4.4 Kalibrierung und Validierung

### 4.4.1 Gütemaße

Zur Abschätzung der Güte einer Simulation im Vergleich zur Beobachtung werden in der Hydrologie, nebst visuellen bzw. graphischen Verfahren, unterschiedliche statistische Gütekriterien verwendet. Die

Gütekriterien, die in diesem Teilprojekt Anwendung finden, sollen kurz erläutert werden. Nähere Betrachtungen lassen sich in Standardwerken wie Sachs (2004), Bourier (2013) oder Schönwiese (2013) nachschlagen. Einen guten Überblick für Gütekriterien und deren Interpretation in hydrologischen Anwendungen liefern die Studien von Legates (1999), Hall (2001), Krause (2005) oder auch Moriasi (2007).

Der Korrelationskoeffizient  $R$  ist eine Maßzahl für die Stärke eines linearen Zusammenhangs mit einer Reichweite von  $-1$  bis  $+1$ , wobei  $+1$  ein perfekter (positiver bzw. negativer) linearer Zusammenhang bedeutet, während für  $R=0$  kein Zusammenhang besteht. Der Korrelationskoeffizient wird durch die Kovarianz  $s_{xy}$  der berechneten ( $x$ ) und gemessenen Größe ( $y$ ) ausgedrückt, die durch das Produkt der Standardabweichungen  $\sigma_x \sigma_y$  normiert wird:

$$r = \frac{s_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad [4-3]$$

wobei  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

Mit:

$R$	Korrelationskoeffizient	[-]
$x_i$	Berechnete Größe (z.B. simulierter Abfluss)	z.B. [m <sup>3</sup> /s]
$y_i$	Gemessene Größe (z.B. beobachteter Abfluss)	z.B. [m <sup>3</sup> /s]
$s_{xy}$	Kovarianz der betreffenden Größen	z.B. [m <sup>6</sup> s <sup>-2</sup> ]
$\sigma_x$	Standardabweichung der berechneten Größe	z.B. [m <sup>3</sup> /s]
$\sigma_y$	Standardabweichung der gemessenen Größe	z.B. [m <sup>3</sup> /s]
$n$	Anzahl Datenpaare	[-]

Bezogen auf die hydrologische Anwendung (Güte des simulierten Abflusses) ist zu beachten, dass der Korrelationskoeffizient ausschließlich die Güte des linearen Zusammenhangs wiedergibt, jedoch keinerlei Aussage über das Abflussvolumen beinhaltet.

Die Modelleffizienz  $E$  nach Nash (1970) ist ein sehr etabliertes Gütemaß in der Hydrologie.  $E$  berücksichtigt sowohl die Form als auch das Volumen von Abflusszeitreihen. Die Modelleffizienz ist als Eins minus dem Quotient des mittleren quadratischen Fehlers

MSE zwischen Simulation und Beobachtung über der Varianz der Messung definiert:

$$E = 1 - \frac{MSE}{s_y} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad [4-4]$$

Mit:

E	Modelleffizienz	[-]
MSE	Mittlerer quadratischer Fehler	z.B. [m <sup>6</sup> s <sup>-2</sup> ]
s <sub>y</sub>	Varianz der Messung	z.B. [m <sup>6</sup> s <sup>-2</sup> ]

Die Reichweite von E geht von 1 (perfekter Fit) bis -∞, wobei bei Werten von E < 0 der Mittelwert der Beobachtung ein besserer Schätzer wäre als die Simulation.

Da die Modelleffizienz durch die Quadrierung der Abweichungen sensibler gegenüber Fehlern in Hochwasserperioden als gegenüber Fehlern in Niedrigwasserperioden ist, gibt es verschiedene Varianten von Gleichung [4-4]. So lassen sich durch Logarithmieren von x<sub>i</sub> und y<sub>i</sub> die Unterschiede zwischen Hoch- und Niedrigwasserabflüssen verringern (siehe Gleichung [4-5]). Eine gleiche Gewichtung zwischen Hoch- und Niedrigwasserabflüssen wird durch Normierung der Abweichungen erreicht (siehe Gleichung [4-6]).

$$E_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(y_i) - \ln(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(y_i) - \ln(\bar{y}))^2} \quad [4-5]$$

Mit:

E <sub>log</sub>	Modelleffizienz mit logarithmierten Werten	[-]
------------------	--	-----

$$E_{rel} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - x_i}{y_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \bar{y}}{y_i}\right)^2} \quad [4-6]$$

Mit:

E <sub>rel</sub>	Modelleffizienz mit normierten Werten	[-]
------------------	---------------------------------------	-----

Die mittlere Abweichung einer berechneten Größe im Vergleich zur Beobachtung lässt sich mit der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (= root mean squared error, RMSE) ausdrücken. Durch Quadrierung wird verhindert, dass sich positive Abweichungen mit negativen Abweichungen aufheben. Durch die Wurzel erhält der RMSE wieder die Ausgangseinheit der eingehenden Größen.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad [4-7]$$

Mit:

RMSE	Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler	z.B. [m <sup>3</sup> /s]
x <sub>i</sub>	Berechnete Größe (z.B. simulierter Abfluss)	z.B. [m <sup>3</sup> /s]
y <sub>i</sub>	Gemessene Größe (z.B. beobachteter Abfluss)	z.B. [m <sup>3</sup> /s]

#### 4.4.2 Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung

Die hydrologischen Teilprozesse in PANTA RHEI erfordern die Anpassung von Modellparametern. Diese dienen zur Beschreibung der vom Modell nicht aufgelösten Prozesse und werden durch Optimierung angepasst.

Hydrologische Modelle werden typischerweise an Pegeln kalibriert, welche ein Einzugsgebiet repräsentieren. Für alle Pegel im Einzugsgebiet wurden Beobachtungsdaten, welche vom NLWKN bereitgestellt wurden, für die Modellanwendung aufbereitet. Dafür wurden Abflusszeitreihen verwendet, die vom NLWKN bereits aus den Wasserstandsbeobachtungen mit Hilfe von Schlüsselkurven ermittelt worden sind. Da die spätere Auswertung an den in Tabelle 4-1 gelisteten Referenzpegeln erfolgt, wurde das Modell für diese maßgeblichen Pegelgebiete mit besonderem Anspruch kalibriert und validiert.

Neben visueller Begutachtung auf unterschiedlichen Zeitskalen werden mathematische Zielfunktionen verwendet, welche die Simulationsgüte mit Bezug auf vorliegende Beobachtungen bewerten (s. Kapitel 4.4.1). Nicht immer ist die Parameterkombination mit dem höchsten (mathematischen) Gütemaß die ideale Kombination. So kann es vorkommen, dass trotz hoher Korrelation zwischen Beobachtung und Simulation das Gesamtabflussvolumen nicht passt. Ebenfalls kann es vorkommen, dass trotz hoher Modelleffizienz der monatliche Wasserhaushalt nicht getroffen wird. Weiterhin ist in diesem Projekt ein erhöhter Anspruch an den Niedrigwasserabfluss gegeben. Aufgrund dessen wurden, zusätzlich zu der Berechnung der gängigen mathematischen Gütemaße, zur Kalibrierung ver-

schiedene graphische Analysen durchgeführt, die durch Expertenwissen bewertet wurden. Hierzu gehören:

- Abflussgang
- Abflussvolumen
- Langjährige, mittlere Quartalsabflüsse
- Langjährige, mittlere Monatsabflüsse
- Niedrigwasserabflüsse

Als Kalibrierungsperiode wurde der Zeitraum von 11/1971 bis 10/1991 und für die Validierung 11/1991 bis 10/2001 ausgewählt. Um eine Analogie zu gewährleisten, entsprechen diese Zeiträume auch jenen, die in Phase 2 verwendet wurden.

Beispielhaft für das Pegelgebiet Rethem an der Aller soll die Kalibrierungsprozedur und dessen Ergebnis kurz vorgestellt werden:

1. *Abflussgang und Abflussvolumen* (vgl. Abbildung 4-7). Die Ganglinie des simulierten Abflusses (in Rot dargestellt) zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung mit der Beobachtung (in Blau dargestellt). Leichte Schwächen gibt es bei den Abflussspitzen zu Hochwasserzeiten. Da das Modell jedoch besonders auf Niedrigwasserverhältnisse ausgelegt ist, kann eine perfekte Wiedergabe der Hochwässer, alleine aus Gründen der Modellstruktur und Modellphysik, nicht immer gelingen. Das zeitliche Auftreten der Hochwässer hingegen (im Gegensatz zum Scheitelabfluss) wird vom Modell sehr gut getroffen. Das gleiche gilt für die Niedrigwasserabflüsse. Hier passen sowohl Auftreten als auch die Höhen. Der zweite wichtige Aspekt ist das Gesamtabflussvolumen, in Abbildung 4-7 als Summenlinie eingetragen. Dieses kann am Pegelgebiet Rethem, welches der unterste Pegel im gesamten ALO Einzugsgebiet ist, sehr gut wiedergegeben werden.

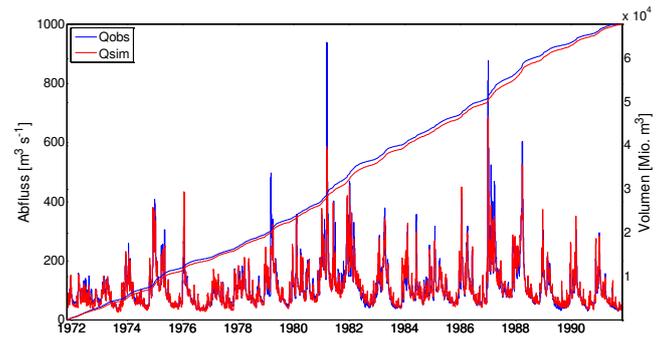


Abbildung 4-7: Abflussganglinie und Summenlinie für Simulation (*Qsim*, rot) und Beobachtung (*Qobs*, blau) für die Kalibrierungsperiode vom 01.11.1971 – 31.10.1991 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller

2. *Mittlere Quartalsabflüsse und mittlere monatliche Abflüsse* (vgl. Abbildung 4-8). Um zu prüfen, ob das Modell den Wasserhaushalt wiedergeben kann, werden zunächst langjährige mittlere Quartalsabflüsse berechnet (in Abbildung 4-8 als grüne Linien dargestellt). Für das Pegelgebiet Rethem wird hier eine sehr hohe Übereinstimmung erreicht. In einem weiteren Schritt wird die zeitliche Auflösung verfeinert, indem langjährige mittlere, monatliche Abflüsse berechnet werden (in Abbildung 4-8 als blaue Balken dargestellt). Auch hier kann für das Pegelgebiet Rethem, besonders im relevanten Niedrigwasserbereich im Sommer und frühen Herbst, eine hohe Übereinstimmung erreicht werden.

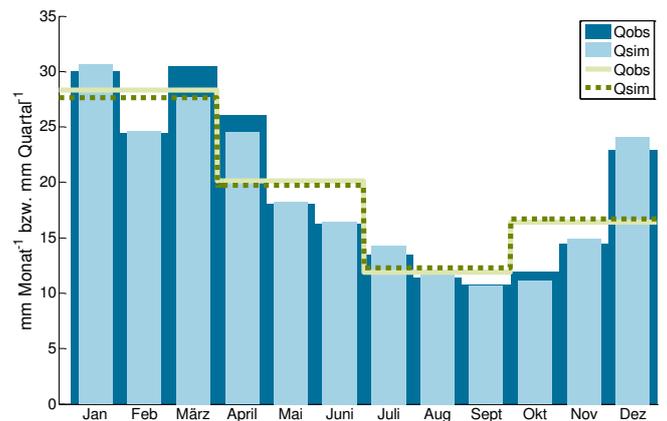


Abbildung 4-8: Langjährige mittlere Quartalsabflüsse für Simulation (*Qsim*, dunkelgrün, gestrichelte Linie) und Beobachtung (*Qobs*, hellgrün, durchgezogene Linie) sowie langjährige mittlere monatliche Abflüsse für Simulation (*Qsim*, hellblau) und Beobachtung (*Qobs*, dunkelblau) für die Kalibrierung vom 01.11.1971 – 31.10.1991, Pegel Rethem

3. *Jährliche Niedrigwasserabflüsse* (vgl. Abbildung 4-9). Eine gute Abbildung des Abflussgangs, des Abflussvolumens sowie des monatlich differenzierten Wasserhaushalts sind eine Voraussetzung aber keine Garantie, dass auch der jährliche Niedrigwasserabfluss gut getroffen wird. Aus diesem Grund wird auch dieses in die Kalibrierungsprozedur mit einbezogen, indem der berechnete, jährliche Niedrigwasserabfluss (NQsim) dem Beobachteten gegenübergestellt wird. Das jährliche NQ wurde auf Tagesbasis berechnet und ist im Allgemeinen sehr schwer modellhaft abzubilden. Dennoch werden für das Pegelgebiet Rethem gute Übereinstimmungen gefunden, welche in Abbildung 4-9 dargestellt sind.

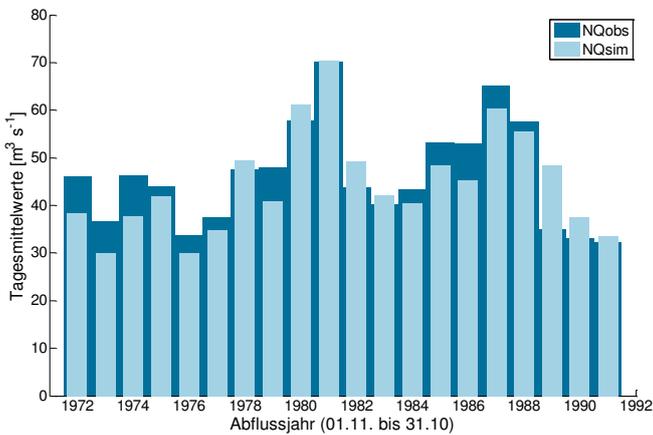


Abbildung 4-9: Jährliche Niedrigwasserabflüsse für Simulation (NQsim, hellblaue Balken) und Beobachtung (NQobs, dunkelblaue Balken) für die Kalibrierungsperiode vom 01.11.1971 – 31.10.1991 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller

4. *Mathematische Gütemaße* (s. Tabelle 4-2). Nachdem die vorherigen Schritte zufriedenstellend abgeschlossen wurden, gibt es oft mehr als eine mögliche Modellparameterkombination, die ähnlich gute Übereinstimmungen erreicht. Daher werden die mathematischen Gütemaße, die durch die jeweiligen Kombinationen erreicht wurden, zur weiteren Beurteilung verwendet. Für das Pegelgebiet Rethem ergaben sich mit einer Modelleffizienz von 0,91 und einer Korrelation von 0,96 sehr hohe Werte. Für  $E_{log}$  und  $E_{rel}$  (s. Kapitel 4.4.1), die Niedrigwasserabflüsse verstärkt in die Berechnung einbeziehen, ergaben sich sogar höhere Werte mit 0,92 bzw. 0,95.

Alle für Rethem gezeigten Abbildungen und Gütemaße beruhen auf der letztlich resultierenden Modellparameterkombination, die für die Validierung und für die Berechnung der Szenarien verwendet wurde (vgl. Abbildung 4-7, Abbildung 4-8, Abbildung 4-9, s. Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Mathematische Gütemaße für die Kalibrierungsperiode vom 01.11.1971 – 31.10.1991 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller

Pegelgebiet	Kalibrierung			
	E	R	$E_{log}$	$E_{rel}$
Rethem	0.91	0.96	0.92	0.95

Für die Validierung wurde analog zur Kalibrierungsprozedur vorgegangen, mit dem Unterschied, dass die Modellparameterkombination nicht mehr verändert wurde. So wurde getestet, ob das kalibrierte Modell in einer zeitlich unabhängigen Periode ebenfalls gute Übereinstimmungen mit der Beobachtung erzielen kann und somit Szenarien-fähig ist. In Abbildung 4-10, Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 sind Abflussgang und Abflusssumme, Quartalsmittel und Monatsmittel sowie Jahres-NQ dargestellt. Die simulierte Abflussganglinie erreicht ebenso wie die Summenlinie eine gute Übereinstimmung mit der Beobachtung. Insgesamt wird der Abfluss leicht überschätzt. Die mittleren Quartals- und Monatsabflüsse werden im Sommer ebenfalls leicht überschätzt. Im Winter, wo sie in der Kalibrierungsperiode unterschätzt wurden, stellt sich für die Validierung eine höhere Übereinstimmung zwischen Simulation und Beobachtung ein. Auch die Jahres-NQ werden in der Validierungsperiode etwas überschätzt, insgesamt aber gut getroffen. Es wird vermutet, dass der vom Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover gefundene Bruchpunkt (s. Kapitel 5.1.1.3) in den Beobachtungen des Abflusses im Jahre 1988 hier einen Einfluss hat. Nach dem Bruchpunkt ist der beobachtete Abfluss wesentlich geringer als zuvor. Da das Modell fast ausschließlich an Zeitreihen kalibriert wurde, die vor dem Bruchpunkt aufgenommen wurden, ist es generell an den „höheren“ beobachteten Abfluss vor dem Bruchpunkt kalibriert. Konsequenterweise wird nun für die Validierung (an den Beobachtungsdaten nach dem Bruchpunkt) der Abfluss generell leicht überschätzt. Dies spiegelt sich sowohl im Gesamtabflussvolumen als auch in den mittleren Quartals- und Monatsabflüssen wider. Insgesamt ist dies jedoch nicht bedenklich, da für die späte-

re Auswertung der Szenarien die Ergebnisse der Zukunftsszenarien immer den Ergebnissen, die aus Daten des Kontrolllaufs 20C entstanden sind, gegenübergestellt werden. Es werden keine Vergleiche mit den Ergebnissen, die aus den „realen“ historischen Klimarandbedingungen berechnet wurden, und auch kein Vergleich mit den historischen Beobachtungsdaten angestellt.

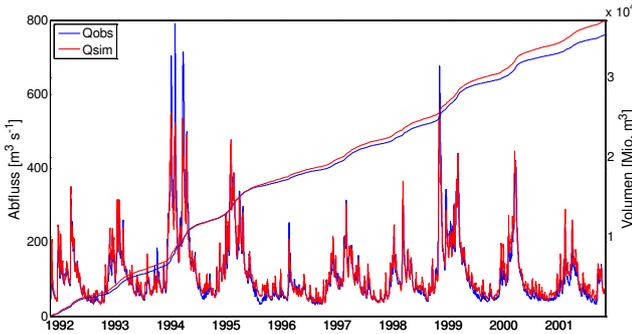


Abbildung 4-10: Abflussganglinie und Summenlinie für Simulation (*Qsim*, rot) und Beobachtung (*Qobs*, blau) für die Validierungsperiode vom 01.11.1991 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller.

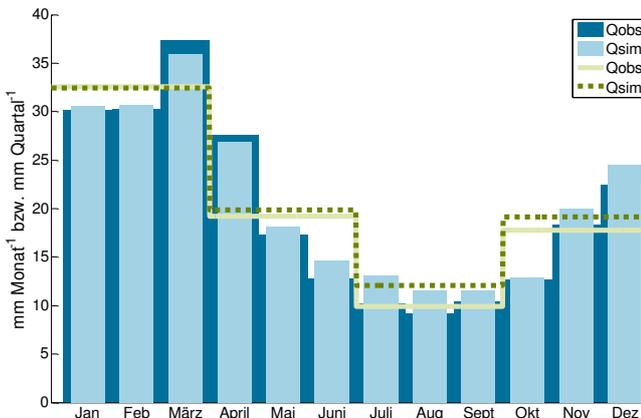


Abbildung 4-11: Langjährige mittlere Quartalsabflüsse für Simulation (*Qsim*, dunkelgrün, gestrichelte Linie) und Beobachtung (*Qobs*, hellgrün, durchgezogene Linie) sowie langjährige monatliche, mittlere Abflüsse für Simulation (*Qsim*, hellblau) und Beobachtung (*Qobs*, dunkelblau) für die Validierungsperiode vom 01.11.1991 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller.

Die mathematischen Gütemaße für den Validierungszeitraum für das Pegelgebiet Rethem sind in Tabelle 4-3 aufgelistet. Es werden ähnliche (zum Teil höhere) Werte erreicht wie für die Kalibrierungsperiode.

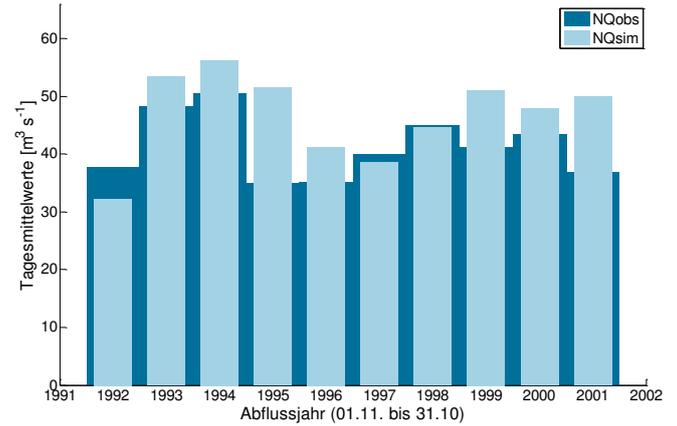


Abbildung 4-12: Jährliche Niedrigwasserabflüsse für Simulation (*NQsim*, hellblaue Balken) und Beobachtung (*NQobs*, dunkelblaue Balken) für die Validierungsperiode vom 01.11.1991 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller.

Tabelle 4-3: Mathematische Gütemaße für die Validierungsperiode vom 01.11.1991 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller.

Pegelgebiet	Validierung			
	E	R	E_log	E_rel
Rethem	0.92	0.96	0.91	0.93

Die Abflussgang- und Summenlinie für den gesamten historischen Zeitraum (Kalibrierungs- + Validierungsperiode) sind in Abbildung 4-13 dargestellt. Insgesamt wird der Wasserhaushalt mit einer hohen Genauigkeit wiedergegeben.

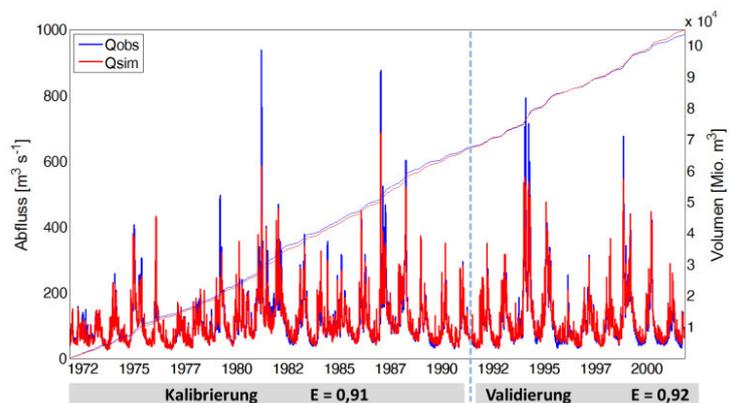


Abbildung 4-13: Abflussganglinie und Summenlinie für Simulation (*Qsim*, rot) und Beobachtung (*Qobs*, blau) für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode vom 01.11.1971 – 31.10.2001 für das Pegelgebiet Rethem an der Aller.

Die erreichten Modelleffizienzen in der Kalibrierungs- und Validierungsperiode für alle Referenzpegel sind graphisch in Abbildung 4-14 dargestellt. Eine analoge Grafik für  $E_{log}$  ist in Abbildung 4-15 illustriert. Es zeigt sich, dass für alle Pegel eine hohe Modellgüte erreicht wurde, welche für die Kalibrierung zumeist leicht höher ist als für die Validierung. Die Referenzpegel Harzburg, Altenau und Wunstorf wurden in der späteren Phase der Projektlaufzeit mit in die Liste der Referenzpegel aufgenommen, nachdem die Kalibrierungsphase bereits abgeschlossen war. Aus diesem Grund sind die Modellgüten dieser Pegel leicht schwächer im Vergleich zu den übrigen Referenzpegeln. Für das Pegelgebiet Derneburg standen die beobachteten Abflusszeitreihen erst ab 1977 zur Verfügung, weswegen es hier eine verkürzte Kalibrierungsperiode gab. Sämtliche mathematische Gütemaße für alle Referenzpegel sind im Anhang 5 aufgeführt. Ein Vergleich zwischen den Modelleffizienzen für Kalibrierung und Validierung des Modells für Phase 2 mit dem Modell aus Phase 3 zeigt Anhang 6. An fast allen Pegeln wurden in Phase 3 höhere Modelleffizienzen erreicht.

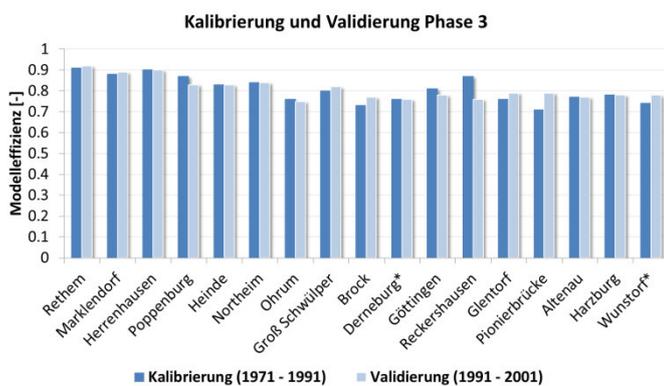


Abbildung 4-14: Modelleffizienzen aller Referenzpegel für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode.

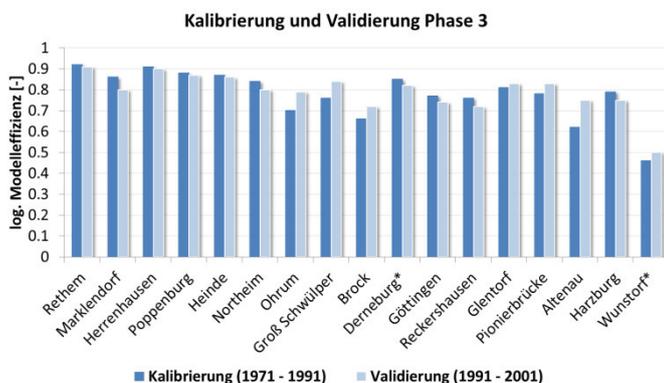


Abbildung 4-15: Logarithmierte Modelleffizienzen aller Referenzpegel für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode.

Abbildung 4-16 zeigt die RMSE auf Monatsbasis für alle Referenzpegelgebiete. Die RMSE resultierend aus der Kalibrierungsperiode sind in hellgrün und die RMSE für die Validierungsperiode sind in dunkelgrün dargestellt. Zusätzlich zu den Mittelwerten (Balkenplots) über alle Referenzpegel sind die Einzelwerte (als Punkte) eingetragen. Der RMSE wurde jeweils normiert, damit ein Vergleich zwischen den Monaten möglich ist (anderenfalls hätten die Monate mit hohem Abfluss auch einen viel größeren RMSE als die übrigen Monate). Anhand von Abbildung 4-16 lässt sich erkennen, dass das Modell in jedem Monat eine vergleichsweise ähnliche Güte aufweist mit einer Tendenz zu besseren Werten im Sommer.

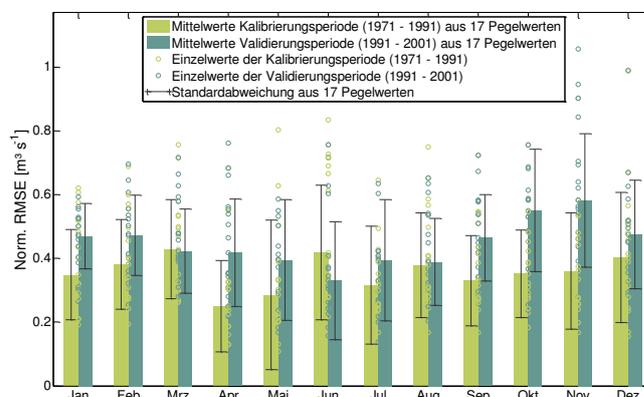


Abbildung 4-16: Monatliche normierte RMSE für Kalibrierungs- und Validierungsperiode für alle Referenzpegelgebiete.

## 5 Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse

### 5.1 Betrachtung gegenwärtiger Verhältnisse

#### 5.1.1 Analyse der beobachteten Abflüsse in Niedersachsen

Ähnlich den Trockenwetterindizes (s. Kapitel 3.1.3) können Niedrigwasserindizes aus täglichen Abflusszeitreihen extrahiert werden, die in der Lage sind, Merkmale von Perioden mit unterdurchschnittlichem Abfluss zu quantifizieren.

An den so gewonnenen Indexzeitreihen können wiederum Trendanalysen durchgeführt werden, um Änderungen unterschiedlicher Niedrigwassercharakteristika einschätzen zu können.

In Niedersachsen wurden bereits umfangreiche Analysen zu Niedrigwasserkenngößen von Dallmann (2004) und Groß (2009) durchgeführt. Dallmann hat in der Folge zweier Trockenperioden vom Jahr 2003 Niedrigwasserstatistiken für unterschiedliche Flusseinzugsgebiete an der Leine, Innerste, Oker und Aller im südlichen Niedersachsen aufgestellt. Mit statistischen Methoden wurde an 15 Pegeln das NM7Q jeweils für den Zeitraum April bis März ausgewertet. An der Leine z.B. wurden mit zunehmender Einzugsgebietsgröße kontinuierlich seltener werdende Niedrigwasserereignisse festgestellt, in kleineren Einzugsgebieten wie am Aller-Zufluss Ise wurde ein signifikanter Trend zu sinkenden Niedrigwasserabflüssen ermittelt. Mit dieser Grundlage wurde das Trockenjahr 2003 eingeordnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Niedrigwasserabflüsse 2003 bei den meisten Pegeln in Südniedersachsen Jährlichkeiten von 3 bis 5 Jahren aufwiesen, an der Aller und an der Schunter auch zum Teil 5 bis 10 Jahren. Eine wichtige Erkenntnis wurde am Pegel Heinde an der Innerste gewonnen. Aufgrund von Talsperrensanierungen wurde im Jahr 2003 keine Niedrigwasseraufhöhung an der Innerste vorgenommen. Infolgedessen stieg das statistische Wiederkehrintervall des NM7Q bei Heinde auf 30 bis 40 Jahre. Groß führte Untersuchungen zu Niedrigwasserabflusskennwerten (NM7Q), Trends und zur Saisonalität in Niedersachsen durch, um Abflussentwicklungen großräumig zu identifizieren. Vor allem im südlichen Niedersachsen zeigen

sich im selben Untersuchungsgebiet wie bei Dallmann deutlich negative Trends im Verhalten der langjährigen Niedrigwasserabflüsse.



Abbildung 5-1: Lage der Pegel mit Aufzeichnungen des täglichen mittleren Abflusses für den Zeitraum 1951-2005 (oben) und 1966-2010 (unten)

#### 5.1.1.1 Datenbasis

Als Grundlage zur Berechnung der Niedrigwasserindizes dienen Tageszeitreihen des mittleren Abflusses. Für den direkten Vergleich mit den Trends im Trockenwetter, wurde zunächst derselbe Beobachtungszeitraum (1951-2005) für die Niedrigwasseranalysen gewählt. Für diesen Zeitraum standen nach Konsistenz- und Homogenitätsprüfung 33 Pegel zur Verfügung. Um vor allem die Möglichkeiten der räumlichen Betrachtung der Trends zu erweitern, wurde ein zweiter Zeitraum (1966-2010) gewählt, für welchen 93 Pegel mit ausreichender Reihenlänge zur Verfügung

standen. Die verwendeten Pegel für die jeweiligen Zeiträume sind in Abbildung 5-1 abgebildet.

### 5.1.1.2 Methodik

Die verwendeten Niedrigwasserindizes sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Die Indizes wurden wiederum für das Gesamtjahr und die einzelnen Jahreszeiten berechnet. Der Schwellenwert zur Berechnung der maximalen Unterschreitungsdauer  $D_{max}$  und des maximalen Defizitvolumens  $V_{max}$  wurde dabei als das 10%-Langzeitquantil des Abflusses gewählt, der für das Jahr und die jeweiligen Saisons individuell aus den beinhalteten Tagesabflüssen bestimmt wurde.

Der Ablauf der Trendanalysen ist derselbe wie in Kapitel 3.1.3 für die Trockenwetteranalyse beschrieben. Beim Niedrigwasser wurden die Indexzeitreihen jedoch zusätzlich vor Analyse der Trends einem prewhitening unterzogen, um eine mögliche Autokorrelation aus den Reihen zu entfernen. Im Gegensatz zu

zeitlich eher unabhängigen meteorologischen Ereignissen, können Zusammenhänge zwischen zeitlich nahen Niedrigwasserperioden bestehen, besonders in Gebieten mit hoher Retentionszeit. Autokorrelierte Zeitreihen stellen ein Problem für eine adäquate Trenderkennung dar, da sie einen nicht vorhandenen Trend suggerieren können. Deshalb wird das Verfahren nach Yue et al. (2002) angewandt, um einen Einfluss auf die späteren Ergebnisse der Trendanalysen auszuschließen. Dafür wird zunächst die Steigung des Trends, welcher wiederum einen Einfluss auf die Detektion von autoregressiven Prozessen hat, nach Theil (Theil, 1950a-c) und Sen (Sen 1968) geschätzt und von der Originalzeitreihe subtrahiert. Im nächsten Schritt wird der Autokorrelationskoeffizient mit einer Zeitdifferenz von 1 berechnet. Ist der Autokorrelationskoeffizient signifikant, d.h. liegt sein Wert außerhalb des 95%-Konfidenzintervalls, wird er von der trendbereinigten Zeitreihe entfernt. Anschließend wird der zuvor entfernte Trend zur Zeitreihe zurückaddiert.

Tabelle 5-1: Liste der verwendeten Niedrigwasserindizes

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
NM7Q	$m^3/s$	Niedrigstes 7-tägiges Mittel des Abflusses
$D_{max}$	d	Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit $Q < 10\%$ -Langzeitquantil des Abflusses
$V_{max}$	$m^3$	Maximales akkumuliertes Defizitvolumen zwischen $Q$ und dem 10%-Langzeitquantil des Abflusses
Q10	$m^3/s$	10%-Quantil der täglichen Abflüsse
BFI	-	Base Flow Index: Verhältnis des Basisabflusses zum beobachteten Abfluss

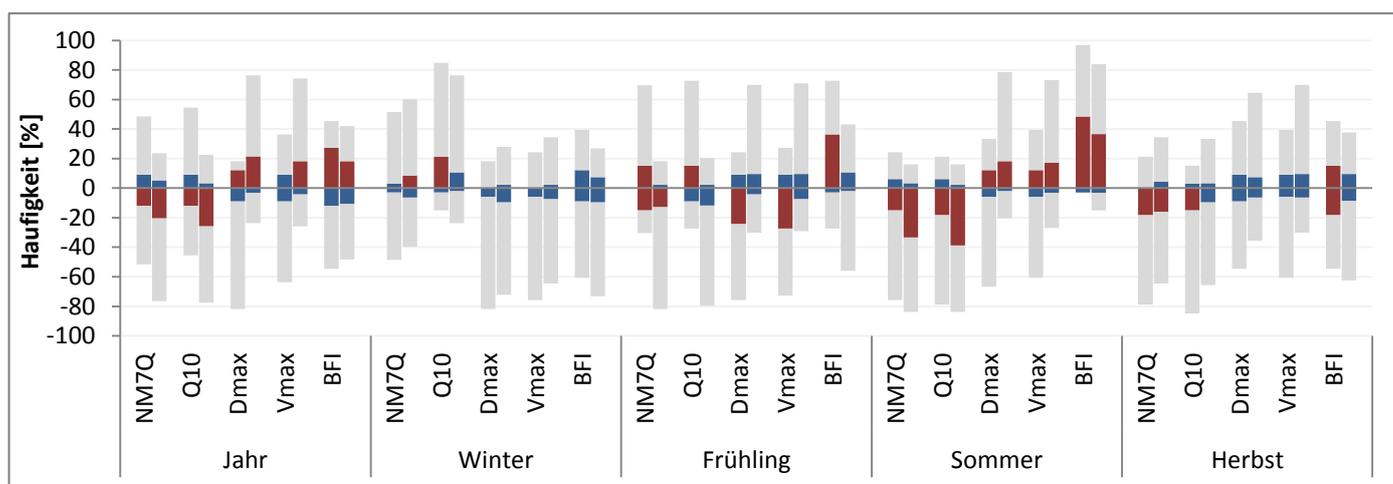


Abbildung 5-2: Ergebnisse des Mann-Kendall Trendtests für die Zeiträume 1951-2005 (linker Balken) und 1966-2010 (rechter Balken). Die Gesamtanzahl der Trends ist in grau, lokale signifikante Trends in blau und feldsignifikante Trends in rot dargestellt

Zusätzlich zu den Trendanalysen wurden die Niedrigwasserindexreihen auf Bruchpunkte getestet. Hierzu wurde das nicht-parametrische Verfahren nach Pettitt (1979) angewandt. Für den Test werden für jeden Wert der Zeitreihe die Summe der Vorzeichen der Differenzen zu allen zeitlich nachfolgenden Werten berechnet. Die Teststatistik ergibt sich aus dem Maximalwert dieser Summen. Die Signifikanz der Bruchpunkte wurde wiederum auf dem 5%-Niveau getestet.

### 5.1.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Mann-Kendall Tests, wie in Abbildung 5-2 für beide Untersuchungszeiträume dargestellt, zeigen die stärksten Änderungen der Niedrigwasserindizes im Sommer. Sowohl die Abnahmen im NM7Q und Q10, als auch die Zunahmen im Dmax, Vmax und BFI, weisen auf eine Abnahme des Niedrigwasserabflusses hin. Im Gesamtjahr entsprechen die Trends den sommerlichen Änderungen, mit Ausnahme des BFI, der hier eher negative Trends aufweist. Im Frühling und Herbst sind die Tendenzen der Indizes ähnlich wie im Gesamtjahr, die Anzahl der signifikanten Trends ist jedoch weitaus geringer. Im Winter sind die Änderungen entgegengesetzt, allerdings nur für den NM7Q und das Q10 in jeweils nur einem Untersuchungszeitraum feldsignifikant. Die jeweiligen absoluten und prozentualen Änderungen pro Saison sind in Tabelle 5-2 aufgeführt. Im Vergleich der gewählten Beobachtungszeiträume fällt hier auf, dass sich Trendrichtung und Signifikanz besonders im

Frühling zwischen den beiden Perioden stark unterscheiden. Abbildung 5-3 zeigt anhand der über alle Stationen gemittelten Trendgeraden für beide Zeiträume die Entwicklung des spezifischen NM7Q. Ein starker Anstieg bis etwa Anfang der 1970er Jahre wird im kürzeren Beobachtungszeitraum nicht erfasst, was in einer insgesamt negativen Trendsteigung resultiert, während der Einfluss im längeren Zeitraum zur Schätzung eines positiven Trends führt. Die Unterschiede machen deutlich, dass eine bloße Extrapolation beobachteter Trends zur Einschätzung zukünftiger Abflussentwicklungen nicht empfehlenswert ist, da Länge des Beobachtungszeitraumes und natürliche periodische Schwankungen das Treffen eindeutiger Aussagen erschweren.

Die räumliche Verteilung der Trends ist in Abbildung 5-4 exemplarisch für den NM7Q dargestellt und lässt sich im Wesentlichen auf die räumlichen Muster auf Dmax und Vmax - in umgekehrter Trendrichtung - übertragen. Im Sommer NM7Q wird ersichtlich, dass die stärksten signifikant negativen Trends vornehmlich im Aller-Leine-Gebiet im Südosten Niedersachsens auftreten, während die am nordwestlichsten gelegenen Stationen stark positive Trends aufweisen. Der Rest des Untersuchungsgebietes zeigt schwache Abnahmen. Im Winter finden sich die stärksten Zunahmen wiederum im Nordwesten, während nicht signifikante, schwache Abnahmen im Aller-Leine-Gebiet festgestellt werden können. Generell scheint es hier eine Trennung zwischen Zunahmen im Westen und Abnahmen im Osten Niedersachsens zu geben.

Tabelle 5-2: Absolute und prozentuale Änderung der Niedrigwasserindizes für beide Untersuchungszeiträume, nach Theil-Sen

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Jahr
1951 - 2005					
NM7q [l/(s*km <sup>2</sup> )]	-0,02 (-0,3%)	+0,6 (+10%)	-0,7 (-14%)	-1,3 (-24%)	+0,2 (+6%)
Dmax [d]	-0,7 (-9%)	-1,7 (-14%)	+2,0 (+22%)	+1,6 (+22%)	+1,2 (+3%)
Vmax [Mio l/km <sup>2</sup> ]	-0,2 (-18%)	-0,3 (-21%)	-0,1 (-18%)	+0,3 (-65%)	-0,4 (-10%)
q10 [l/(s*km <sup>2</sup> )]	+2,2 (+34%)	+0,1 (+0,7%)	-1,6 (-28%)	-0,6 (-6%)	+0,6 (+5%)
BFI [-]	+0,01 (+0,4%)	+0,05 (+7%)	+0,1 (-18%)	-0,01 (-1%)	+0,02 (+3%)
1966 - 2010					
NM7q [l/(s*km <sup>2</sup> )]	-6,0 (-7,0%)	-25,5 (-24%)	-14,9 (-23%)	-14,2 (-20%)	-10,1 (-17%)
Dmax [d]	-1,4 (-12%)	+3,2 (+32%)	+9,4 (+174%)	+2,5 (+30%)	+21,1 (+71%)
Vmax [Mio l/km <sup>2</sup> ]	-0,5 (-3%)	+4,3 (+56%)	+6,1 (+531%)	+1,3 (+125%)	+49,3 (+624%)
q10 [l/(s*km <sup>2</sup> )]	+6,7 (+7%)	-8,7 (-8%)	-21,8 (-36%)	-13,0 (-19%)	-9,7 (-11%)
BFI [-]	-0,01 (-3%)	-0,01 (-1%)	+0,06 (+7%)	-0,01 (-6%)	-0,003 (-2%)

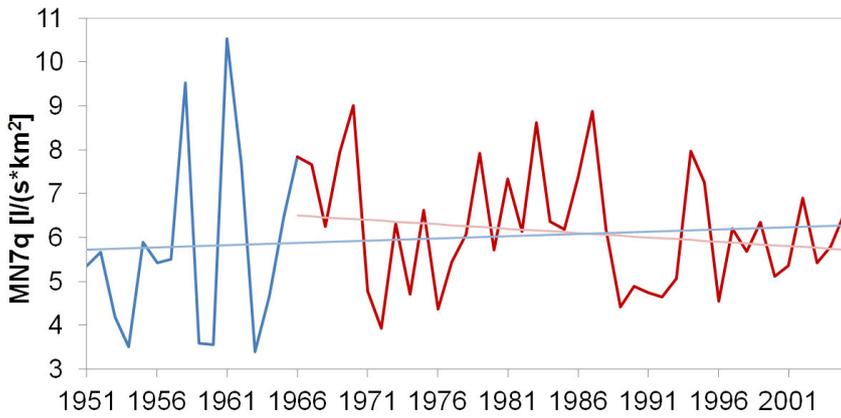


Abbildung 5-3: Angepasste Trendgeraden für die Untersuchungszeiträume 1951-2005 (blau) und 1966-2010 (rot)

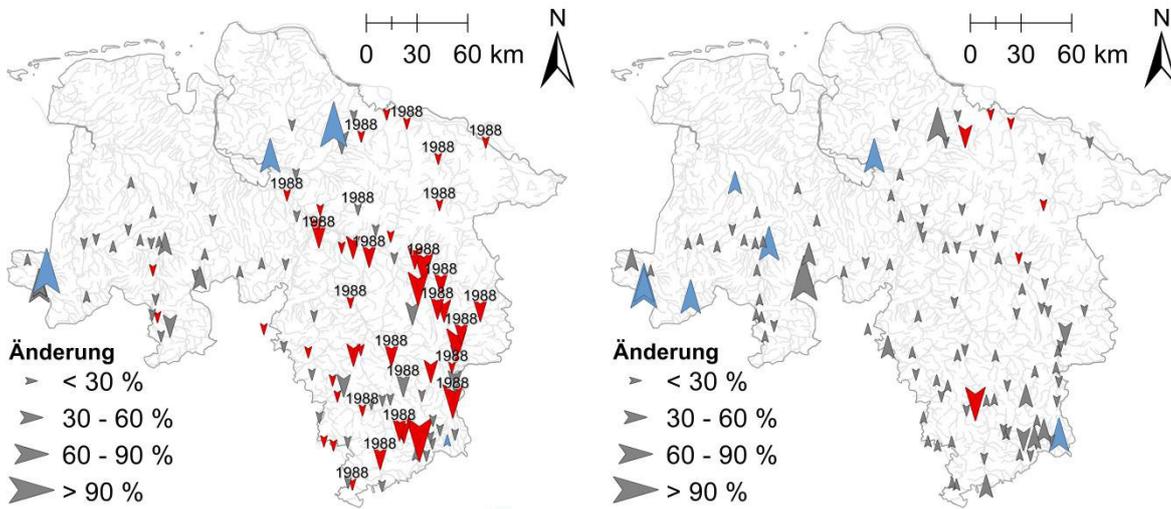


Abbildung 5-4: Räumliche Verteilung der nach Theil-Sen geschätzten Trends für den NM7Q im Sommer (links) und Winter (rechts) im Zeitraum 1966-2010. Signifikant negative Trends sind rot, signifikant positive Trends blau markiert. Jahreszahlen geben signifikante Bruchpunkte an

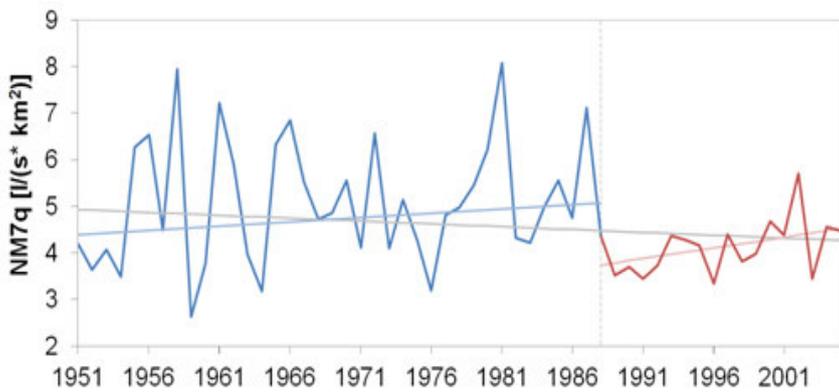


Abbildung 5-5: Zeitreihe des spezifischen Sommer NM7Q, gemittelt über alle Pegel, mit dem nach Pettitt geschätzten Bruchpunkt und individuell angepassten Trendgeraden vor und nach 1988

Die Bruchpunktanalyse nach Pettitt ergab eine auffällig hohe Anzahl an signifikanten Bruchpunkten um das Jahr 1988. Abbildung 5-5 zeigt am Beispiel des spezifischen Sommer NM7Q einen erkennbaren Sprung auf ein niedrigeres Niveau. Passt man Trendgeraden individuell für die Zeiträume vor und nach dem Bruchpunkt an, so erhält man zwei positive Trendgeraden, statt eines durchgehend negativen Trends. Dieses Ergebnis muss bei der Interpretation der Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests berücksichtigt werden, insbesondere bei der Abschätzung zukünftiger Entwicklungen.

Die räumliche Verteilung der Bruchpunkte zeigt, dass die Sprünge im Jahr 1988 hauptsächlich im östlichen Teil Niedersachsens auftreten (vgl. Abbildung 5-4). Als Ursache kommen möglicherweise meteorologische Faktoren in Frage, da auch die Zeitreihen der Trockenwetterindizes nach 1988 mehrjährige Abnahmen des Niederschlags und starke Anstiege der Temperatur aufweisen. Belegt werden kann dieser Zusammenhang jedoch nicht. Anthropogene Ursachen scheiden wahrscheinlich aufgrund des flächendeckenden Auftretens der Bruchpunkte aus. Eine abschließende Klärung dieser Frage war im Zuge von KliBiW 3 nicht möglich.

#### 5.1.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Ergebnisse der Trendanalysen für Niedrigwasserindizes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die stärksten Trends konnten im Sommer ermittelt werden. Die Trendrichtungen deuten auf eine signifikante Abnahme des Niedrigwasserabflusses hin.
- Räumlich kann im Sommerniedrigwasser zwischen starken Abnahmen im Südosten und vereinzelt starken Zunahmen im Nordwesten Niedersachsens unterschieden werden.
- Die festgestellten winterlichen Zunahmen des Niedrigwasserabflusses weisen keinerlei Feldsignifikanz auf.
- Im Sommer wurde eine Vielzahl von Bruchpunkten im Jahr 1988 festgestellt, die hauptsächlich im östlichen Teil Niedersachsens auftreten.
- Die Länge des Beobachtungszeitraumes spielt eine wichtige Rolle für eine korrekte Trenderken-

nung, wie vor allem in den Trends im Frühling anhand von unterschiedlichen Trendrichtungen zwischen den zwei Beobachtungszeiträumen ersichtlich wird.

#### 5.1.2 Simulationen mit Klimamodelldaten im ALO-Gebiet (20C)

Die Auswertungen der Wasserhaushaltsmodellierung für die Gegenwart bzw. den Zeitraum 20C werden im Kapitel 5.2.2 zusammen mit den Zukunftsszenarien dargestellt.

#### 5.1.3 Detailanalyse heutiger lokaler Niedrigwasserverhältnisse im Westharz

Im Rahmen der Phase 3 des Forschungsvorhabens KliBiW wurden durch die Harzwasserwerke GmbH die Niedrigwasserabflüsse in zwölf Einzugsgebieten des Westharzes analysiert.

Darüber hinaus wurden an fünf Pegeln, die schon mindestens 50 Jahre beobachtet werden und die weitestgehend natürliche Abflussverhältnisse repräsentieren, langjährige Trendanalysen durchgeführt.

Die Ergebnisse hierzu sind in einem Bericht der Harzwasserwerke GmbH (2013) ausführlich dokumentiert und können wie folgt bewertet werden:

Die Analyse der Niedrigwasserindizes NQ und NM7Q zeigt im Westharz ein zweigeteiltes Bild. Die im südlichen bzw. südwestlichen Harz gelegenen Flussgebiete von Oder, Sieber und Söse weisen einen ansteigenden Jahres-Trend auf. Dagegen ist der Jahresniedrigwasserabfluss im Nordharz bei Oker und Radau rückläufig.

Die beobachteten Winterniedrigwasserabflüsse sind mit Ausnahme der Radau signifikant ansteigend. Dagegen sind die Niedrigwasserabflussmengen im Sommerhalbjahr in fast allen Flussgebieten leicht rückläufig oder unverändert.

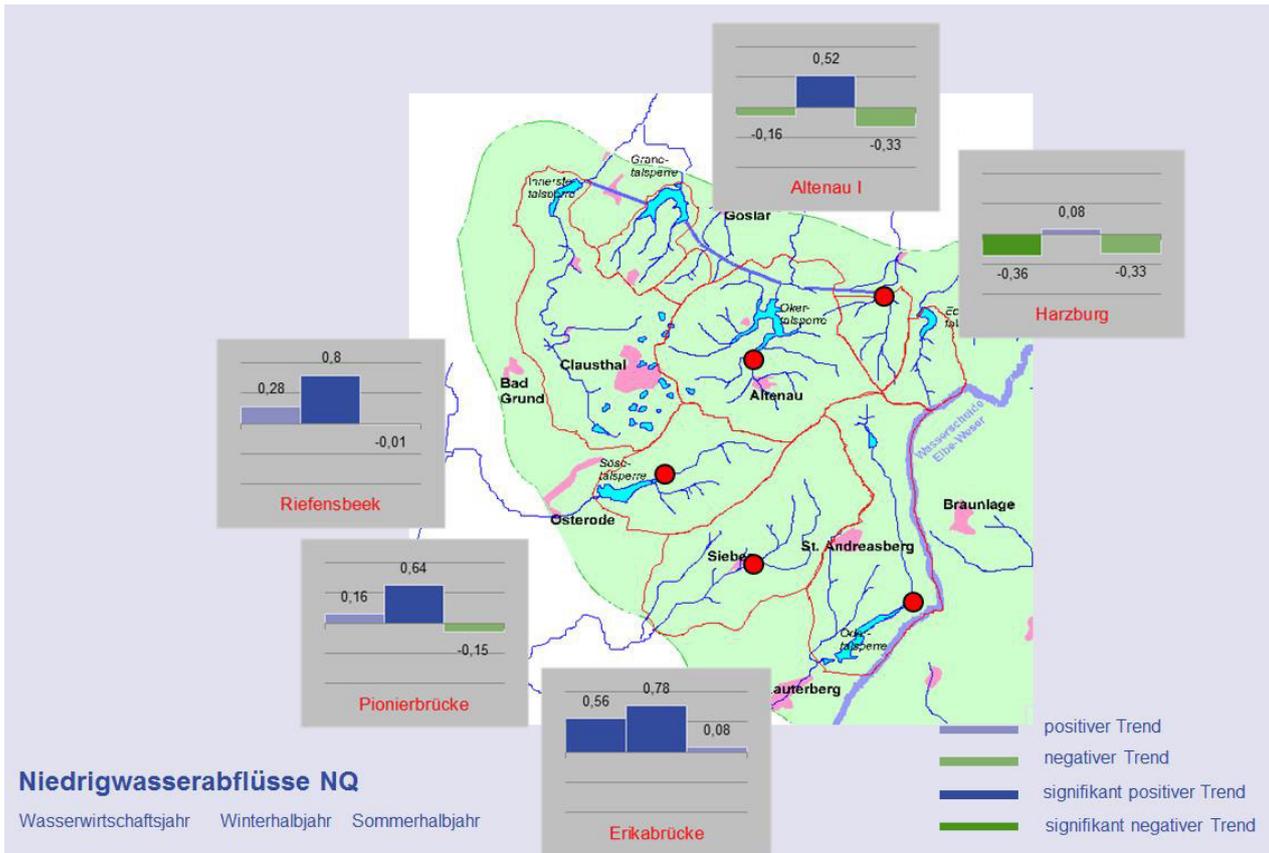


Abbildung 5-6: Beobachtete Trends der Niedrigwasserabflüsse NQ im Westharz in [%/Jahr] für den Zeitraum 1941 – 2011

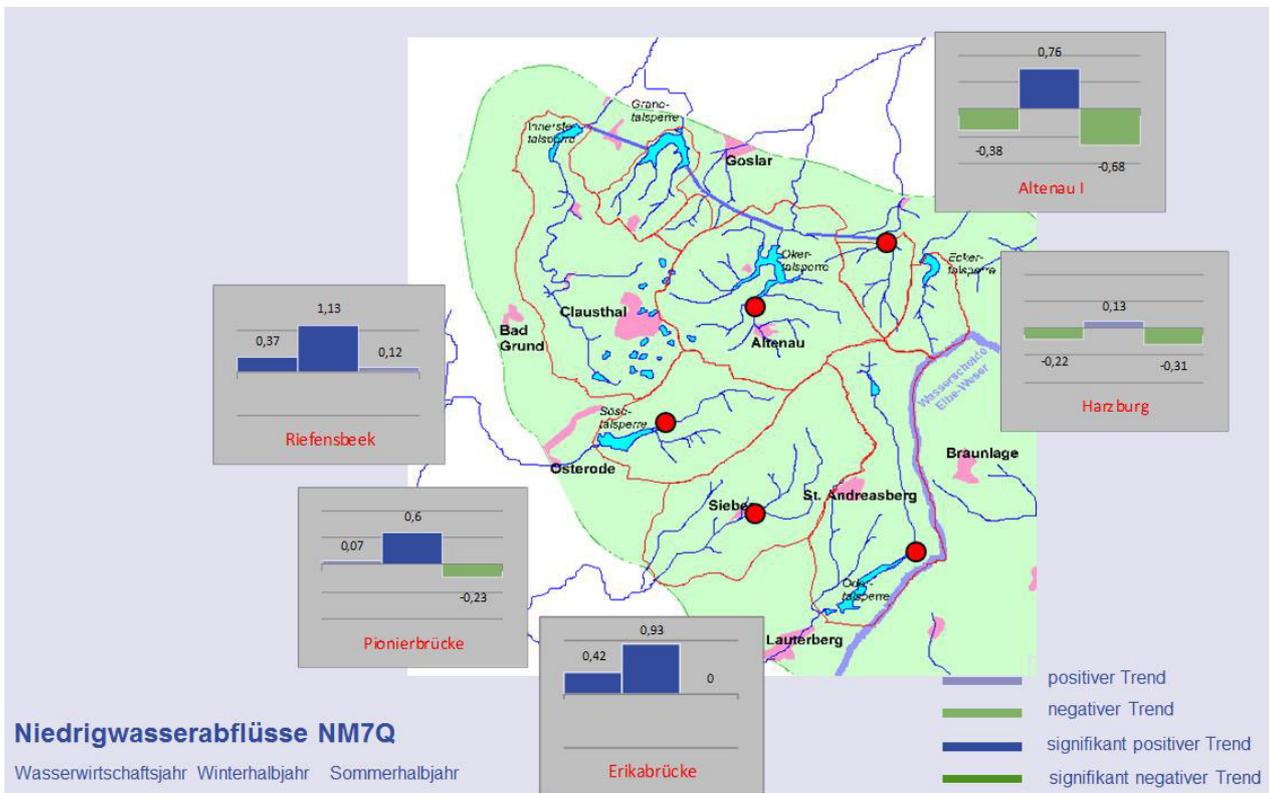


Abbildung 5-7: Beobachtete Trends der Niedrigwasserabflüsse NM7Q im Westharz in [%/Jahr] für den Zeitraum 1941 – 2011

## 5.2 Betrachtung zukünftiger Verhältnisse

### 5.2.1 Statistische Prognose von Niedrigwasserindizes

Bei der Einschätzung zukünftiger Niedrigwasserverhältnisse auf Basis prognostizierter 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 Ereignisse abbilden lassen. Die Verwendung von Kombinationen unterschiedlicher Charakteristika verschiedener klimatischer Größen kann dabei unter Umständen zu annehmbaren Schätzungen eines hydrologischen Indexes führen.

#### 5.2.1.1 Datenbasis

Insgesamt standen für das Gebiet Niedersachsen 268 Abflussstationen mit unterschiedlicher Reihenzahl zur Verfügung (vgl. Abbildung 5-8). Zur Kalibrierung und Validierung der Regressionsmodelle wurden die interpolierten beobachteten Klimagrößen für den Zeitraum 1951-2011 genutzt. 96 Pegel wiesen dabei eine mindestens 30-jährige Überschneidung mit diesem Zeitraum auf (vgl. Abbildung 5-8 blaue Markierungen). Zur Schätzung der zukünftigen Verhältnisse wurden die interpolierten REMO- und WETTREG-Läufe (s. Kapitel 3.1) für die Zeiträume 1961-2000 (20C), 2021-2050 (Z2), und 2071-2100 (Z3) herangezogen. Die Mittelung der Schätzungen der Modellläufe erfolgte mit einer Gewichtung von 40% für die beiden REMO-Läufe und 60% für die 3 ausgewählten WETTREG-Realisationen (s. Kapitel 3.1.3).

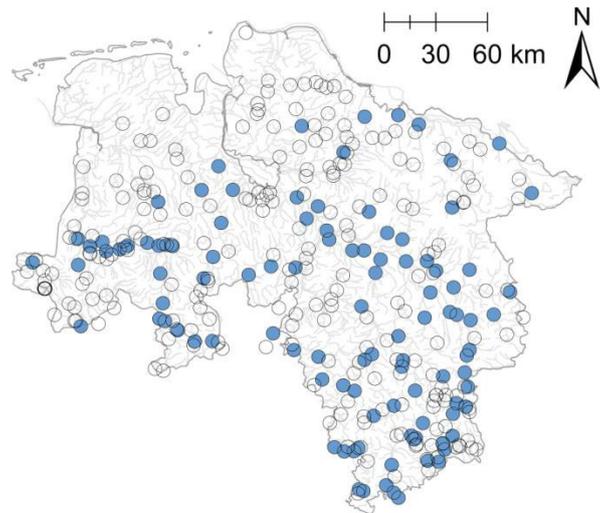


Abbildung 5-8: Lage der 268 untersuchten Abflusspegel. Blaue Markierungen kennzeichnen Stationen mit mindestens 30 Jahren Aufzeichnungslänge zwischen 1951 und 2011

Tabelle 5-3: Liste der verwendeten Niedrigwasserindizes

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
NM7Q	m <sup>3</sup> /s	Niedrigstes 7-tägiges Mittel des Abflusses
D15	d	Maximale Unterschreitungsdauer des Abflusses unter dem Langzeit-15%-Quantil
D15sum	d	Gesamte Unterschreitungsdauer des Abflusses unter dem Langzeit-15%-Quantil
V15	m <sup>3</sup>	Maximales Defizitvolumen zwischen beobachtetem Abfluss und dem Langzeit-15%-Quantil
V15sum	m <sup>3</sup>	Gesamtes Defizitvolumen zwischen beobachtetem Abfluss und dem Langzeit-15%-Quantil

#### 5.2.1.2 Methodik

Aus den Zeitreihen des täglichen mittleren Abflusses wurden unterschiedliche Niedrigwasserindizes extrahiert (s. Tabelle 5-3). Dabei wurde pro Jahr ein Wert berechnet. Aus den Tageszeitreihen des Niederschlags, der mittleren, minimalen und maximalen Lufttemperatur sowie der Globalstrahlung (Beobachtungs- und Modelldaten) wurde eine Vielzahl an klimatischen Indizes berechnet, die sowohl trockene, als auch nasse Verhältnisse charakterisieren. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 5-4. Vor Extraktion der Indizes wurden die Klimagrößen über das gesamte, dem jeweiligen Abflusspegel zugehörige Einzugsgebiet gemittelt. Die Berechnung der Indizes

erfolgte dann, im Gegensatz zu den Niedrigwasserindizes, für unterschiedliche Zeiträume, d.h. jeder Index wurde jeweils für 1, 3, 6 und 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, sodass jeder Monat im Jahr jeweils den Endmonat des vorhergegangenen Zeitraumes zur Indexberechnung darstellt.

Tabelle 5-4: Liste der verwendeten meteorologischen Indizes

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
Pquant	mm/d	Quantile des Tagesniederschlags
SPI	-	Abweichung der Niederschlagssumme vom Normalwert
DSDmax, DSDmean	d	Maximale/mittlere Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit $N < 1$ mm/d
WSDmax, WSDmean	d	Maximale/mittlere Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit $N > 1$ mm/d
Tav, Tmax, Tmin	°C	Mittlere, maximale und minimale Lufttemperatur
HWDmax, HWDmean	d	Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit $T_{max} >$ dem tagesspezifischen 90%-Quantil
ETP	mm	Mittlere potentielle Evapotranspiration, berechnet nach Turc-Wendling (DVWK, 1996)
ETP/P	-	Trockenheitsindex: Verhältnis der mittleren potentiellen Evapotranspiration zum mittleren Niederschlag

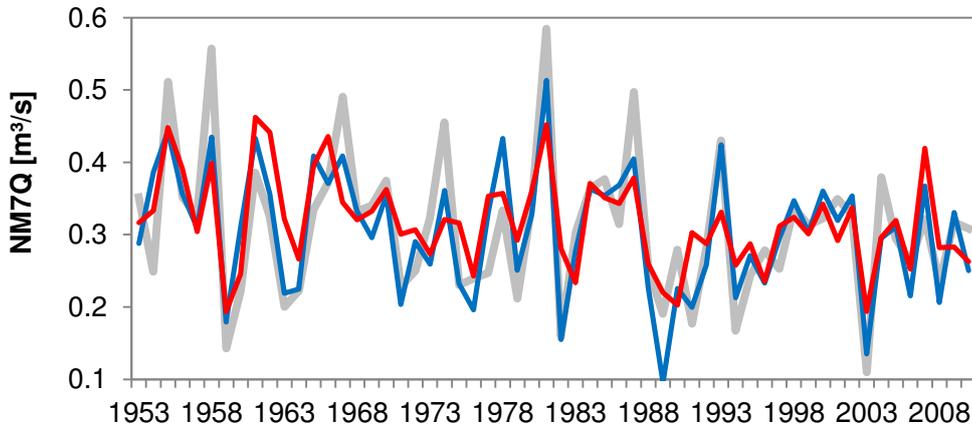
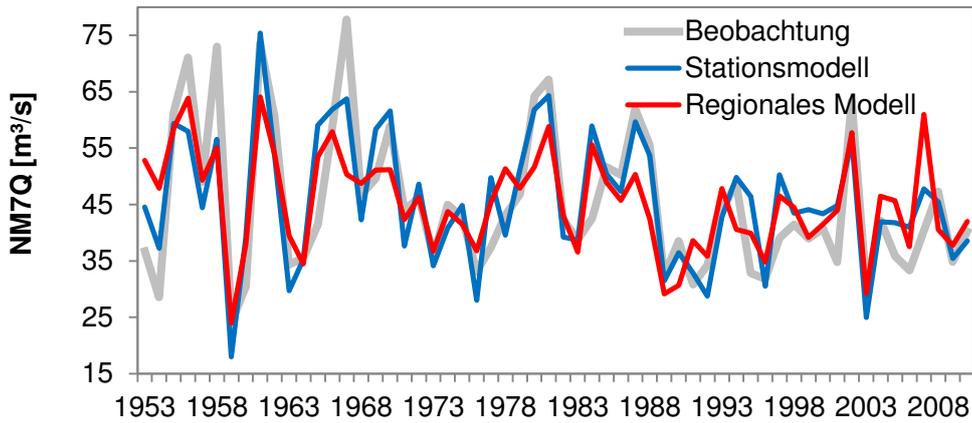


Abbildung 5-9: Modellgüte des individuell angepassten Stationsmodells (blau) und des regionalen Modells (rot) für den NM7Q an den Pegeln Rethem (oben) und Pionierbrücke (unten)

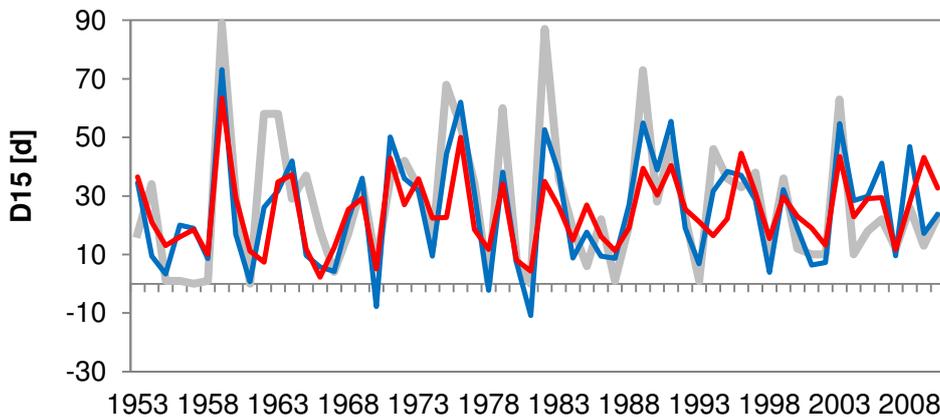
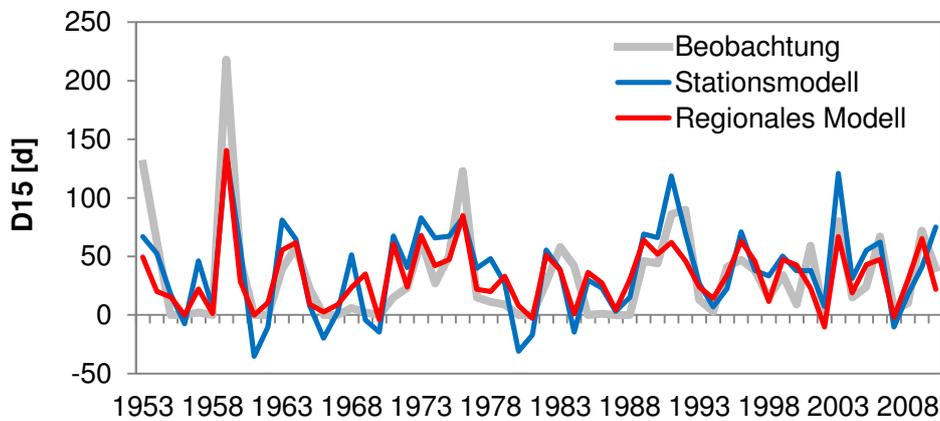


Abbildung 5-10: Modellgüte des individuell angepassten Stationsmodells (blau) und des regionalen Modells (rot) für D15 an den Pegeln Rethem (oben) und Pionierbrücke (unten)

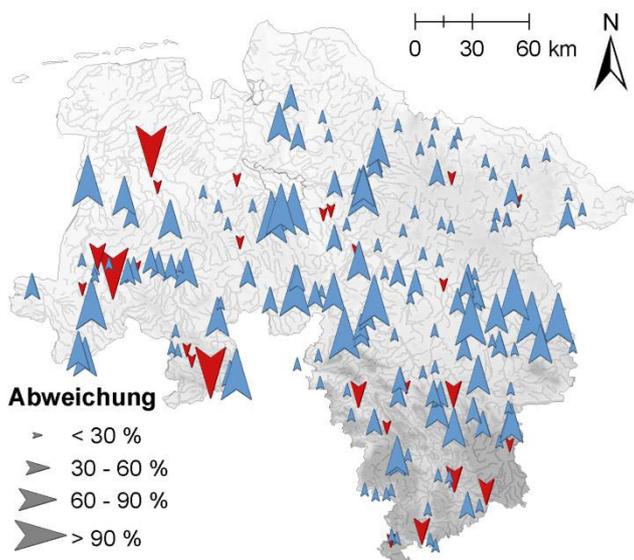


Abbildung 5-11: Abweichung des mit Hilfe der Klimamodell-daten geschätzten  $NM7Q_{10}$  von der Beobachtung für den Zeitraum 1961-2000

Die Modellanpassung erfolgte zunächst stationsweise. Dazu wurde der Beobachtungszeitraum des jeweiligen Pegels in Kalibrierungs- und Validierungszeitraum unterteilt. Das Aufstellen der multiplen linearen Regressionsmodelle erfolgte anhand des Kalibrierungszeitraumes nach dem Einschussverfahren. Dementsprechend wurden Regressoren in das Modell aufgenommen, wenn sie zu einem Gewinn an Information beitragen. Dieser ist abhängig von Korrelation der Variablen mit der Zielgröße sowie der Korrelation mit anderen Regressoren im Modell. Ersterer sollte dabei so hoch, zweiter so gering wie möglich sein. Kriterium waren das Bestimmtheitsmaß und das korrigierte Be-

stimmtheitsmaß. Die Modellgüte wurde zusätzlich anhand des Validierungszeitraumes evaluiert. Die Erfüllung der Modellprämissen (Homoskedastizität, Normalverteilung) wurde im Nachhinein mit Hilfe der Residuen getestet und konnte für den Großteil der aufgestellten Modelle akzeptiert werden.

Um auch für Pegel mit kurzen Aufzeichnungszeiträumen, an denen keine individuelle Modellanpassung erfolgen konnte, Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Niedrigwasserindizes treffen zu können, wurde für jeden Index ein Modell für das gesamte Untersuchungsgebiet erstellt. Um die Variabilität der Indizes zwischen den Einzugsgebieten erfassen zu können, wurden zusätzlich zu den oben genannten Klimaindizes unterschiedliche Gebietseigenschaften, wie Fläche, mittlere Steigung oder mittlerer Niederschlag, als mögliche Regressoren mit einbezogen.

Das Potenzial der Modelle zur Schätzung der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse aus den Klimamodell-daten wurde anhand des 20C-Zeitraumes der Klimamodelle validiert. Im letzten Schritt wurden die Änderungen der Niedrigwasserindizes für die Zeiträume Z2 und Z3 prognostiziert. Anstelle einer Gegenüberstellung jährlicher beobachteter und simulierter Abflusszeitreihen fand ein Vergleich von Indexwerten mit unterschiedlichen Wiederkehrperioden (2, 5, 10, 20, 50 und 100 Jahre) statt. Diese Werte wurden durch Anpassung parametrischer Verteilungen an die beobachteten und simulierten Indexzeitreihen bestimmt.

Tabelle 5-5: Abweichung der mittleren Schätzungen der Klimamodelle von der Beobachtung im Kontrollzeitraum (20C) und mittlere Änderungen gegenüber dem Kontrollzeitraum für die nahe Zukunft (Z2) und die ferne Zukunft (Z3) für die betrachteten Indizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall

	$NM7Q_{10}$	$D15_{10}$	$D15sum_{10}$	$V15_{10}$	$V15sum_{10}$
20C	+ 30,8 %	+ 9,4 %	- 6,8 %	+ 16,2 %	+ 20,3 %
Z2	- 8,1 %	+ 7,1 %	+ 5,7 %	+ 14,7 %	+ 5,9 %
Z3	-33,9%	+ 40,8 %	+ 36,8 %	+ 70,14 %	+ 40,3 %

### 5.2.1.3 Ergebnisse

Die für die einzelnen Stationen angepassten Modelle zeigen insgesamt eine hohe Simulationsgüte, wenn anhand der Beobachtungsdaten validiert. Abbildung 5-9 zeigt die Reihen des jährlichen NM7Q für die Pegel Rethem (ca. 14.700 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsgröße) und Pionierbrücke (ca. 45 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsgröße). Für beide Pegel wird der generelle Verlauf des Indexes gut nachgebildet, allerdings werden Extremwerte in beiden Fällen über- bzw. unterschätzt. Dieser Effekt verstärkt sich bei Anwendung des regionalen Modells, hier als rote Ganglinie dargestellt. Die Anpassungsgüte bei den Schwellenwert-basierten Indizes ist aufgrund der unteren Begrenzung der Werte geringer als beim NM7Q. Abbildung 5-10 zeigt, dass vor allem die großen Extreme sowohl durch das regionale Modell, als auch durch die Stationsmodelle stark unterschätzt werden. Die unrealistischen negativen Werte, die teilweise durch das Modell geschätzt werden, wurden als nicht problematisch eingestuft, da der Fokus bei den Schwellenwert-basierten Indizes auf den Maxima liegt.

Bei der Validierung der Modelle mit den 20C-Zeiträumen der Klimamodelldaten konnte für den NM7Q eine starke Überschätzung an einem Großteil der Stationen festgestellt werden, wie am Beispiel des NM7Q<sub>10</sub> in Abbildung 5-11 zu sehen ist. Bei Betrachtung der einzelnen Klimamodellläufe (vgl. Abbildung 5-12 oben) wird deutlich, dass WETTREG die Kennwerte im Mittel am stärksten und REMO-UBA am geringsten überschätzt. In Tabelle 5-5 finden sich die mittleren Abweichungen von der Beobachtung für die einzelnen Indizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall.

Die Prognose für die nahe Zukunft (2021 – 2050) zeigt lediglich schwache Abnahmen gegenüber dem Kontrollzeitraum. Exemplarisch ist die räumliche Verteilung in Abbildung 5-13 für den NM7Q<sub>10</sub> dargestellt, verhält sich aber auch für die anderen betrachteten Indizes ähnlich (s. Anhang 1). Die mittlere Änderung über alle Modellläufe und alle betrachteten Stationen (s. Tabelle 5-5) ist für die unterschiedlichen Indizes folglich gering. Bei Betrachtung der einzelnen Modellläufe ist zu erkennen, dass REMO-UBA und WETTREG vornehmlich Abnahmen des NM7Q prognostizieren (vgl. Abbildung 5-12 Mitte). Für REMO-BfG hingegen ist keine

eindeutige Richtung der Änderungen erkennbar. Die Signale der anderen betrachteten Indizes für die nahe Zukunft sind in Anhang 2 zu finden

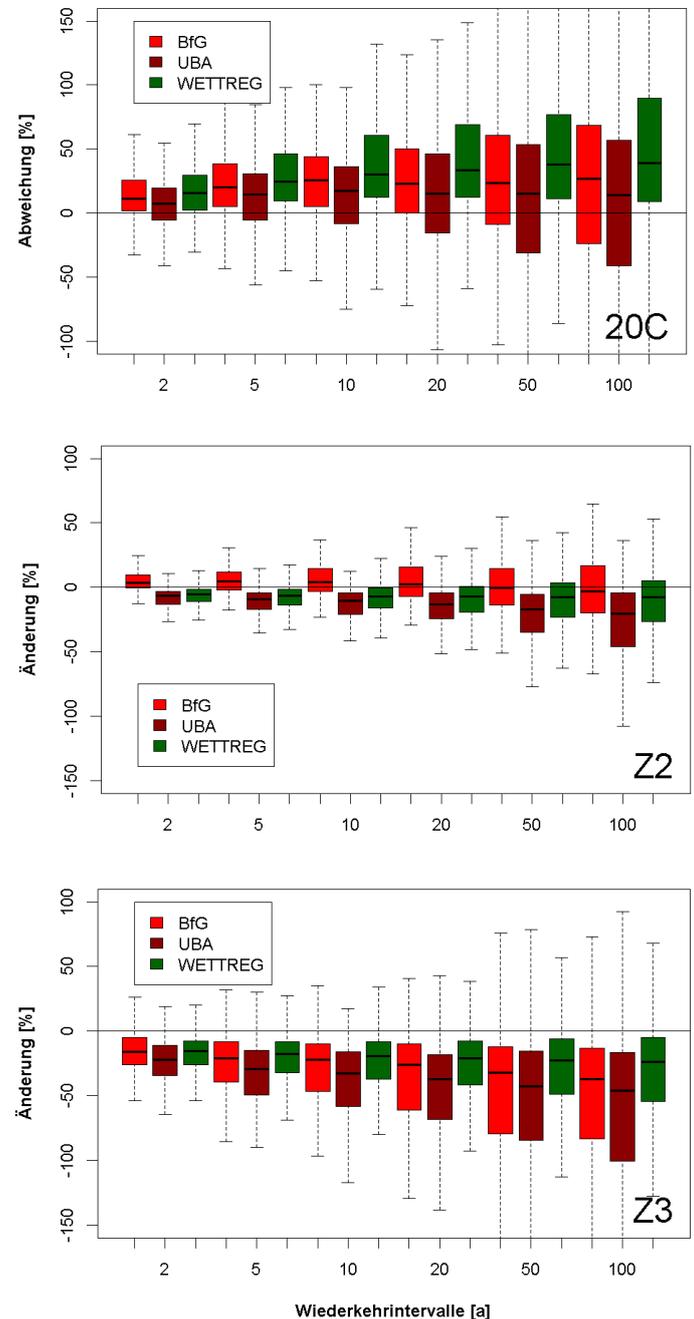


Abbildung 5-12: Abweichung der Modellläufe im Kontrollzeitraum 20C gegenüber der Beobachtung (oben), und prognostizierte Änderungen gegenüber dem Kontrollzeitraum für die nahe Zukunft (Mitte) und die ferne Zukunft (unten) für verschiedene Wiederkehrintervalle des NM7Q über alle Stationen. REMO-BfG ist in hellrot, REMO-UBA in dunkelrot und WETTREG in grün dargestellt

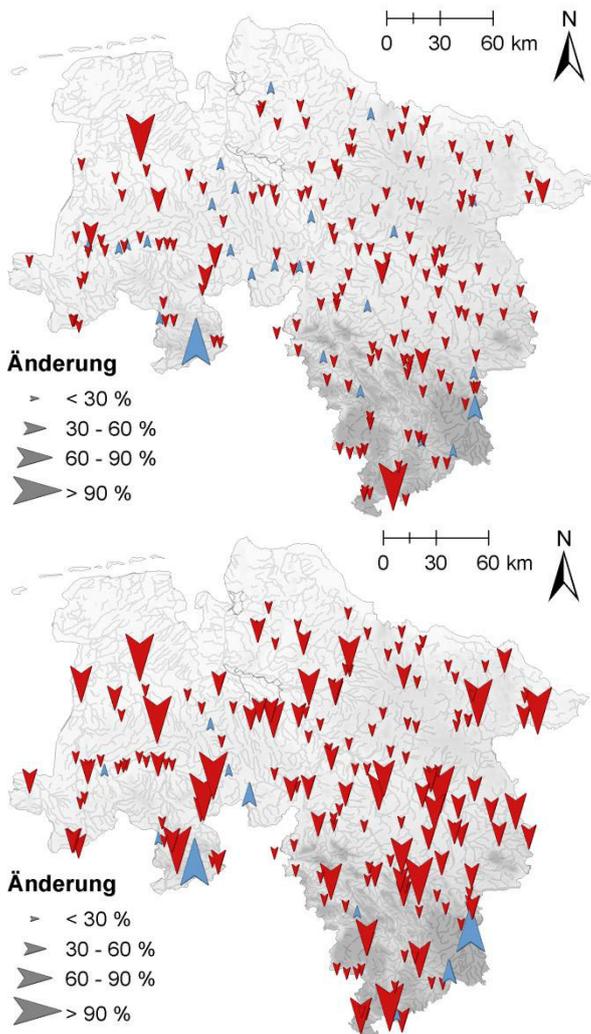


Abbildung 5-13: Räumliche Verteilung der prognostizierten Änderungen im NM7Q<sub>10</sub> gegenüber dem Kontrollzeitraum für die nahe Zukunft (oben) und die ferne Zukunft (unten)

Für die ferne Zukunft (2071-2100) zeigen die Prognosen eindeutig in Richtung einer Abnahme des NM7Q sowie einer Zunahme der Schwellenwert-basierten Indizes. Abbildung 5-13 zeigt, dass lediglich an vereinzelten Stationen Zunahmen des NM7Q<sub>10</sub> prognostiziert werden. Wie in Abbildung 5-12 unten zu erkennen ist, prognostiziert REMO-UBA wiederum die stärksten Abnahmen. Zudem fällt auf, dass die Signale für die größeren Wiederkehrintervalle stärker ausfallen als für die kleinen. Anhang 3 und Anhang 4 zeigen die Prognosen für die Schwellenwert-basierten Indizes. Der direkte Vergleich der Signale für die nahe und ferne Zukunft mit der Validierung zeigt, dass bei den meisten Indizes der Fehler in der Validierung der 20C-Zeiträume die Signale übersteigt, sowohl für die nahe als auch die ferne Zukunft (s. Tabelle 5-5). Die prognostizierten Abnahmen des NM7Q müssen unter Be-

rücksichtigung der starken Überschätzung des beobachteten Niedrigwasserabflusses interpretiert werden. Gleiches gilt für Zunahmen der Unterschreitungsdauer und des Defizitvolumens, die im 20C-Zeitraum größtenteils unterschätzt werden.

Um die statistischen Prognosen mit den Ergebnissen der hydrologischen Modellierung (s. Kapitel 5.2.2) vergleichen zu können, werden in Abbildung 5-15 die 17 Referenzpegel im Aller-Leine-Gebiet gesondert betrachtet und den Signalen für gesamt Niedersachsen gegenübergestellt. Richtung und Stärke der Prognosen für das Aller-Leine-Gebiet stimmen dabei mit den Modellergebnissen für ganz Niedersachsen überein.

Im Vergleich mit den Trendanalysen aus Kapitel 5.1.1 können Konsistenzen in Trendrichtung und -stärke vor allem im Aller-Leine Einzugsgebiet im Südosten Niedersachsens verzeichnet werden. Abbildung 5-14 zeigt die Änderungen des jährlichen NM7Q zwischen 1966 und 2010, wie sie mit Hilfe der Anpassung von Trendgeraden geschätzt wurden. Die Übereinstimmung in Richtung und Stärke der Änderungen ist vor allem für die ferne Zukunft bei der Prognose des NM7Q<sub>10</sub> ersichtlich. Die Zunahmen, wie sie für den NM7Q in der Vergangenheit vor allem im Norden und Nordwesten beobachtet werden konnten, stimmen jedoch nur teilweise mit der Prognose für die nahe Zukunft überein.

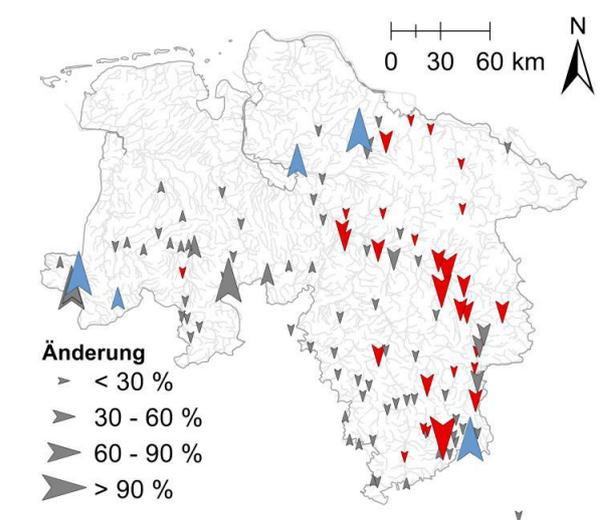


Abbildung 5-14: Räumliche Verteilung der Trendstärke nach Theil-Sen für den jährlichen NM7Q im Zeitraum 1966-2010. Signifikant negative Trends sind rot, signifikant positive Trends blau markiert

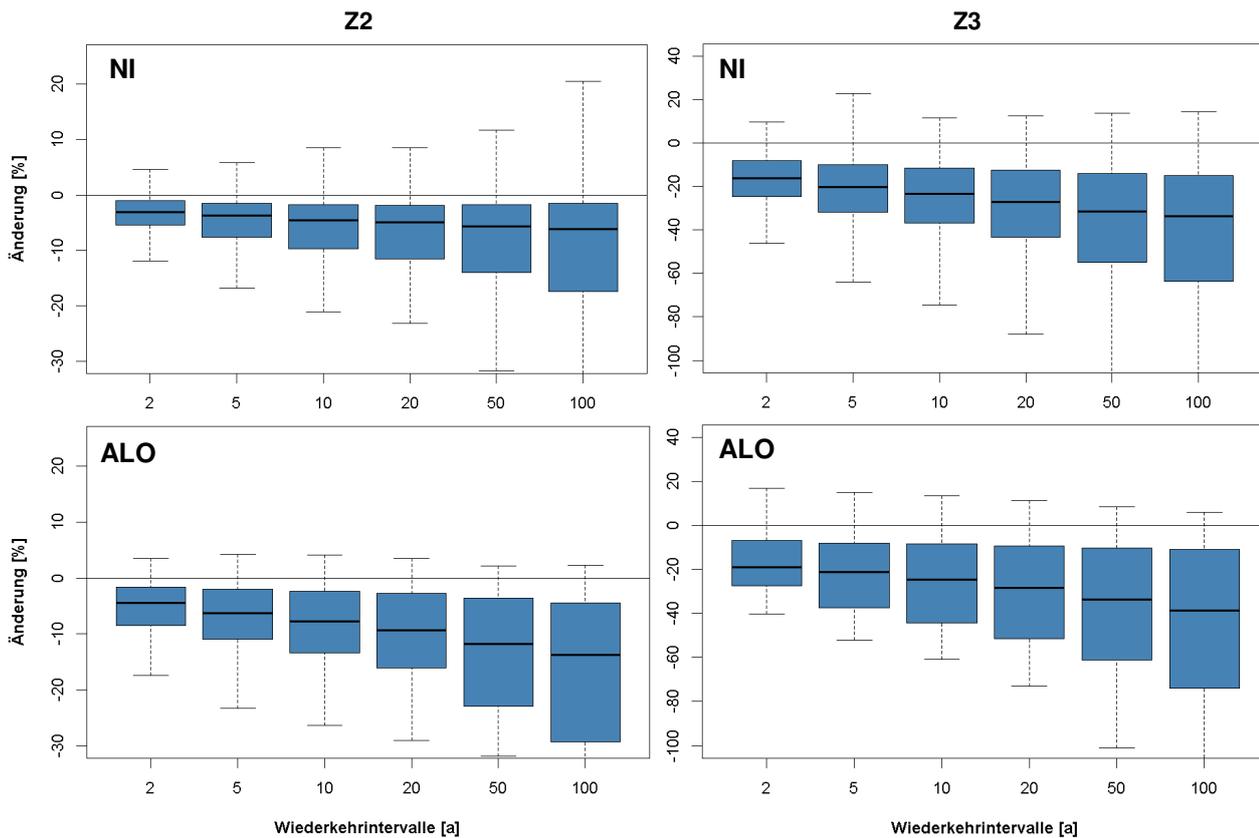


Abbildung 5-15: Prognostizierte Änderungen gegenüber dem Kontrollzeitraum für die nahe Zukunft (links) und die ferne Zukunft (rechts) für das NM7Q über ganz Niedersachsen (oben) und die 17 Referenzpegel (unten)

#### 5.2.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Ergebnisse der Prognose der Niedrigwasserindizes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Verschiedene Indizes lassen sich mit annehmbarer Präzision als lineare Funktion unterschiedlicher beobachteter meteorologischer Indizes abbilden. Die Verwendung von Klimaindizes aus Klimamodelldaten führt zu einer stärkeren Über- bzw. Unterschätzung der prognostizierten Niedrigwasserindizes im Vergleich zur Verwendung von Indizes aus Beobachtungsdaten.
- Die Prognose für die nahe Zukunft (2021-2050) zeigt für ganz Niedersachsen schwache Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse bzw. Zunahmen der Unterschreitungsdauer und Defizitvolumina.
- Für die ferne Zukunft (2071-2100) werden vornehmlich Abnahmen des NM7Q sowie Zu-

nahmen der Unterschreitungsdauer und des Defizitvolumens sowohl für ganz Niedersachsen als auch das Aller-Leine-Einzugsgebiet prognostiziert.

- Die prognostizierten Werte der Niedrigwasserindizes variieren teilweise beträchtlich zwischen den betrachteten Klimamodellen, was die Notwendigkeit der Verwendung von Modellensembles bestätigt.

Die hier genannten Ergebnisse stützen die mit Hilfe des hydrologischen Modells (s. Kapitel 5.2.2) geschätzten Entwicklungen der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse. Bei der Interpretation müssen jedoch die Abweichungen der geschätzten NWI von der Beobachtung bei Verwendung der Klimamodelldaten als Input sowie die Schwierigkeiten der Prognose der Trockenwetterindizes berücksichtigt werden (s. Kapitel 3.5).

## 5.2.2 Simulationen mit Klimamodelldaten im ALO-Gebiet (20C, A1B)

### 5.2.2.1 Analyisierte Größen und Indizes

Für die Auswertung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt mit Blick auf Niedrigwasserhältnisse werden verschiedene Größen und Indizes berechnet. Die folgenden Ausführungen beruhen im Wesentlichen auf Erkenntnissen aus dem DWA Seminar „Regionalisierung von Niedrigwasserabflüssen“ 2012 in Karlsruhe.

Das **NQxD** steht für den jährlichen Niedrigwasserabfluss, der sich aus dem Jahresminimum des gleitenden Mittels über  $x$  Tage auf Grundlage von Tageswerten des Gebietsabflusses ergibt. In der hydrologischen Praxis sind gleitende Mittel zwischen 7 und 14 Tagen gängig. Aus diesem Grund werden hier das **NQ7D** und das **NQ14D** betrachtet.

Die maximale Trockendauer **maxD** bezieht sich auf die Anzahl der Tage (eines Jahres), in denen ein bestimmter Abflussschwellwert  $Q_s$  unterschritten wird.  $Q_s$  ist definiert als das 15%-Quantil der Unterschreitungsdauerlinie. Trockenperioden, die maximal einen Tag lang unterbrochen sind, werden als eine einzige Trockenperiode zusammengefasst. Die Summe aller Trockenperioden **sumD** gibt die summierte Anzahl aller Tage eines Jahres an, an denen der Abflussschwellwert unterschritten wird.

Das maximale Defizitvolumen **maxV** wird für den Zeitraum der maximalen Trockenperiode (jedes Jahres) ermittelt. Es errechnet sich aus dem Abflussvolumen, welches sich für  $Q(t)=Q_s$  ergeben würde, minus dem tatsächlichen Abflussvolumen in der Trockenperiode. Die Summe aller Defizitvolumina **sumV** eines Jahres wird für die Zeiträume, die für die Berechnung von **sumD** ermittelt wurden, gebildet.

In Abbildung 5-16 sind die Niedrigwasser-Kenngrößen **maxD**, **sumD**, **maxV** und **sumV** schematisch eingetragen.

Für alle Indizes werden statistische Verteilungsfunktionen (Weibull, Gumbel) angepasst.

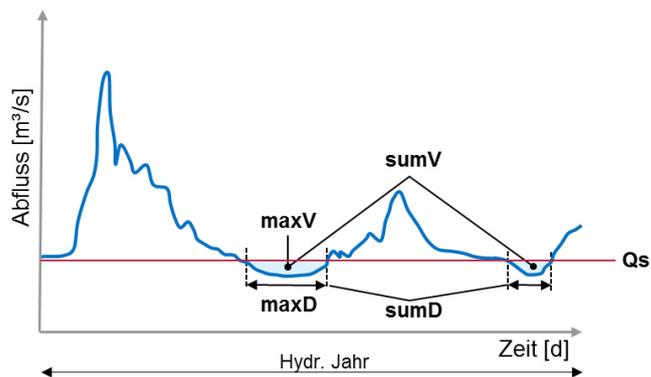


Abbildung 5-16: Schematische Darstellung der Niedrigwassererkenngrößen **maxD**, **sumD**, **maxV** und **sumV**

### 5.2.2.2 Allgemeine Vorgehensweise

Die Wasserhaushaltssimulationen mit den A1B Klimamodelldaten werden analog zu den vorangegangenen Kapiteln in zwei Abschnitte unterteilt. Abschnitt 1 wird als „nahe Zukunft“ bezeichnet und im Allgemeinen mit „Z2“ abgekürzt. Abschnitt 2 wird als „ferne Zukunft“ bezeichnet und mit „Z3“ abgekürzt. Der Zeitraum des Kontrolllaufs wird hier mit „Z1“ abgekürzt. In Tabelle 5-6 sind die zeitlichen Randbedingungen für die genannten Zeiträume aufgelistet. Die Aufteilung erfolgte analog zu der Aufteilung in KliBiW Phase 2.

Tabelle 5-6: Auswertungs-Zeiträume der Wasserhaushaltsmodellierung

Zeitraum	Von	Bis
Kontrollperiode Z1	01.11.1970	31.10.2000
Nahe Zukunft Z2	01.11.2020	31.10.2050
Ferne Zukunft Z3	01.11.2070	31.10.2100

Um die Simulationsergebnisse besser quantifizieren respektive bewerten zu können, werden die Resultate für die nahe und ferne Zukunft immer den Resultaten aus dem 20C Kontrolllauf gegenüber gestellt. Oftmals wird auch eine prozentuale Abweichung berechnet, indem die Ergebnisse für Z2 und Z3 mit denen aus Z1 normiert werden.

### 5.2.2.3 NQ7D

#### Quartalsauswertung NM7Q und MQ, Rethem

Abbildung 5-17 zeigt mittlere Quartalswerte des NM7Q und des MQ für die Kontrollperiode Z1 sowie für die nahe und ferne Zukunft (Z2 und Z3) für den (untersten) Referenzpegel Rethem. Die Beobachtung und

Simulation für die Historie sind zusätzlich eingetragen. Hier wird deutlich, dass das Wasserhaushaltsmodell sowohl die mittleren Abflüsse als auch die Niedrigwasserabflüsse sehr gut abbilden kann. Im Vergleich von Z1 zu Z2 bzw. Z3 ist, wie bereits auch in Kapitel 5.2.1 festgestellt, eine Zunahme des MQ im Winterquartal zu erwarten. Im gleichen Quartal nehmen die Niedrigwasserabflüsse leicht ab. Im Frühling zeichnet sich eine Zunahme sowohl des MQ für Z2 und eine leichte Abnahme für Z3 ab. Der NM7Q nimmt für beide Abschnitte ab. Im Sommer und Herbst ist für das MQ in der nahen Zukunft keine Änderung zu erwarten, in der fernen Zukunft wird jedoch eine deutliche Abnahme erwartet. Das NM7Q nimmt in beiden Zeitabschnitten und Quartalen ab.

Die Differenzen sind, absolut gesehen, in jedem Quartal für das MQ ausgeprägter als für das NM7Q. Der Niedrigwasserabfluss ist sehr stark vom Basisabfluss und der damit verbundenen Grundwasserneubildung beeinflusst. Es ist somit nicht verwunderlich, dass das MQ ein stärkeres, absolutes Signal zeigt als das NM7Q. Da die Winterniederschläge (und MQs) zunehmen, wirkt sich diese Zunahme auch auf einen erhöhten Basisabfluss in den Sommermonaten aus. Dagegen wirkt eine zunehmende Evapotranspiration im Sommer. Die übrigen Referenzpegel reagieren sehr ähnlich wie das Pegelgebiet Rethem. Repräsentativ für ein kleineres Einzugsgebiet ist dem Anhang 7 die NM7Q- bzw. MQ-Quartalsauswertung für den Referenzpegel Göttingen zu entnehmen.

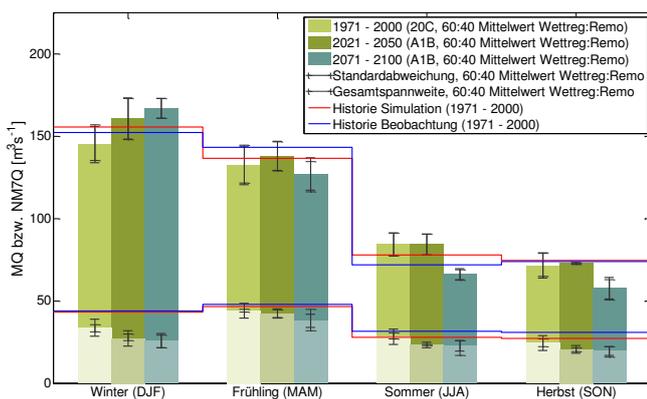


Abbildung 5-17: Quartalsbezogene mittlere NM7Q und MQ für die Zeitabschnitte Z1, Z2 und Z3 für den Referenzpegel Rethem. Zusätzlich sind die Beobachtung und die Simulation mit historischen Klimarandbedingungen eingetragen

### Quartalsauswertung NM7Q und MQ, alle Referenzpegel

Aufbauend auf Abbildung 5-17 zeigt Abbildung 5-18 das flächengemittelte Signal über alle 17 Referenzpegel. Die MQ bzw. NM7Q wurden hier jedoch zur besseren Vergleichbarkeit auf die jeweiligen Werte aus Z1 normiert. Abweichungen größer Null deuten also auf eine Zunahme des MQ bzw. NM7Q hin und Abweichungen kleiner Null entsprechend auf eine Abnahme (in Prozent). Die Tendenzen sind analog zu denen in Abbildung 5-17, jedoch unterschiedlich ausgeprägt. Relativ betrachtet, wie in Abbildung 5-18 dargestellt, sind die Änderungssignale nun beim NM7Q stärker als beim MQ. Weiterhin zeigt sich eine sehr viel größere Standardabweichung (aus den WETTREG- und REMO-Realisationen) für das NM7Q als für das MQ.

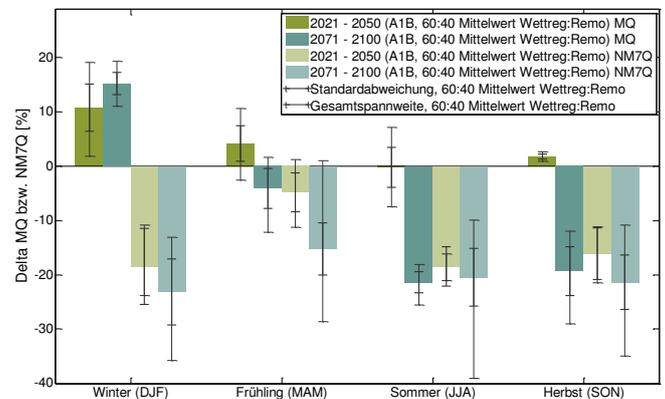


Abbildung 5-18: Quartalsbezogene auf Z1 normierte, mittlere NM7Q und MQ für die Zeitabschnitte Z2 und Z3 als Flächenmittel über alle Referenzpegel

### 5-jährliche NM7Q, alle Referenzpegel

Im Zuge der statistischen Extremwertanalyse wurden Weibull-Verteilungsfunktionen an das NM7Q für alle Referenzpegel angepasst. Für die Auswertung wurden die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 herangezogen. Da es sich um eine Minimum-Analyse handelt, sind vor allem die Jährlichkeiten 2 bis 10 interessant.

In Abbildung 5-19 bis Abbildung 5-21 sind die 5-jährlichen, auf 20C normierten NM7Q illustriert (die Darstellungen für die Jährlichkeiten 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 sind im Anhang 8 zu finden). Für die Analyse wurden WETTREG und REMO mit einem Verhältnis von 3:2 zusammengefasst. Es ergeben sich für alle Referenzpegel einheitliche Tendenzen: Nach einer leichten Abnahme des NM7Q in Z2 (gegenüber Z1) sinkt das NM7Q im Zeitraum 3 sehr deutlich unterhalb des Niveaus von Z1. Während für Z2 die Standardabweichungen die Nullachse schneiden, liegt für Z3

durchgängig ein „robustes“ Signal vor, da der Bereich der Standardabweichung bei allen Pegeln unterhalb der Nullachse liegt.

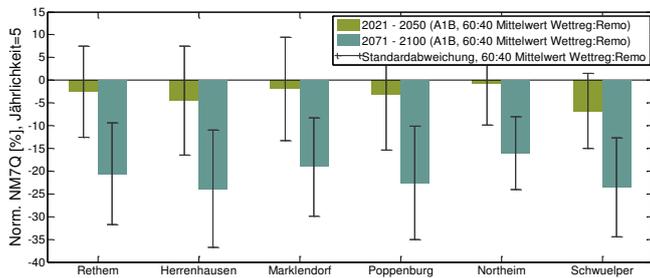


Abbildung 5-19: 5 jährliche, auf 20C normierte NM7Q für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

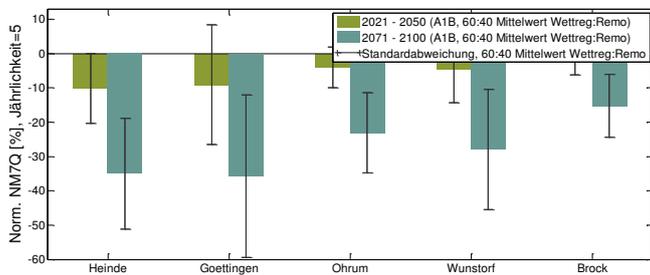


Abbildung 5-20: 5 jährliche, auf 20C normierte NM7Q für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

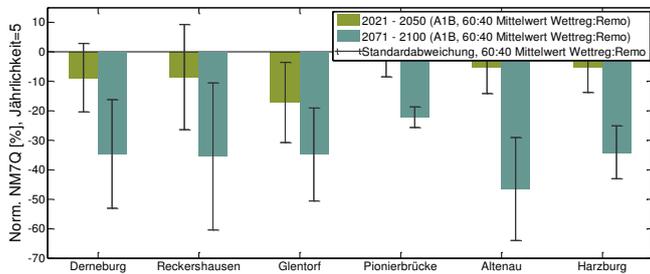


Abbildung 5-21: 5 jährliche, auf 20C normierte NM7Q für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

NM7Q, Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100, Flächenmittel über alle Pegel

Abbildung 5-22 zeigt die Abweichungen der NM7Q-Quantile 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 zum Niveau des Zeitraums 1 (20C) als Flächenmittel über alle Referenzpegel. Auch hier wurden WETTREG und REMO mit dem Verhältnis von 3:2 zusammengefasst. Es wird erneut deutlich, dass zunächst eine leichte Abnahme des NM7Q in der nahen Zukunft gefolgt von einer deutlichen Abnahme des NM7Q in der fernen Zukunft zu erwarten ist. Die Ab- bzw. Zunahmen sind prozentual gesehen für die betrachteten Jährlichkeiten in

einer ähnlichen Größenordnung. Allerdings steigt die Unsicherheit mit Zunahme der Jährlichkeit.

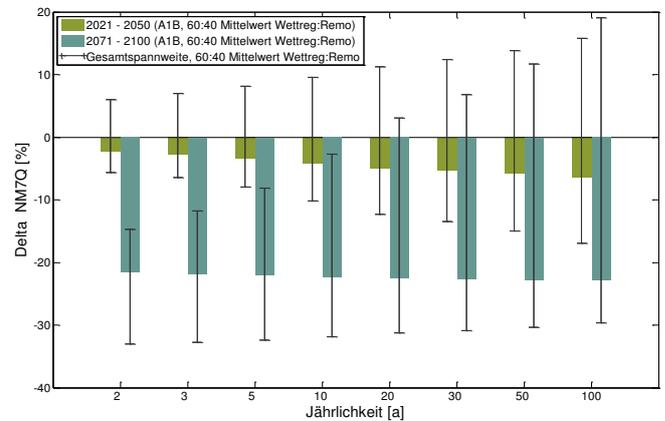


Abbildung 5-22: Flächengemittelte Abweichungen des NM7Q im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

Auftrittszeitpunkt des NM7Q

Es wurde der Auftrittszeitpunkt (als „Day of year“) des NM7Q innerhalb des hydrologischen Jahres für die Zeiträume Z1, Z2 und Z3 untersucht. Da die Signale deutlich unterschiedlich zwischen REMO und WETTREG waren, wurde hier kein Mittelwert gebildet, sondern beide Auswertungen für sich betrachtet. Die in Abbildung 5-23 visualisierte und auf WETTREG basierende Auswertung für den Referenzpegel Rethem zeigt keine Verschiebung des Auftritt-Zeitpunktes. In allen Zeitperioden liegt der Mittelwert bei Anfang August. Die auf REMO basierende Auswertung für den Referenzpegel Rethem hingegen zeigt eine deutliche Tendenz zu einem späteren Auftreten des NM7Q innerhalb des Jahres. Insgesamt verschiebt sich der Zeitpunkt um fast 2 Monate. Interessant ist auch der Vergleich zwischen REMO und WETTREG innerhalb der gleichen Zeitperioden. So sind die Auftritts-Zeitpunkte für REMO für Z1 und Z2 generell früher im Jahr als für WETTREG. Für Z3 sind die Zeitpunkte ähnlich. Für alle übrigen Pegel ergibt sich ein ähnliches Bild wie für Rethem, sowohl für WETTREG als auch für REMO.

Repräsentativ für ein kleineres Einzugsgebiet sind die Auftrittszeitpunkte für den Referenzpegel Göttingen in Anhang 9 dargestellt.

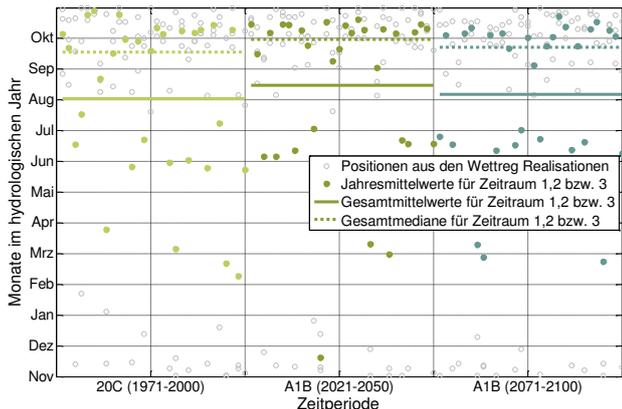


Abbildung 5-23: Auftrittszeitpunkt des NM7Q für den Referenzpegel Rethem innerhalb des hydrologischen Jahres für die Zeiträume Z1, Z2 und Z3 berechnet für die 20 WETTREG-Realisationen

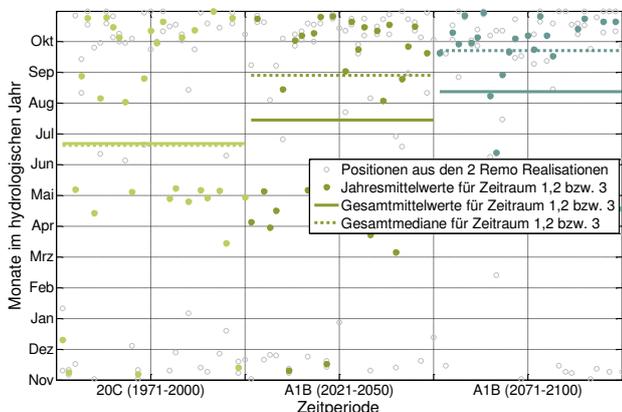


Abbildung 5-24: Auftrittszeitpunkt des NM7Q für den Referenzpegel Rethem innerhalb des hydrologischen Jahres für die Zeiträume Z1, Z2 und Z3 berechnet für die 2 REMO-Läufe

### 5.2.2.4 NM14D

Die Auswertungen des NM14D wurden analog zu denen des NM7Q durchgeführt. Es zeigten sich in allen Fällen die gleichen Tendenzen wie für das NM7Q. Aufgrund dessen wird auf eine detaillierte Darstellung an dieser Stelle verzichtet.

### 5.2.2.5 maxD

#### 5-jährliche maxD, alle Referenzpegel

Es wurden Gumbel-Verteilungsfunktionen an das maxD für alle Referenzpegel angepasst. Für die Auswertung wurden die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 herangezogen.

Analog zur Auswertung des NM7Q sind in Abbildung 5-25 bis Abbildung 5-27 die 5-jährlichen, auf 20C normierten maxD gezeigt. Weitere Darstellungen (für die

Jährlichkeiten 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100) sind im Anhang 10 zu finden. Für das maxD kann an allen Referenzpegeln in der nahen Zukunft zunächst mit einer leichten Zunahme und in der fernen Zukunft mit einer deutlichen Zunahme gerechnet werden. Im Gegensatz zum NM7Q bedeutet eine Abnahme beim maxD jedoch keine erhöhte, sondern eine verringerte Trockenheit. Die Tendenzen für das maxD zeigen damit in die gleiche Richtung wie die des NM7Q. Die Ausprägung ist jedoch höher.

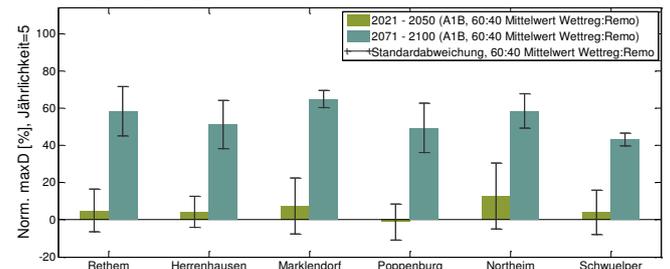


Abbildung 5-25: 5-jährliche, auf 20C normierte maxD für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

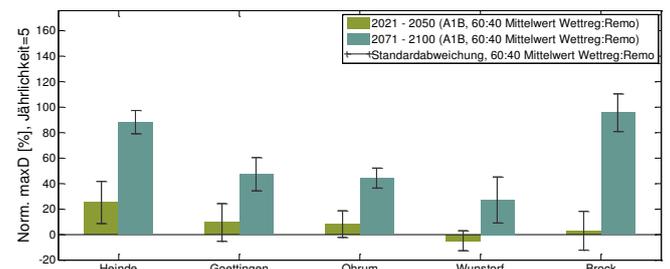


Abbildung 5-26: 5-jährliche, auf 20C normierte maxD für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

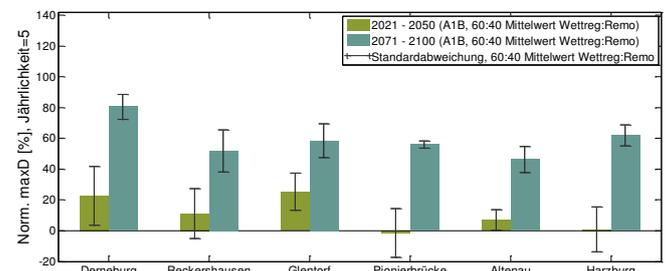


Abbildung 5-27: 5-jährliche, auf 20C normierte maxD für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

#### maxD, Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100, Flächenmittel über alle Pegel

In Abbildung 5-28 sind die Abweichungen der maxD Quantile 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 zum Niveau

des Zeitraums 1 (20C) als Flächenmittel über alle Referenzpegel dargestellt. Für alle Jährlichkeiten zeigen sich ähnliche Tendenzen, die (relativ zu Z1 gesehen) mit steigender Jährlichkeit leicht abnehmen. Die „kleineren“ Trockenperioden (mit geringer Jährlichkeit) zeigen größere Ausschläge in Bezug auf veränderte klimatische Verhältnisse als die „größeren“ Trockenperioden (mit höherer Jährlichkeit).

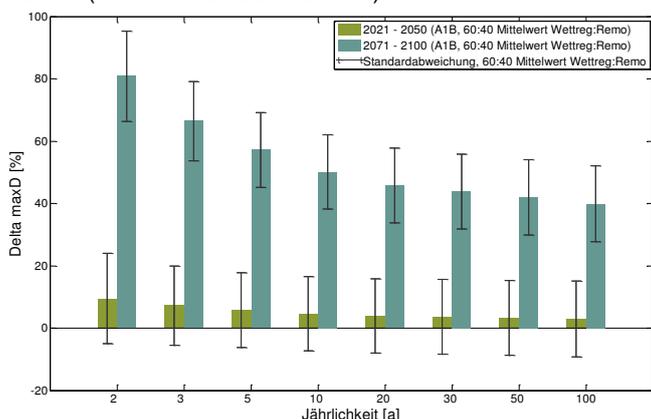


Abbildung 5-28: Flächengemittelte Abweichungen des maxD im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

#### Auftrittszeitpunkt des maxD

Auch für das maxD wurde der Auftrittszeitpunkt (als „Day of year“) innerhalb des hydrologischen Jahres für die Zeiträume Z1, Z2 und Z3 untersucht. Da sich das maxV am selben Zeitpunkt befindet und die Kenngrößen sumD und sumV keine zusammenhängenden Zeitperiode haben, steht die zeitliche Auswertung des Auftretens von maxD stellvertretend für die übrigen Kenngrößen. Getrennt für WETTREG und REMO sind in Abbildung 5-29 und Abbildung 5-30 die Auftrittszeitpunkte des maxD am Referenzpegel Rethem visualisiert. Für WETTREG ergeben sich minimale Tendenzen zu einem späteren Auftreten. Bei REMO ändert sich für Z2 zunächst nichts, während sich für Z3 ein deutlich späterer Zeitpunkt ergibt. Repräsentativ für ein kleineres Einzugsgebiet sind die Auftrittszeitpunkte des maxD für den Referenzpegel Göttingen in Anhang 11 dargestellt.

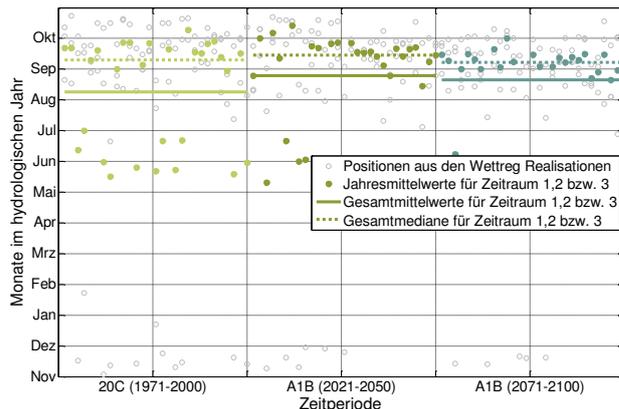


Abbildung 5-29: Auftrittszeitpunkt des maxD innerhalb des Jahres für Z1, Z2 und Z3 für 20 WETTREG-Realisationen am Referenzpegel Rethem

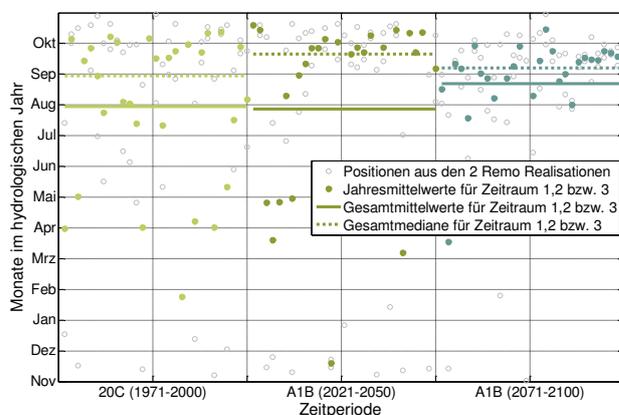


Abbildung 5-30: Auftrittszeitpunkt des maxD innerhalb des Jahres für Z1, Z2 und Z3 für 2 REMO-Läufe am Referenzpegel Rethem

#### 5.2.2.6 maxV

##### 5-jährliche maxV, alle Referenzpegel

Es wurden Gumbel-Verteilungsfunktionen an das maxV für alle Referenzpegel angepasst. Für die Auswertung wurden die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 herangezogen. In Abbildung 5-31 bis Abbildung 5-33 sind die resultierenden 5-jährlichen, auf 20C normierten maxV für alle Referenzpegel dargestellt. Die Tendenzen des maxV entsprechen denen des maxD. Die Deltas sind jedoch stärker ausgeprägt. Nach einer leichten Zunahme in Z2 folgt eine starke Zunahme in Z3.

Weitere Darstellungen (für die Jährlichkeiten 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100) sind im Anhang 12 zu finden.

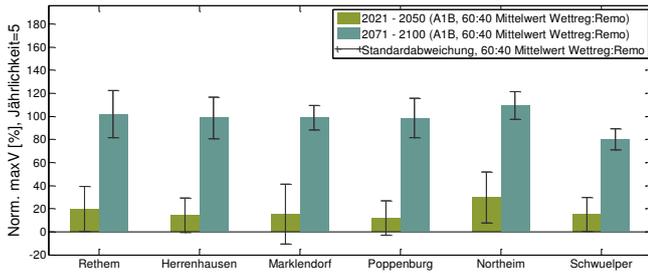


Abbildung 5-31: 5-jährliche, auf 20C normierte maxV für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

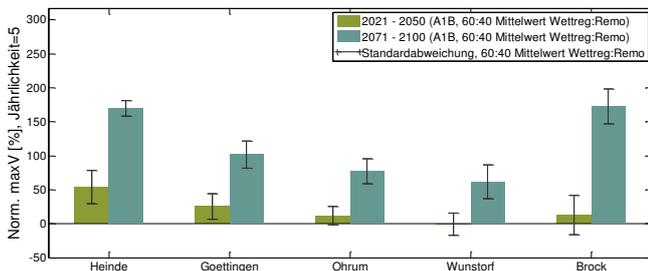


Abbildung 5-32: 5-jährliche, auf 20C normierte maxV für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

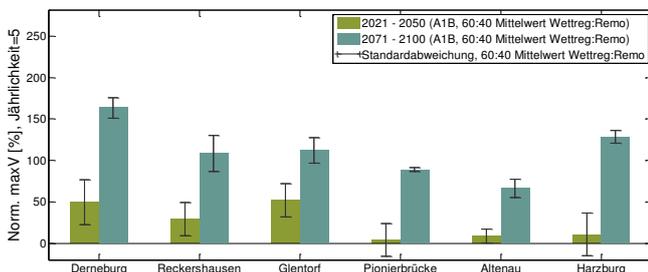


Abbildung 5-33: 5-jährliche, auf 20C normierte maxV für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

maxV, Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100, Flächenmittel über alle Pegel

In Abbildung 5-34 sind die Abweichungen der maxV-Quantile 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 zum Niveau des Zeitraums 1 (20C) als Flächenmittel über alle Referenzpegel abgebildet. Die Tendenzen sind analog zum maxD, jedoch mit höheren Deltas.

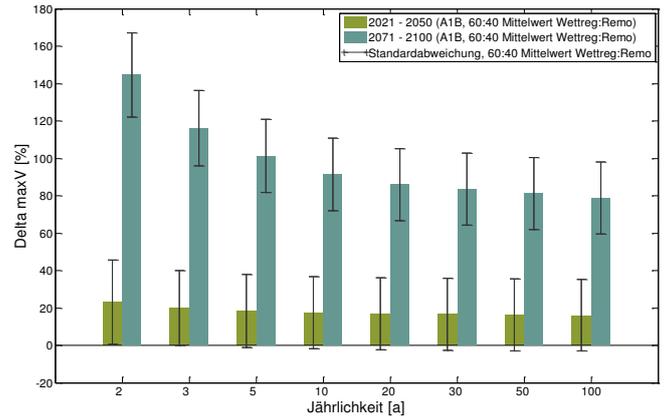


Abbildung 5-34: Flächengemittelte Abweichungen des maxV im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

5.2.2.7 sumD

5-jährliche sumD, alle Referenzpegel

Es wurden Gumbel-Verteilungsfunktionen an das sumD für alle Referenzpegel angepasst. Für die Auswertung wurden die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 herangezogen. Die 5-jährlichen, auf 20C normierten sumD für alle Referenzpegel sind in Abbildung 5-35 bis Abbildung 5-37 illustriert. Nach einer leichten Zunahme der summierten Trockentage im Jahr für die nahe Zukunft sind in der fernen Zukunft deutlich vermehrte Trockenperioden zu erwarten. Diese Tendenzen sind an allen Referenzpegeln zu erwarten.

Weitere Darstellungen (für die Jährlichkeiten 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100) sind im Anhang 13 zu finden.

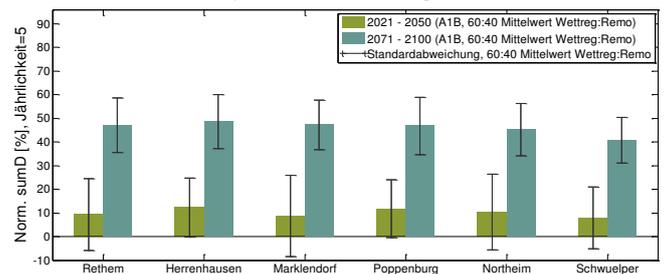


Abbildung 5-35: 5-jährliche, auf 20C normierte sumD für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

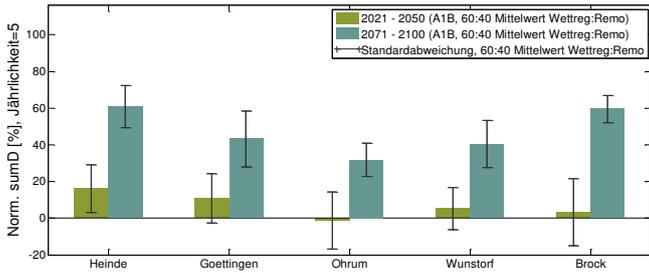


Abbildung 5-36: 5-jährliche, auf 20C normierte sumD für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

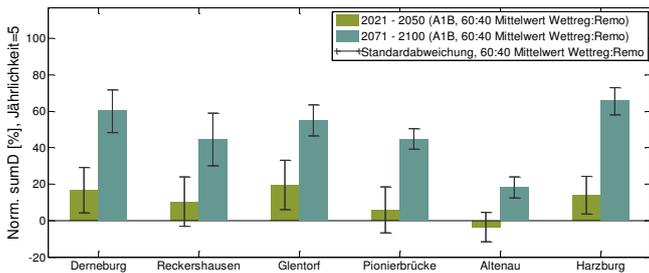


Abbildung 5-37: 5-jährliche, auf 20C normierte sumD für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

sumD, Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100, Flächenmittel über alle Pegel

In Abbildung 5-38 sind die Abweichungen der sumD-Quantile 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 zum Niveau des Zeitraum 1 (20C) als Flächenmittel über alle Referenzpegel veranschaulicht. Die Tendenzen zeigen für alle Jährlichkeiten in die gleiche Richtung, das Delta wird für höhere Jährlichkeiten kleiner. Die „kleinen“ Trockenperioden sind somit von einer größeren Schwankungsbreite betroffen als die „größeren“ (= extremen) Trockenperioden.

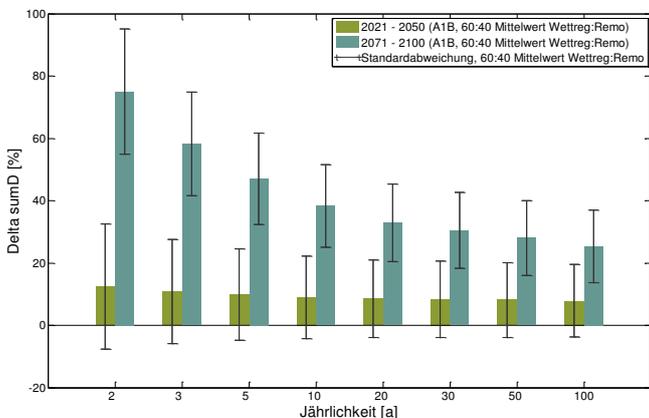


Abbildung 5-38: Flächengemittelte sumD über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

5.2.2.8 sumV

5-jährliche sumV, alle Referenzpegel

Es wurden Gumbel-Verteilungsfunktionen an das sumV für alle Referenzpegel angepasst. Für die Auswertung wurden die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 herangezogen. Die 5-jährlichen, auf 20C normierten sumV für alle Referenzpegel sind in Abbildung 5-39 bis Abbildung 5-41 visualisiert. Die Tendenzen des sumV entsprechen im Wesentlichen denen des maxV.

Weitere Darstellungen (für die Jährlichkeiten 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100) sind im Anhang 14 zu finden.

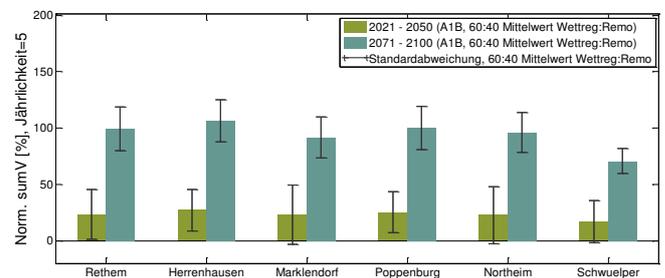


Abbildung 5-39: 5-jährliche, auf 20C normierte sumV für die Referenzpegel Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim und Groß Schwülper. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

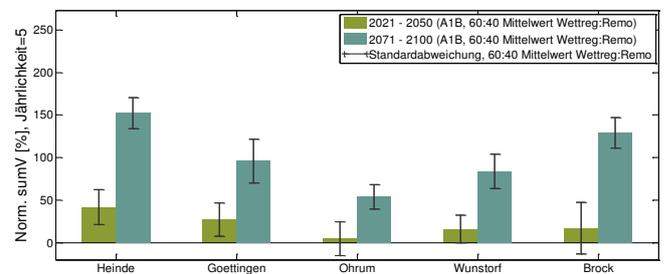


Abbildung 5-40: 5-jährliche, auf 20C normierte sumV für die Referenzpegel Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf und Brock. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

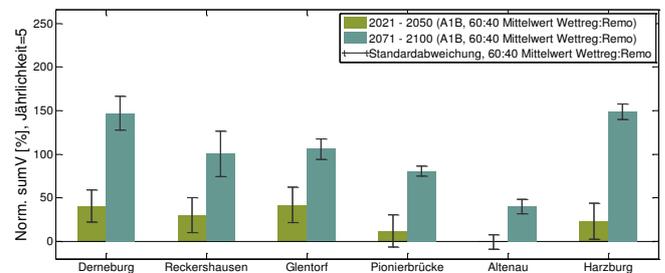


Abbildung 5-41: 5-jährliche, auf 20C normierte sumV für die Referenzpegel Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau und Harzburg. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

sumV, Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100, Flächenmittel über alle Pegel

Abbildung 5-42 zeigt die Abweichungen der sumV-Quantile 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 zum Niveau des Zeitraums 1 (20C) als Flächenmittel über alle Referenzpegel. Die Tendenzen zeigen für alle Jährlichkeiten in die gleiche Richtung. Auch hier ist das Delta für die kleineren Jährlichkeiten größer.

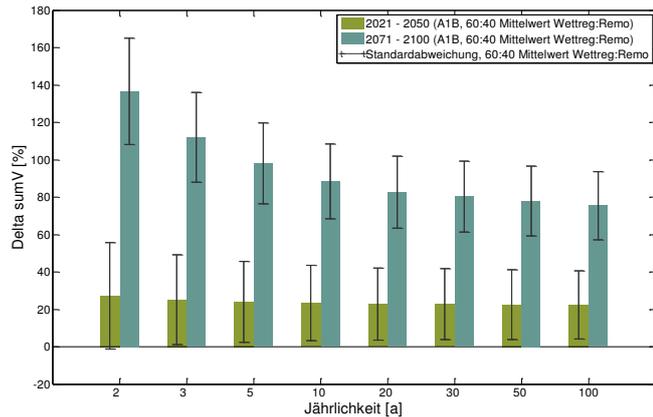


Abbildung 5-42: Flächengemittelte Abweichungen des sumV im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

### 5.2.2.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit dieser Studie wurde erstmals für Niedersachsen das Niedrigwassergeschehen am Beispiel des Aller-Leine und Oker Einzugsgebiets in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung unter Klimaänderungen quantifiziert.

Einen Überblick über alle Niedrigwasserkenngößen gibt Abbildung 5-43. Auf der Abszisse sind die Jährlichkeiten 2, 5, 20 und 50 aufgetragen, jeweils für die Auswerteperioden Z2 (nahe Zukunft) und Z3 (ferne Zukunft). Auf der Ordinate sind die prozentualen Abweichungen der Kenngößen im Bezug zur Referenz Z1 (Delta von 0% = Niveau Z1). Anhand von Abbildung 5-43 lassen sich die folgenden Aussagen festhalten:

- Alle Kenngößen zeigen die gleichen Tendenzen (hierbei ist zu beachten, dass NM7Q eine Minimaserie ist und die übrigen Kenngößen Maximaserien sind).
- Die Trockenheit nimmt in naher Zukunft leicht zu. Dieses Ergebnis ist vorsichtig zu interpretieren, da:

- Die Tendenzen nur sehr klein und nicht robust sind.
- die Talsperrenbewirtschaftung im ALO Gebiet den NW-Abfluss beeinflusst.
- sich Unsicherheiten aus der begrenzten Anzahl von Realisationen (WETTREG, REMO) ergeben. Hierzu erfolgen weitere Untersuchungen in der geplanten Phase 4.

- Die Trockenheit nimmt in ferner Zukunft deutlich zu.
  - Die Unsicherheiten sind auch hier insgesamt relativ groß. Die Standardabweichungen der Balkenplots liegen jedoch meist komplett oberhalb oder unterhalb der Abszisse, selten wird diese geschnitten. Das Signal kann als robust bewertet werden.
- Die Deltas für das NM7Q sind kleiner als die der übrigen Kenngößen.
- Die Deltas der Volumenauswertungen (maxV und sumV) sind am größten.
- Die Abweichungen sind für kleinere Jährlichkeiten höher als für größere Jährlichkeiten.

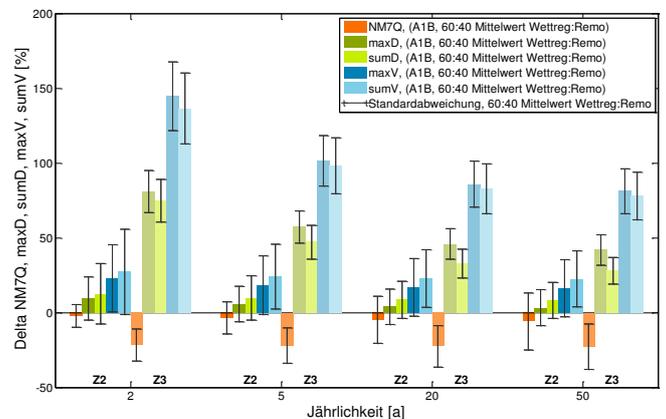


Abbildung 5-43: Flächengemittelte Abweichungen der NW-Kenngößen (NM7Q, maxD, sumD, maxV und sumV) im Vergleich zur Referenz über alle Referenzpegel für die Jährlichkeiten 2, 5, 20, und 50. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2

### 5.2.2.10 Gültigkeit

Die in diesem Projekt erarbeiteten Resultate basieren auf den vereinbarten Rand- und Anfangsbedingungen. Zunächst wird von dem IPCC Emissions-Szenario A1B ausgegangen, welches als „mittleres“ Szenario zwischen nachhaltigen und industriellastigen Szenarien gesehen werden kann (IPCC, 2000). Weiterhin wird

dieses Emissions-Szenario dem globalen Klimamodell „ECHAM 5/MPI-OM“ zugrunde gelegt. Dessen Ergebnisse ergeben die Randbedingungen für die Regionalmodelle WETTREG2006 und REMO. Die mit diesen Regionalmodellen generierten, meteorologischen Zeitreihen gehen als Input in das hydrologische Modellsystem PANTA RHEI ein.

### 5.2.2.11 Schlussfolgerungen

Für die zukünftige Entwicklung der Niedrigwassersituation im Aller-Leine-Oker Einzugsgebiet ergibt sich ein differenziertes Bild.

Es lässt sich zunächst einheitlich für alle Referenzpegel und NW-Kenngrößen festhalten, dass in naher Zukunft mit einer leichten und in ferner Zukunft mit einer deutlichen Zunahme der Trockenheit zu rechnen ist. Die aus den verfügbaren Inputdaten korrekt berechnete NW-Abnahme der nahen Zukunft scheint jedoch aus folgenden Gründen unsicher (siehe auch Kapitel 5.2.2.9): Die Talsperren üben durch ihre regulierenden Wirkungen besonderen Einfluss auf das Niedrigwassergeschehen aus. Des Weiteren liegt der tatsächlich beobachtete Niederschlag der Jahre 2000-2013 deutlich unterhalb der von den Regionalmodellen prognostizierten Niederschläge auf Basis von A1B (der „Prognose“-Zeitraum beginnt bereits im Jahr 2001). Zusammen mit der Tatsache, dass die begrenzte Anzahl von Realisationen (aus WETTREG und REMO) eine robuste Aussage erschwert, ergeben sich zusätzliche Unsicherheiten, die in der anschließenden Phase 4 weiter untersucht werden.

Die antreibenden Prozesse hinter den Änderungen im Niedrigwassergeschehen sind nicht immer phasengleich, es ergeben sich teilweise gegenläufige Einflüsse. Ein Beispiel hierfür ist der Niedrigwasserabfluss, welcher hier als NM7Q ausgewertet wurde. Eine Zunahme der Winterniederschläge in der Zukunft bewirkt eine erhöhte Grundwasserneubildung in diesem Quartal. Diese hat Einfluss auf den Basisabfluss des Folgejahres. Speziell der Niedrigwasserabfluss ist sehr stark vom Basisabfluss abhängig und würde im folgenden Sommer entsprechend reagieren. Hingegen erwirkt die erhöhte Temperatur und eher einsetzende Vegetationsphase im Frühjahr und Sommer in der Zukunft eine Abnahme des Niedrigwasserabflusses. Dieses hat zur Folge, dass die Abweichungen des NM7Q (in Z2 und Z3) im Vergleich zu Z1 gedämpft werden.

Weiterhin wird deutlich, dass die Deltas für die Längen und Volumina der Trockenperioden (maxD, sumD, maxV, sumV) größer sind als die des Niedrigwasserabflusses. Diese Kenngrößen werden anhand des 15%-Quantils der Unterschreitungsdauerlinie berechnet, welches im Allgemeinen oberhalb des NM7Q liegt. Daraus lässt sich schließen, dass dieser Schwellabfluss häufiger unter- bzw. überschritten wird als der NM7Q. Dies liegt daran, dass zum Erreichen des Schwellabflusses nicht ausschließlich Komponenten des Basisabflusses (wie beim NM7Q) beteiligt sind, sondern partiell auch Zwischenabfluss aus der ungesättigten Zone. Dieser hingegen ist stärker von klimatischen Änderungen (erhöhte Temperatur) im Sommer beeinflusst als der NM7Q, der fast ausschließlich vom Basisabfluss gespeist wird. Die Schwankungsbreite der Kenngrößen maxD, sumD, maxV, sumV ist folglich größer als die des Niedrigwasserabflusses.

Es lässt sich weiter anführen, dass für die vorgestellten Modellergebnisse der Klimaimpakt betrachtet wurde. Die weiteren Randbedingungen, zu denen beispielsweise Talsperrenabgaben oder Einleitungen und Entnahmen zählen, werden für die Zukunft mit denen des Status quo angenommen. Insbesondere die Talsperrenabgaben haben einen signifikanten Einfluss auf das Niedrigwasser. Dieser Einfluss reicht sehr weit in den Unterlauf. Falls die Richtlinien für die Abgaben in Zukunft geändert werden, würde sich dies in der Höhe des Niedrigwassers bemerkbar machen. Auch vermehrte Entnahmen in der Zukunft (z.B. seitens der Landwirtschaft) können Einfluss auf das sich letztlich einstellende Niedrigwasser haben. Dies gilt indirekt auch für Entnahmen aus dem 1. Grundwasserstockwerk, da der Basisabfluss fast ausschließlich grundwassergespeist ist.

### 5.2.2.12 Ausblick

Die für dieses Teilprojekt erarbeitete Methodik folgt innovativen Ansätzen, die speziell auf die Klimaimpaktmodellierung in Kombination mit Niedrigwasserabflüssen zugeschnitten sind. Das verwendete Wasserhaushaltsmodell überzeugt durch eine mehr als adäquate Anpassung des Gebietswasserhaushaltes und den zugehörigen Abflüssen an die beobachteten Werte.

Für weiterführende Betrachtungen sind Ausweitungen der Klimaszenarien und auch eine größere Anzahl von globalen und regionalen Klimamodellen von Interesse.

Mit dieser vergrößerten Bandbreite von klimatischen Randbedingungen würde sich die Aussagekraft der letztendlich resultierenden Größen deutlich erhöhen. Weiterhin wäre eine verbesserte Analyse der Unsicherheiten möglich. Auf mögliche Unsicherheiten insbesondere in den Niederschlägen des A1B Zeitraums wird im Folgeprojekt (KliBiW Phase 4) weiter eingegangen.

### 5.3 Detailanalyse zukünftiger lokaler Niedrigwasserverhältnisse im Westharz

Die Ergebnisse für die zukünftigen lokalen Niedrigwasserverhältnisse im Harz, dargestellt anhand der Abflüsse an den Pegeln Altenau, Harzburg und Pionierbrücke, sind Anhang 8 zu entnehmen.

### 5.4 Zusammenfassende Betrachtung

Die Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in Niedersachsen zeigt für die vergangenen rund 50-60 Jahre relativ eindeutige Tendenzen. Alle betrachteten Niedrigwasserindizes weisen auf eine Verschärfung der Situation in den Sommermonaten hin, vor allem im südlichen bzw. südöstlichen Niedersachsen, in dem sich auch die Einzugsgebiete von Aller und Leine befinden. Diese Tendenzen werden auch durch die Detailbetrachtungen an Pegeln im Harz bestätigt, die nicht durch Niedrigwasseraufhöhungen der Talsperren beeinflusst sind.

Für die Zukunft ergibt sich auf Basis des gewählten Klimamodell-Ensembles bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (201 – 2050) in Niedersachsen eine schwache Verschärfung der Niedrigwasserverhältnisse gegenüber dem Beobachtungszeitraum von 1971-2000. Zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071 – 2100) nehmen die Tendenzen einer Zunahme von Trockenheit und folglich der Verschärfung von Niedrigwasserverhältnissen verstärkt zu. Diese Gegebenheiten spiegeln sich auch im Aller-Leine Gebiet wider, wie an verschiedenen Untersuchungspegeln anhand von Niedrigwasserabfluss-Kenngrößen verdeutlicht wurde.

Die auf Basis der verwendeten drei Klimamodellensätzen (WETTREG2006, REMO-UBA, REMO-BfG) ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die Klimasignale in der fernen Zukunft mehrheitlich robuster ausfallen als in der nahen Zukunft. Zudem sind die Änderungen beim NM7Q etwas schwächer ausgeprägt als bei den

anderen Niedrigwasser-Kenngrößen. Gleichzeitig tendieren die kleineren Einzugsgebiete zu einer stärker ausgeprägten Verschärfung der Situation als größere, d.h. es sind eher Abnahmen des NW-Abflusses für kleinere Gebiete zu erwarten, insbesondere bei kleinen Jährlichkeiten von zwei Jahren.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse aber eine nicht unerhebliche Bandbreite an möglichen, wenn auch z.T. robusten Entwicklungen. D.h. die projizierten Veränderungen variieren z.T. erheblich zwischen den betrachteten Klimamodellen, was die Notwendigkeit der Verwendung von Modell-Ensembles bestätigt. Nur so können repräsentative Bandbreiten und ggf. robuste Klimasignale identifiziert und bekräftigt werden.

## 6 Erkenntnisse für die Praxis

### 6.1 Abschätzung der regionalen Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasser

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen möglichen Folgen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse wurden anhand von Mittelwerten und Bandbreiten des benutzten Modell-Ensembles beschrieben. Das Ziel war die Schaffung einer Datenbasis, mit deren Hilfe Handlungsempfehlungen und Maßnahmen für eine erfolgreiche Anpassung des Niedrigwasser-Managements an den Klimawandel entwickelt werden können.

Das zukünftige Klimasignal ist jedoch nur ein Bestandteil der Faktoren, die bei der Herleitung eines Handlungsbedarfs für bestimmte Regionen oder Sektoren eine Rolle spielen können. Ein weiteres wichtiges Kriterium stellt die Empfindlichkeit bzw. Verwundbarkeit (Vulnerabilität) eines Systems gegenüber Veränderungen dar, in diesem Fall gegenüber einer möglichen Verschärfung der zukünftigen Niedrigwasserverhältnisse. Zur Charakterisierung der Vulnerabilität wurden in dieser Untersuchung Kriterien abgeleitet, die sowohl die aktuelle klimatisch-hydrologische wie naturräumliche Situation als auch die anthropogenen Nutzungsansprüche an das Gut (Oberflächen)Wasser widerspiegeln. Die zugrunde liegenden Daten stammen zum einen aus der Landesdatenbank Niedersachsen sowie vom Geodaten-Server GeoView des NLWKN, zum anderen wurden sie aus vorliegenden Klimabeobachtungsdaten ermittelt bzw. mit Hilfe von Daten des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) abgeleitet. Das Vorgehen orientiert sich teilweise an einer Vulnerabilitätsanalyse für die Region Westsachsen (MORO), im Zuge derer die Verwundbarkeit der Region Westsachsen gegenüber den Folgewirkungen des Klimawandels auf regionaler Ebene abgeschätzt wurde (Schmidt et al., 2011).

#### 6.1.1 Identifikation sensibler Bereiche

Zur Einschätzung der regionalen Vulnerabilität wurden in einem ersten Schritt Kriterien betrachtet, die eine Charakterisierung der aktuellen Situation ermöglichen sollen. Hierzu zählen die aktuellen klimatischen und hydrologischen Verhältnisse im Hinblick auf Trockenheit und Niedrigwasser. Die klimatischen Verhältnisse

können beschrieben werden durch die klimatische Wasserbilanz (KWB), die sich nach folgender Formel berechnet:

$$KWB = P - ETp \quad [6-1]$$

Hierbei ist P der Niederschlag und  $ETp$  die potentielle Verdunstung. Das bedeutet, die KWB gibt Auskunft über den Anteil der Niederschlagsmengen, der nicht verdunstet, sondern als quasi abflusswirksamer Niederschlag (Effektivniederschlag) zur Verfügung steht. Abbildung 6-1 zeigt die klimatische Wasserbilanz für Niedersachsen, gemittelt über den Zeitraum 1966-2010, basierend auf Richter-korrigierten Niederschlägen und der potentiellen Verdunstung nach Penman, vereinfacht nach Wendling (DVWK, 1996). Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen dem trockenen zentralen bzw. östlichen Tiefland und den feuchteren Küsten- und Mittelgebirgsregionen.

Die aktuellen Niedrigwasserverhältnisse werden durch die Niedrigwasser-Abflussspenden (MNq) als Abflussmenge bezogen auf das Einzugsgebiet an den jeweiligen Pegeln beschrieben, ebenfalls gemittelt über den Zeitraum 1966-2010. Da eine Klassifizierung der MNq-Werte nach tendenziell trockeneren bzw. feuchteren Verhältnissen stark abhängig ist von standörtlichen Gegebenheiten, wurden die Werte zur Vereinfachung der Bewertung in drei ordinalskalierte Klassen eingeteilt (unteres, mittleres und oberes Drittel des Wertebereichs aller betrachteten Pegel). Abbildung 6-2 zeigt die räumliche Verteilung der Klassen der MNq-Werte über Niedersachsen. Ähnlich wie bei der KWB zeigen sich auch hier Regionen, die deutlich niedrigere Abflusswerte aufweisen (meist im zentralen Niedersachsen) als andere Bereiche (Küste und Mittelgebirge).

Des Weiteren ging der Fließgewässertyp nach EG-Wasserrahmenrichtlinie in die Charakterisierung ein. Hierbei werden die Gewässer entsprechend ihrer strukturellen Beschaffenheit und dem vorherrschenden Sohlsubstrat in verschiedene Typen untergliedert. Dabei spielt auch die Eigenschaft eine Rolle, Wassermengen ohne größere (Sicker-)Verluste zu transportieren. Gewässer, die entsprechend größere Sickerverluste aufweisen können, sind in Abbildung 6-3 dargestellt.

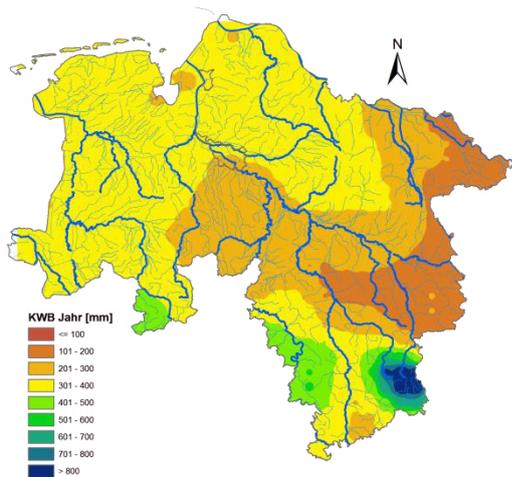


Abbildung 6-1: Klimatische Wasserbilanz für das Gesamtjahr, gemittelt über den Zeitraum 1966-2010

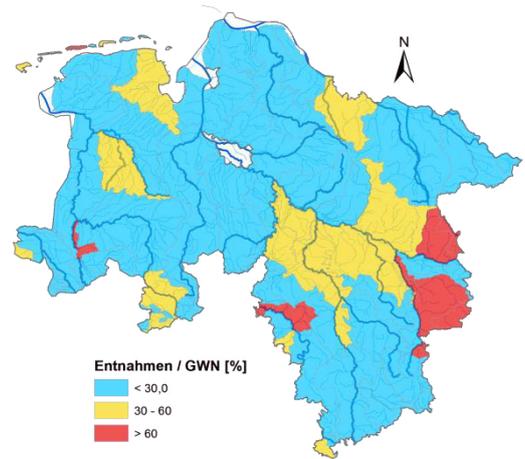


Abbildung 6-4: Verhältnis von Entnahme-Rechten zur GW-Neubildung, gemittelt über den Zeitraum 2000-2011

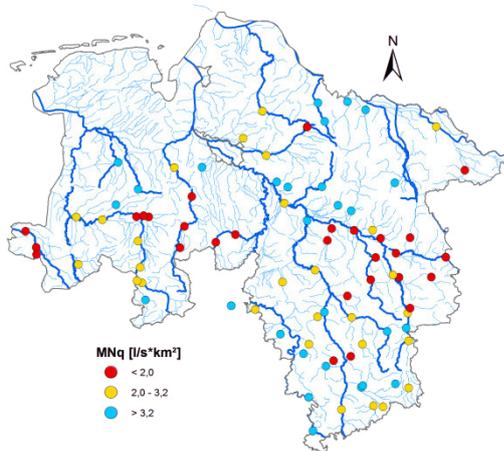


Abbildung 6-2: Niederwasser-Abflussspende für das Gesamtjahr, gemittelt über den Zeitraum 1966-2010

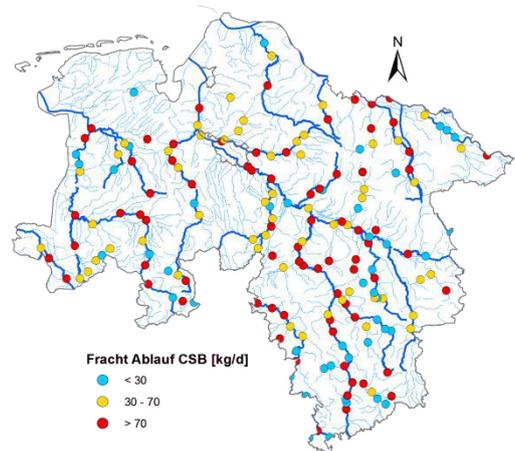


Abbildung 6-5: Einleitungen durch Kläranlagen, dargestellt als chemischer Sauerstoffbedarf (CSB-Wert) im Ablauf, laut dem Lagebericht 2013 Kommunalabwasser Niedersachsen

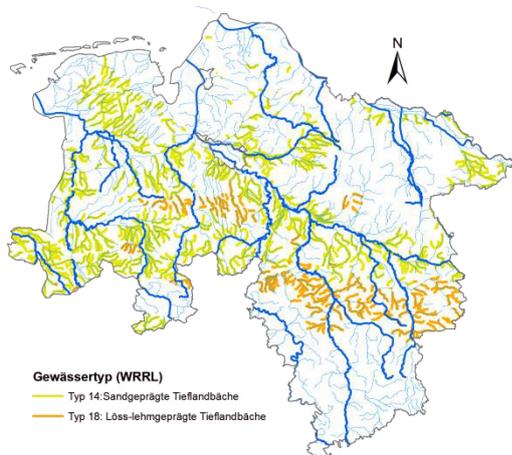


Abbildung 6-3: Gewässertypen nach EG-WRRL mit nennenswerten Sickerverlusten beim Wassertransport

Neben den quasi natürlichen Verhältnissen spielen auch die anthropogenen Einflüsse eine entscheidende Rolle bei der Einschätzung der Vulnerabilität von Regionen und Gewässerläufen bei Niedrigwasser.

Hierzu zählen einerseits Entnahmen zur Gewinnung von z.B. Trink-, Brauch- oder Beregnungswasser. Diese Entnahmen stammen in Niedersachsen zu einem wesentlichen Teil aus dem Grundwasser. Da aber der Oberflächenabfluss in Zeiten von Niedrigwasser praktisch ausschließlich aus dem grundwasserbürtigen Zufluss gespeist wird, beeinflussen Entnahmen aus dem Grundwasser letztlich auch in erheblichem Maße die Niedrigwasserführung von Oberflächengewässern. In Abbildung 6-4 sind die Mengen der Entnahmerechte, entsprechend dem „Wasserbuch- und Wasserentnahmeprogramm Niedersachsen“ (WBE), der mittleren Grundwasserneubildungsrate von 2000-2011 gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass es in Niedersachsen Regionen mit unterschiedlichen Ausnutzungsgraden der neu gebildeten Grundwassermengen gibt. Diese liegen z.T. bei bis zu 60%, in einigen Gebieten sogar darüber.

Neben den bisher aufgezeigten Charakteristika, die sich allesamt auf die Menge des Wassers im Niedrigwasserfall konzentrieren, gibt es andererseits auch anthropogene Einflüsse, die die Qualität des Wassers, speziell bei Niedrigwasser, erheblich beeinflussen können. Hierzu zählen in erster Linie diffuse oder punktuelle Einleitungen. Da diffuse Einleitungen, wie der Name bereits andeutet, nur schwer zu erfassen und zu lokalisieren sind, beschränkt sich die Betrachtung an dieser Stelle auf die punktuellen Einleitungen von kommunalen Kläranlagen. Diese entstammen dem Lagebericht 2013 Kommunalabwasser Niedersachsen. Hier wird eine Reihe von Parametern aufgeführt, die die Qualität des Ablaufes aus den Kläranlagen beschreiben. Exemplarisch wird in Abbildung 6-5 der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) dargestellt, der häufig als Ausdruck für die Belastung von Abwasser mit organischen Substanzen benutzt wird. Dieser wurde, wie auch der MNq-Wert, in ordinalskalierte Klassen unterteilt, entsprechend dem Vorkommen an allen Einleitungsstellen, da eine Einschätzung von „hohen“ oder „niedrigen“ Belastungen sonst stark abhängig vom betrachteten System ist.

Im folgenden Arbeitsschritt wurden die genannten Kriterien räumlich miteinander kombiniert bzw. verschnitten. Das Ergebnis war eine Einstufung der Vul-

nerabilität der betrachteten Gewässerläufe in drei Klassen, die sich aus der Kombination der Ausprägungen der einzelnen Kriterien ergaben (s. Tabelle 6-2). Die Abbildung 6-6 zeigt die betrachteten größeren Gewässerläufe in Niedersachsen entsprechend der vorgenommenen Einteilung. Es zeigt sich, dass vor allem im östlichen Niedersachsen, an den Flussläufen von Aller und Oker sowie von Ise, Fuhse und Wietze, eine erhöhte Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasser festgestellt werden kann. Ein Großteil der Gewässer im zentralen Niedersachsen, darunter u.a. die Leine, Innerste und die Oberläufe der Hunte und Hase weisen eine mittlere Vulnerabilität auf. Vereinzelt Gewässer im nördlichen Niedersachsen, wie z.B. die Böhme, der Unterlauf der Weser, die Soeste, Leda und Jümme sowie die Oder und Rhume im südlichen Harzvorland zeigen hingegen eine eher geringe Vulnerabilität gegenüber Trockenheit.

An dieser Stelle soll betont werden, dass diese Bewertung zunächst allein auf der Verschneidung der für die Bewertung herangezogenen Kriterien basiert. Eine Abstimmung der dargestellten Einschätzung mit dem Gewässerkundlichen Landesdienst erfolgt derzeit. Grundsätzlich kann Abbildung 6-6 aber als eine erste qualitative Einschätzung der Vulnerabilität der Gewässer in Niedersachsen gegenüber Trockenheit gesehen werden.

## 6.1.2 Identifikation von zukünftigen Risikogebieten

Als letzter Schritt erfolgt nun die Kombination der Einschätzung der Vulnerabilität an den betrachteten Gewässerläufen mit dem gemittelten Klimasignal über alle betrachteten Niedrigwasserindizes an den jeweiligen Referenzpegeln. Als Referenzzeitraum wird die ferne Zukunft gewählt, da die Signale in diesem Zeithorizont anhand der zugrundeliegenden Auswertungen als robuster angesehen werden können als in der nahen Zukunft. In diesem Zusammenhang wird ein Signal als robust bezeichnet, wenn alle Klimamodelle des Ensembles bzgl. der zukünftigen Veränderung des NWI die gleiche Richtung (Vorzeichen) aufweisen und wenn das Trend-Rausch-Verhältnis über dem Wert 2 liegt, also das Verhältnis zwischen dem Betrag des Änderungssignals und der Standardabweichung der Einzelwerte.

Diejenigen Bereiche, die durch eine erhöhte Vulnerabilität und / oder eine zukünftig deutliche und robuste

Verschärfung der allgemeinen Niedrigwasserverhältnisse gekennzeichnet sind, müssen als Regionen mit zukünftig erhöhtem Risikopotential angesehen werden. Anhand der Abbildung 6-7 ist zu erkennen, dass dies für Abschnitte entlang der Innerste, im Ober- und Unterlauf der Oker und der gesamten Schunter der Fall ist. Die Aller, die ebenfalls eine hohe Vulnerabilität aufweist, kann aufgrund fehlender Referenzpegel diesbezüglich nicht eindeutig eingestuft werden, sollte aber, ähnlich wie die Wietze, als grundsätzliches Risikogebiet in Betracht gezogen werden.

Für die genannten Bereiche bzw. Gewässerabschnitte existiert ein erhöhter Handlungsbedarf hinsichtlich eines zukunftsfähigen Niedrigwassermanagements, da sich die klimatischen Veränderungen in Zukunft hier wahrscheinlich als erstes bzw. am deutlichsten zeigen werden.

Tabelle 6-1: Klassengrenzen der Kriterien zur Einschätzung der Vulnerabilität von Fließgewässern in Niedersachsen gegenüber Trockenheit

Bewertungskriterium	Einheit	Wertebereich Klasse 1 (geringe Vulnerabilität)	Wertebereich Klasse 2 (mittlere Vulnerabilität)	Wertebereich Klasse 3 (hohe Vulnerabilität)
Klimatische Wasserbilanz (KWB)	mm/a	< 285	285 - 350	> 350
Niedrigwasser-Abflussspende (MNq)	l/s*km <sup>2</sup>	< 2,0	2,0 - 3,2	> 3,2
Entnahmen (im Verhältnis zur GW-Neubildung)	%	< 30	30 - 60	> 60
Stofffracht im Ablauf von Kläranlagen (CSB)	kg/d	< 30	30 - 70	> 70
Fließgewässertyp (nach EG-WRRL)	-	-	Typ 14 Typ 18	-
Gesamt-vulnerabilität	Summe der Kriterienklassen	< 6	6 - 9	> 9

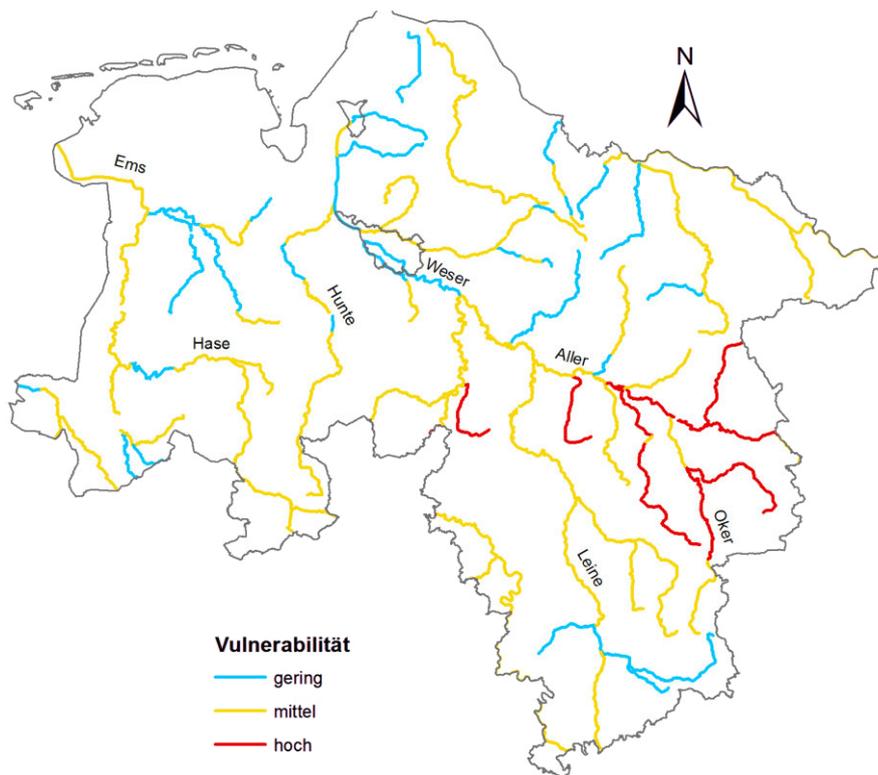


Abbildung 6-6: Klassifizierung der Vulnerabilität gegenüber Trockenheit an ausgewählten Fließgewässern in Niedersachsen

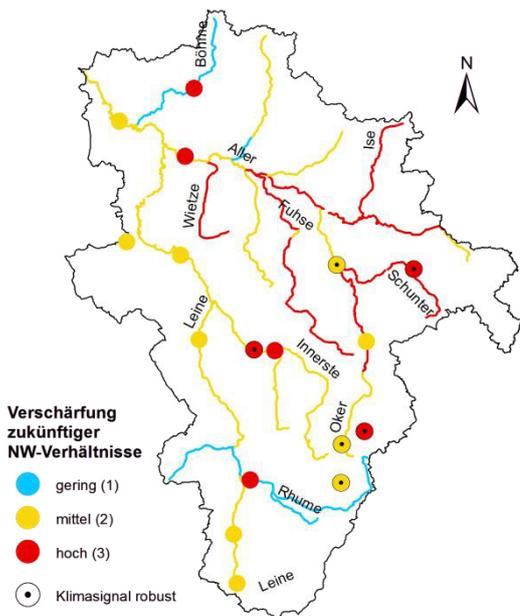


Abbildung 6-7: Klassifizierung der Vulnerabilität gegenüber Trockenheit von ausgewählten Fließgewässern im Einzugsgebiet von Aller-Leine-Oker zusammen mit Klimasignalen der NWI (Z3) an den Referenzpegeln

## 6.2 Ergebnistransfer

Ein wesentliches Ziel des KliBiW-Projektes ist und bleibt die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse und der etablierten wissenschaftlichen Methoden in die fachliche Praxis.

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse sind grundsätzlich als eine erste Einschätzung der möglichen Veränderungen des Klimas sowie der daraus abgeleiteten Folgen für die Niedrigwasserhältnisse in Niedersachsen zu sehen. Aufgrund der gewählten Klimamodellszenarien und des Betrachtungsraumes für deren Klimafolgenmodellierung sind die gemachten Aussagen an diese Randbedingungen gebunden und nicht verallgemeinerbar. Zur Absicherung dieser Erkenntnisse und um Aussagen über die möglichen wasserwirtschaftlichen Klimafolgen für ganz Niedersachsen machen zu können, muss zum einen ein Abgleich mit anderen Klimafolgenstudien erfolgen, die für diesen Raum vorliegen (z.B. KLIFF, KLIMZUG-NORD, etc.). Zum anderen erscheint es notwendig, das gewählte Ensemble von Klimamodelldaten zu erweitern, da jede Auswahl von Ensemble-Mitgliedern nicht notwendigerweise auch den vollen Umfang der Bandbreite von möglichen Entwicklungen darstellt und somit nur ein „Gelegenheitsensemble“ bildet (Linke et

Tabelle 6-2: Klassengrenzen der Signale der einzelnen NWI zur Einschätzung der zukünftigen Niedrigwasserhältnisse an den Referenzpegeln im Aller-Leine Gebiet

NWI	Einheit	Wertebereich 1 (geringe Verschärfung d. NW-Verhältnisse)	Wertebereich 2 (mittlere Verschärfung d. NW-Verhältnisse)	Wertebereich 3 (hohe Verschärfung d. NW-Verhältnisse)
NM7Q	%	≥ -10	≥ -30	< -30
maxD	%	≤ 30	≤ 60	> 60
maxV	%	≤ 30	≤ 60	> 60
Gesamtbeurteilung	Mittel der Kriterienklassen (gerundet)	1	2	3

al., 2014). Zudem muss auch der Betrachtungsraum erweitert werden, da die zukünftigen Signale von Klimamodelldaten regional sehr unterschiedlich sein können. Entsprechende Erweiterungen (Modell-Ensemble und Betrachtungsraum) sind für die Phase 4 von KliBiW vorgesehen.

Doch auch wenn die vorgeschlagenen Erweiterungen durchgeführt werden, bewegen sich die vertretbaren Aussagen immer im Bereich mehr oder weniger großer Bandbreiten. Diese fehlende Genauigkeit in den Aussagen ist bedingt durch eine Reihe von Unsicherheiten, die in der Modellkette Zukunftsszenario → Klimamodell → Wirkmodell implementiert sind. So führt die Betrachtung verschiedener Entwicklungsszenarios bereits zu unterschiedlichen Ergebnissen. Dazu kommt die natürliche Klimavariabilität, d.h. die zeitliche Schwankung im Klimasystem um einen mittleren Zustand, die nicht auf anthropogenen Einfluss zurückgeführt werden kann. Und letztlich stellen die Modelle stets nur ein vereinfachtes Abbild der komplexen Prozesse des Klimasystems dar.

Gleichwohl können aus den vorliegenden Ergebnissen zukünftige Entwicklungstendenzen abgeleitet werden, die bei verschiedenen, klimabeeinflussten Betrachtungen der fachlichen Praxis, wie z.B. im Zuge der Wasserrahmenrichtlinie oder der Hochwasserrisikoma-

nagement-Richtlinie, zunächst qualitativ Berücksichtigung finden können.

Auch wurden und werden die Ergebnisse mit anderen Fachleuten und Praxispartnern diskutiert, beispielsweise bei der Regionalkonferenz „Mittel- und norddeutsche Trockenregionen im Klimawandel“ im April 2014 in Leipzig. Vorgesehen ist weiterhin auch die Vorstellung der Ergebnisse auf dem Niedersächsischen Gewässerforum 2015 in Hildesheim. Das Gewässerforum 2015 hat zum Thema: „Klimawandel im Binnenland - Auswirkungen auf Wasser, Boden und Natur“.

Neben den eigentlichen Ergebnissen sollen die erarbeiteten Methoden aus KliBiW in die fachliche Praxis des Gewässerkundlichen Landesdienstes übernommen werden. Eine Auswahl von Methoden und Anwendungsbereichen, die bereits im Laufe der Phase 3 betrachtet wurden bzw. kurz- bis mittelfristig umsetzbar erscheinen, sind in Tabelle 6-3 zu finden.

Tabelle 6-3: Methoden aus KliBiW und deren beispielhafte Anwendung in der fachlichen Praxis

Methoden	Anwendungsgebiet in der Praxis	Umsetzung
Sprunganalysen	Konsistenzprüfung von (Pegel)Daten	Aktuell
Trendanalysen	Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- und Grundwasserkörper	Aktuell
Vulnerabilitätsanalyse	Identifikation von Risikogebieten mit erhöhtem Handlungsbedarf (→ Anpassungsmaßnahmen)	Aktuell
Simulation von Abflüssen mittels eines Wasserhaushaltsmodells	Hochwasservorhersage  Niedrigwasservorhersage	Aktuell  mittelfristig denkbar

## 7 Zusammenfassung und Fazit

Die aktuellen Erkenntnisse der Klimaforschung belegen, dass ein Klimawandel stattfindet und dieser maßgeblich vom Menschen mitverursacht wurde und wird. Der 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC, 2013) betont, dass sich das Klimasystem der Erde im letzten Jahrhundert gegenüber der vorindustriellen Phase deutlich erwärmt hat, besonders während der letzten Jahrzehnte. Diese Tendenzen werden sich, ungeachtet der möglichen Entwicklung der Treibhausgas- und CO<sub>2</sub>-Emissionen, zunächst weiter fortsetzen, da das Klimasystem aufgrund seiner Trägheit relativ langsam auf Veränderungen reagiert. Dementsprechend wird es auch zu Änderungen des (globalen) Wasserkreislaufs im 21. Jahrhundert kommen. Die Gegensätze zwischen trockenen und feuchten Regionen bzw. Jahreszeiten werden zunehmen, wenn auch regional unterschiedlich. Bereits heute sind die Auswirkungen von extremen und langen Trockenphasen in Deutschland zu spüren, wie die jüngsten Niedrigwasserereignisse von 2003 und 2011 an Rhein, Elbe und Weser zeigen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse hat sich das Projekt KliBiW (Phase 3) mit den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Niedersachsen, mit Fokus auf das Einzugsgebiet von Aller und Leine, beschäftigt. Es wurde sowohl die vergangene als auch die zukünftige Entwicklung verschiedener klimatischer Kenngrößen, wie Temperatur und Niederschlag, für Niedersachsen untersucht. Die Basis hierfür bildeten Beobachtungsdaten sowie ein Ensemble aus drei Regionalen Klimamodell-Datensätzen (WETTREG2006, REMO-UBA, REMO-BfG), alle angetrieben durch das Globalmodell ECHAM5/MPI-OM. Zudem wurden die zukünftigen möglichen Veränderungen der Niedrigwasserverhältnisse auf Basis zweier unabhängig voneinander eingesetzter Modelle, eines statistischen Prognosemodells für Niedersachsen sowie eines deterministischen, einzugsgebietsbezogenen Wasserhaushaltsmodells für das Einzugsgebiet von Aller und Leine, anhand des Klimamodell-Ensembles analysiert.

Die Analyse mit den eingesetzten Modellen zeigt für vergangene und aktuelle Trends, dass es seit Mitte des 20. Jahrhunderts zu einer grundsätzlichen Zunahme der Temperatur in allen Jahreszeiten gekommen ist. Die Niederschläge haben im Winter zuge-

nommen, im Sommer kam es dagegen zu einer Abnahme. Die Niedrigwasserabflüsse haben speziell im Sommer und im Süden von Niedersachsen signifikant abgenommen.

Die Betrachtung der projizierten Klimaänderungen durch das Modell-Ensemble zeigt, dass die zukünftigen Veränderungen der mittleren Verhältnisse von Temperatur und Niederschlag relativ eindeutig ausfallen. Es kommt weiterhin zu einer Zunahme der generellen Temperatur als auch zu einer Zunahme der Winter- und einer Abnahme der Sommerniederschläge. Hinsichtlich der speziellen Trockenwetter-Indizes (wie Hitzetage oder maximale Trockendauer) sind die Signale des Ensembles hingegen etwas differenzierter, aber mit ähnlichen Tendenzen. Dies spiegelt sich auch in den zukünftigen Niedrigwasserverhältnissen wider. So zeigen sich für Niedersachsen bzw. das Aller-Leine Gebiet bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts kaum eindeutige Tendenzen. Für den Großteil der Gebiete trifft zwar eine Verschärfung zu. Diese Signale sind auf Grundlage der verwendeten Klimamodell-Datensätze jedoch für keinen der analysierten Niedrigwasserindizes für diesen Zeitraum als robust einzustufen. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts werden die Signale dagegen robuster. Demnach käme es zu einer Abnahme der Niedrigwasserabflüsse, speziell im Sommer, sowie zu einer Zunahme der Dauer und der Volumendefizite bei Trockenperioden über das gesamte Jahr gesehen. Diese Tendenzen sind regional relativ ähnlich, wobei die Variabilität und Ausprägung der Trockenheit in kleineren Einzugsgebieten etwas größer erscheint. Diese Tendenzen müssen aber aufgrund der Unsicherheiten der Klimamodell-Daten auf kleinen räumlichen Skalen mit Vorsicht interpretiert werden (vgl. Kapitel 3.4.1). Die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse sind in Abbildung 7-1 nochmals qualitativ zusammengefasst.

Das Projekt KliBiW hat mit den vorliegenden Ergebnissen erstmals eine regionale Differenzierung und Quantifizierung klimatischer und hydrologischer Trends und Signale für Niedersachsen aufgezeigt, aus der eine Abschätzung wasserwirtschaftlicher Folgen mit speziellem Fokus auf Niedrigwasser erarbeitet wurde. In Phase 3 des Projektes wurden Klima- und Niedrigwasserverhältnisse der Vergangenheit, Gegenwart und der Zukunft in einem Gesamtzeitraum von 1961-2100 analysiert. Die thematischen und lokalen Schwerpunkte der wasserwirtschaftlichen Folgen

wurden über hydrologische Kenngrößen berechnet und daraus abgeleitet Risikogebiete identifiziert. Dadurch konnten erste fachlich-quantifizierte Grundlagen für die Weiterentwicklung von Niedrigwasser-Managementstrategien entwickelt werden. Mit den angewandten Methoden und Ergebnissen wurde die festgelegte Zielsetzung der wasserwirtschaftlichen Folgenabschätzung für das Binnenland mit dem Themenschwerpunkt Niedrigwasser erfüllt.

Die neuen Erkenntnisse aus KliBiW (Phase 3) stellen das Land Niedersachsen vor die Herausforderung, die Ergebnisse aufzugreifen und in bereits bestehende Management- und Anpassungsstrategien zu integrieren. Als Grundlage hat das Land Niedersachsen bereits richtungsweisende Strategien für eine Anpassung an den Klimawandel entwickelt („Empfehlungen für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels“, „Klimapolitische Umsetzungsstrategie Niedersachsens“). Darin enthalten sind Optimierungen und Handlungsempfehlungen bei der Vorsorge gegenüber extremen Niedrigwasserereignissen. Die vorgesehenen Maßnahmen sollen künftig so ausgeführt werden, dass eine Anpassung an Veränderungen leicht umsetzbar ist. Die Ergebnisse aus KliBiW (Phase 3) können im Rahmen eines Niedrigwassermanagements dabei eine wissenschaftlich fundierte Entscheidungshilfe für entsprechende Maßnahmen bei der niedersächsischen Anpassungsstrategie liefern. Die Verbesserung des Kenntnisstandes über Art und Ausmaß künftiger Niedrigwasserverhältnisse und das rechtzeitige Ergreifen von Maßnahmen kann außerdem mögliche Interessenskonflikte mindern bzw. verhindern.

Nicht zuletzt werden durch KliBiW auch die Fachkompetenzen des Gewässerkundlichen Landesdienstes in

Niedersachsen gestärkt. Im Rahmen des Anschlussprojektes KliBiW (Phase 4) werden die Untersuchungen auf weitere Flussgebiete in Niedersachsen ausgeweitet (zunächst Hase und Hunte).

Die Erkenntnisse aus KliBiW (Phase 3) zeigen, dass das verwendete Klimamodell-Ensemble künftig auf weitere Ensemble-Mitglieder erweitert werden sollte, da die Ergebnisse der Klimafolgenabschätzung eine Bandbreite aufweisen, die durch Einbezug weiterer Ensemble-Mitglieder besser bewertet werden kann. Damit kann die Unsicherheit bzw. Robustheit der Signale für die wasserwirtschaftliche Klimafolgenmodellierung im 21. Jahrhundert weiter konkretisiert werden, insbesondere im Hinblick auf die im IPCC5-Bericht erläuterten RCP-Läufe. Darüber hinaus sollte die verwendete Datengrundlage hydrologischer als auch meteorologischer Eingangsdaten optimiert werden. Die wasserwirtschaftliche Optimierung kann durch ein verbessertes Monitoring und den Ausbau des Pegelmessnetzes in Niedersachsen erfolgen. Dies ist für die wasserwirtschaftliche Untersuchung weiterer Flusseinzugsgebiete von Vorteil. Ein weiterer Schwerpunkt der Optimierung ist es, die Verlässlichkeit und Plausibilität der hydrologischen Eingangsdaten sicherzustellen. Mit einer vom NLWKN veranlassten Pegelkonsistenzprüfung lässt das Land Niedersachsen derzeit für 220 landeseigene Pegel die Beziehungen zwischen Wasserständen und Abflüssen überprüfen und liefert so einen ersten wichtigen Teil für eine verlässliche hydrologische Datenbasis. Der technische Ausbau des Pegelnetzes wäre ein weiterer wichtiger Schritt, um ebenso aussagekräftige Ergebnisse für weitere Gebiete zu erarbeiten.



## 8 Literaturverzeichnis

- Ångström A. (1924). Report to the International Commission for Solar Research on Actinometric Investigations of Solar and Atmospheric Radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 50, 121–126.
- Belz, J. U. (2005): Niedrigwasserabflüsse im Rheingebiet im 20. Jahrhundert – Ursachen und Entwicklungen. *Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung. Kolloquium am 14./15. September 2005 in Herne*, S. 113-129. Koblenz.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979): A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24 (1), 43-69.
- Beven, K. (1995): Linking parameters across scales: Subgrid parameterizations and scale dependent hydrological models, *Hydrological Processes*, 9, 507–525.
- BfG (2006): Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland – Ursachen, Wirkungen, Folgen. *Mitteilungen* 27. Koblenz.
- BfG (2014): Das hydrologische Extremjahr 2011: Dokumentation, Einordnung, Ursachen und Zusammenhänge. *Mitteilungen* 29. Koblenz.
- Binley, A., Beven, K, und Elgy, J. (1989): A physically based model of heterogeneous hillslopes: 2. Effective hydraulic conductivities, *Water Resources Research*, 25, 1227–1233.
- Boess, J., Gehrt, E., Müller, U., Ostmann, U., Sbresny, J., Steininger, A. (2004): Erläuterungsheft zur digitalen Nutzungsdifferenzierten Bodenkundlichen Übersichtskarte 1:50.000 (BUEK50n) von Niedersachsen, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2004.
- Bormann, H. (2010): Runoff Regime Changes in German Rivers Due to Climate Change. *Erdkunde* 64 (3), S. 257-279.
- Bourier, G. (2013): Beschreibende Statistik: Praxisorientierte Einführung - Mit Aufgaben und Lösungen. 11. Auflage. Dordrecht: Springer.
- Bronstert, A. und Bardossy, A. (1999): The role of spatial variability of soil moisture for modelling surface runoff generation at the small catchment scale, *Hydrology and Earth System Sciences*, 3, 505–516.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2013): Die Zukunft von Wasserstraßen und Schifffahrt gestalten in Zeiten des Klimawandels – Wie passen wir uns an? Berlin.
- Coles, N. A., Sivapalan, M., Larsen, J. E., Linnet, P. E. E. R., und Fahrner, C. K. (1997): Modelling runoff generation on small agricultural catchments: can real world runoff responses be captured? *Hydrological Processes*, 11, 111–136.
- Dallmann, D. (2004): Niedrigwasserstatistik ausgewählter Flussgebiete im Zuständigkeitsbereich des NLWK-Süd. Göttingen.
- DVWK. (1996). Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Bonn: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg.), Merkblatt 238.
- DVWK-Merkblatt 120/1983 „Niedrigwasseranalyse“ Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK). Bonn, 1983
- Efron, B. (1979). Bootstrap methods: another look at the jackknife. *The Annals of Statistics* 7(1), 1-26.
- Entin, J. K., Robock, A., Vinnikov, K. Y., Hollinger, S. E., Liu, S., and Namkhai, A. (2000): Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics, *Journal of Geophysical Research*, 105, 11 865–11 877.
- Fangmann, A., Belli, A. & Haberlandt, U. (2013). Trends in beobachteten Abflusszeitreihen in Niedersachsen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 57(5), 196-205.
- Feddes, R. A., Kowalik, P., Kolinska-Malinka, K., und Zaradny, H. (1976): Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function, *Journal of Hydrology*, 31, 13–26.
- Förster, K., M. Gelleszun und G. Meon (2012): A Weather dependent approach to estimate the annual course of vegetation parameters for water balance simulations on the meso- and macroscale. *Adv. Geosci.*
- Glenn A. Hodgkins, G. A., Dudley, R. W. & Huntington, T. G. (2005): Summer low flows in New England during the 20th century. *Journal of the American Water Resources Association*, Heft 41:2, S. 403-411.
- Groß, P. (2009): Aktuelle Niedrigwasserstatistik an Pegeln Niedersachsens (Trends, Tendenzen,

- Wirkfaktoren in festgelegten Untersuchungszeiträumen). Braunschweig.
- Haberlandt, U., van der Heijden, S., Verworn, A., Berndt, C., Dietrich, J., Wallner, M., Krause, F. (2013): Regionalisierung von Klimabeobachtungsdaten und Klimavariablen der WETTREG- und REMO-Szenarien für Niedersachsen als Grundlage für mittel- bis großskalige Modellierungen. Bericht zu den Forschungsprojekten KliBiW und KLIFF.
- Haberlandt, U., Belli, A. & Hölscher, J. (2010). Trends in beobachteten Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag in Niedersachsen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 54(1), 28-36.
- Harzwasserwerke GmbH (2013): Analyse von Niedrigwasserverhältnissen in Einzugsgebieten des Westharzes zur Phase III des Forschungsvorhabens KliBiW.
- Hall, M. J. (2001): How well does your model fit the data? *Journal of Hydroinformatics*, 3, Nr. 1, 49–55.
- Hasenauer, S., Komma, J., Parajka, J., Wagner, W., and Blöschl, G. (2009): Bodenfeuchtedaten aus Fernerkundung für hydrologische Anwendungen, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 61, 117–123.
- Haupt, R. (2008): Niedrigwasserabflüsse in Thüringen – Trends, Statistik, Regionalisierung. *Schriftenreihe Nr. 82 der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie*. Jena.
- Hausmann, B. u. H. Nacken (2011): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime der Eifel-Rur. *Forum Für Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung*, Heft 30.11, S. 166-172.
- Hennegriff, W., Ihringer, J. & Kolokotronis, V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, Heft 1, Nr. 6: S. 309-314.
- Hennegriff, W. (2009): Klimawandel und Niedrigwasser – Möglichkeiten der Anpassung. 4. *KLIWA-Symposium am 3. und 4. Dezember 2009 in Mainz*, KLIWA-Berichte, Heft 15: S. 157-164.
- Henschel, T. (2012): Chancen und Risiken wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen in Bayern. In: Grünewald, U. et al. (Hrsg.): *Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel*, S. 172-182.
- Huang, S., Krysanova, V. & Hattermann, F. F. (2013): Projection of Low Flow Conditions in Germany under Climate Change by Combining Three RCMs and a Regional Hydrological Model. *Acta Geophysica*, Vol. 61, No. 1, S. 151-193.
- IPCC (2000). Special Report Emissions Scenarios. Summary for Policymakers: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Based on a draft prepared by: Nebojsa Nakicenovic, Ogunlade Davidson, Gerald Davis, Arnulf Grubler, Tom Kram, Emilio Lebre La Rovere, Bert Metz, Tsuneyuki Morita, William Pepper, Hugh Pitcher, Alexei Sankovski, Priyadarshi Shukla, Robert Swart, Robert Watson, Zhou Dadi. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2007). *Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*. Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. (2013). *Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Ihringer, J.: Extremwertstatistik. Anwenderhandbuch für das Program EXTREM des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik. Karlsruhe, 2003
- Jacob, D., Bülow, K., Kotova, L., Moseley, C., Petersen, J., & Rechid, D. (2012). *Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung*. Hamburg: Climate Service Center, Report No. 6.
- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P. und Sieck, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. UBA Forschungsbericht 204 41 138, v. UBA-FB 000969, S. 1 – 159.
- Jolly, W. M., R. Nemani und S. W. Running (2005): A generalized, bioclimatic index to predict foliar

- phenology in response to climate. *Global Change Biol.* (11), 619–632.
- Jury, W. A. und R. Horton (2004): *Soil physics*. J. Wiley, Hoboken, NJ.
- Kendall, M.G. (1975): *Rank Correlation Methods*. Griffin, London.
- KLIFF – Klimafolgenforschung in Niedersachsen (2014): *Abschlussbericht 2009 bis 2013*.
- KLIWA (2012): *Klimawandel im Süden Deutschlands – Ausmaß, Auswirkungen, Anpassung – Folgen für die Wasserwirtschaft*. LUBW.
- Knutti, R. (2008). Should we believe model predictions of future climate change? *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 366, S. 4647-4664.
- Krause, P., D. P. Boyle und F. Bäse (2005): Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97.
- Kreye, P., Gocht, M., und Förster, K. (2010): Entwicklung von Prozessgleichungen der Infiltration und des oberflächennahen Abflusses für die Wasserhaushaltsmodellierung, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 54.
- Kreye, P., Gelleszun, M., und Meon, G. (2012): Ein landnutzungssensitives Bodenmodell für die meso- und makroskalige Wasserhaushaltsmodellierung, in: *Wasser ohne Grenzen*, edited by Weiler, M., vol. 31.
- Lange, A.; Eggelsmann, F (2009).: *Wasserwirtschaft im Westharz. Hydrologische Untersuchungen mit Blick auf ein sich veränderndes Klima*. Schrift der Harzwasserwerke GmbH.
- Lange, A.; Eggelsmann, F (2011).: *Der Wasserhaushalt des Westharzes. Hydrologische Untersuchungen 1941-2010*. Schrift der Harzwasserwerke GmbH.
- LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2007): *Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement*. Mainz.
- LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2009): *Entwurf eines LAWA-Strategiepapiers – „Klimawandel - Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft“*.
- LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2010). *Strategiepapier "Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft", Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen*. Dresden.
- Legates, D. R. und G. J. McCabe (1999): Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35, Nr. 1, 233–241.
- Lettenmaier, Dennis P., Eric F. Wood, James R. Wallis, 1994: Hydro-Climatological Trends in the Continental United States, 1948-88. *J. Climate*, 7, 586–607.
- Linke, C. e. (2014). *Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches "Interpretation von Klimamodelldaten"*. Bremen.
- 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.
- Meinke, I., & Gerstner, E. (2009). Digitaler Norddeutscher Klimaatlas informiert über mögliche künftigen Klimawandel. *Mitteilungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG)*, 17.
- Merz, B., Maurer, T., & K., K. (2012). Wie gut können wir vergangene und zukünftige Veränderungen des Wasserhaushalts quantifizieren? *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, S. 244-255.
- Monteith, J. L. (1965): *Evaporation and environment*. In G. E. Fogg (Hrsg.): *The state and movement of water in living organisms*. Band 19, Cambridge: Cambridge University Press, 205–234.
- Moriasi, D. N., J. G. Arnold, Van Liew, M. W., R. L. Bingner, R. D. Harmel und T. L. Veith (2007): *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. *Transactions of the ASABE*, 50, Nr. 3, 885–900.
- Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M., Rose, S., van Vuuren, D.P., Carter, T.R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G.A.; Mithell, J.F.B.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S.J.; Stouffer, R.J.; Thomson, A.M.; Weyant, J.P.; Wilbanks, T.J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, S. 747-756.
- Nakicenovic, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., Rovere, E.L.L.; Metz, B.; Morita, T.; Pepper W.; Pitcher, H.; Sankovski, A.; Shukla, P.; Swart, R.; Watson, R.; Dadi, Z. (2000). *IPCC Special Report Emissions Scenarios: A Special*

- Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Nash, J. E. und J. V. Sutcliffe (1970): River flow forecasting through conceptual models: Part I: a discussion of principles.
- Nilson, E., Krahe, P., Tomassini, L., Jacob, D. (2009): Zweite Realisation des Regionalen Klimamodells REMO als Beitrag zur Schaffung von Entscheidungsgrundlagen für das Wasserstraßenmanagement (kurz: REMO-BFG). Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- NLWKN. (2009). *Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Tätigkeits- und vorläufiger Ergebnisbericht Phase 1.* unveröffentlicht.
- NLWKN. (2012). *Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Abschlussbericht Phase 1 + 2.* In: *NLWKN-Schriftenreihe Oberirdische Gewässer, Band 33.* Norden: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
- 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, Nr. 1032, 120–145.
- Petry, U., Wallner, M., Dietrich, J., Berndt, F., Förster, K., Meon, G., Haberlandt, U. (2015). Validierung ausgewählter Klimamodelldaten als Basis für die Interpretation von wasserwirtschaftlichen Klimafolgenabschätzungen in Niedersachsen. (*in Vorbereitung*).
- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point detection. *Applied Statistics* 28(2), 126-135.
- Prellberg, D. (2005). Zur Arbeit der DWA-Arbeitsgruppe "Niedrigwasser". *Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung. Kolloquium 14./15. September in Herne*, S. 161-164.
- Raschke, M. (2005). Stand der Arbeiten des LAWA-Arbeitskreises "Niedrigwasser". *Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung. Kolloquium 14./15. September in Herne*, S. 165-170.
- Regierungskommission Klimaschutz. (2012). *Empfehlungen für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels.* Hannover: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (Hrsg.).
- 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 ECHAM5, Part I: Model description.* Hamburg, Germany: Max-Planck Institute for Meteorology, Report No. 349.
- Sachs, L. (2004): *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden ; mit 317 Tabellen und 99 Übersichten.* 11. Auflage. Berlin [u.a.]: Springer.
- Schaap, M. G., van Leij, J. F. und M. T. van Genuchten (2001): ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* (251), 163–176.
- Schmidt, C., Seidel, A., Kolodziej, J., Klama, K., Schottke, M., Berkner, A., Friedrich, M.; Chmielewski, S. (2011). *Vulnerabilitätsanalyse Westsachsen.* Dresden / Leipzig: Bearbeitet durch TU Dresden im Auftrag des Regionalen Planungsverbandes Leipzig-West Sachsen (Hrsg.).
- Schönwiese, C., & Janoschitz, R. (2008). *Klima-Trendatlas Deutschland, 1901 - 2000.* Frankfurt/Main: Institut für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main.
- Schönwiese, C.-D. (2013): *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler.* 5. Auflage. Berlin: Borntraeger.
- 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., und 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.
- Sponagel, H. (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung: Mit 103 Tabellen, Schweizerbart, Stuttgart, 5., verbesserte und erweiterte Auflage.*

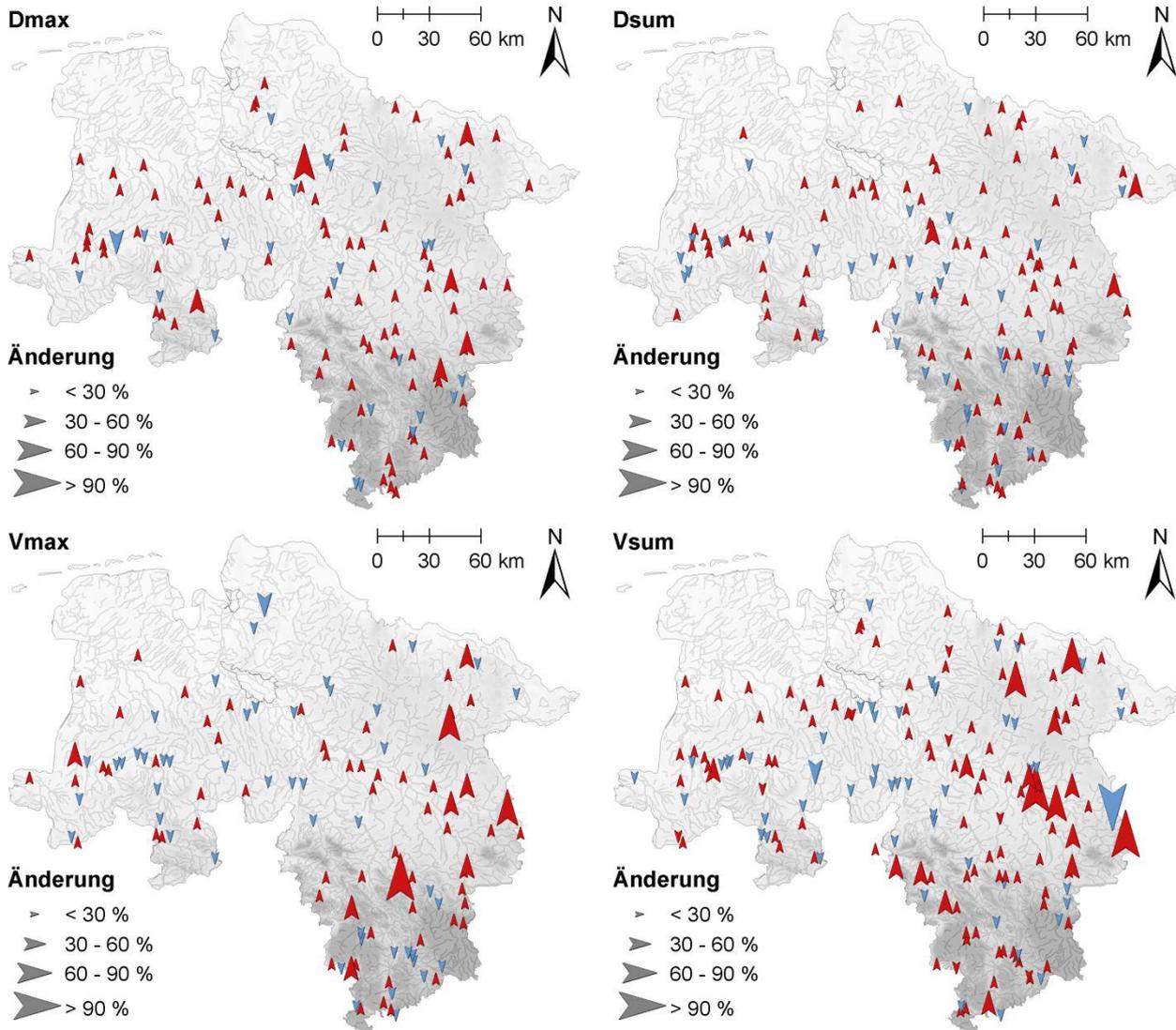
- Theil, H. (1950a). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, I. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen* 53, 386–392.
- Theil, H. (1950b). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, II. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen* 53, 521–525.
- Theil, H. (1950c). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, III. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen* 53, 1397–1412.
- van Genuchten, M. T. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* (44), 892–898.
- van der Linden, P. M. (2009). *Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. UK: Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB.
- Wilby, R. L. & Harris, I. (2006): A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK.
- Willems, W. (2004): Statistische Analyse von Niedrigwasser-Kenngrößen auf der Grundlage stationärer und instationärer Wahrscheinlichkeitsmodellierung. In: Kleeberg, H.-B. und Koehler, G. (Hrsg.): *Niedrigwassermanagement. Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 07.04, S. 15-34.*
- 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.



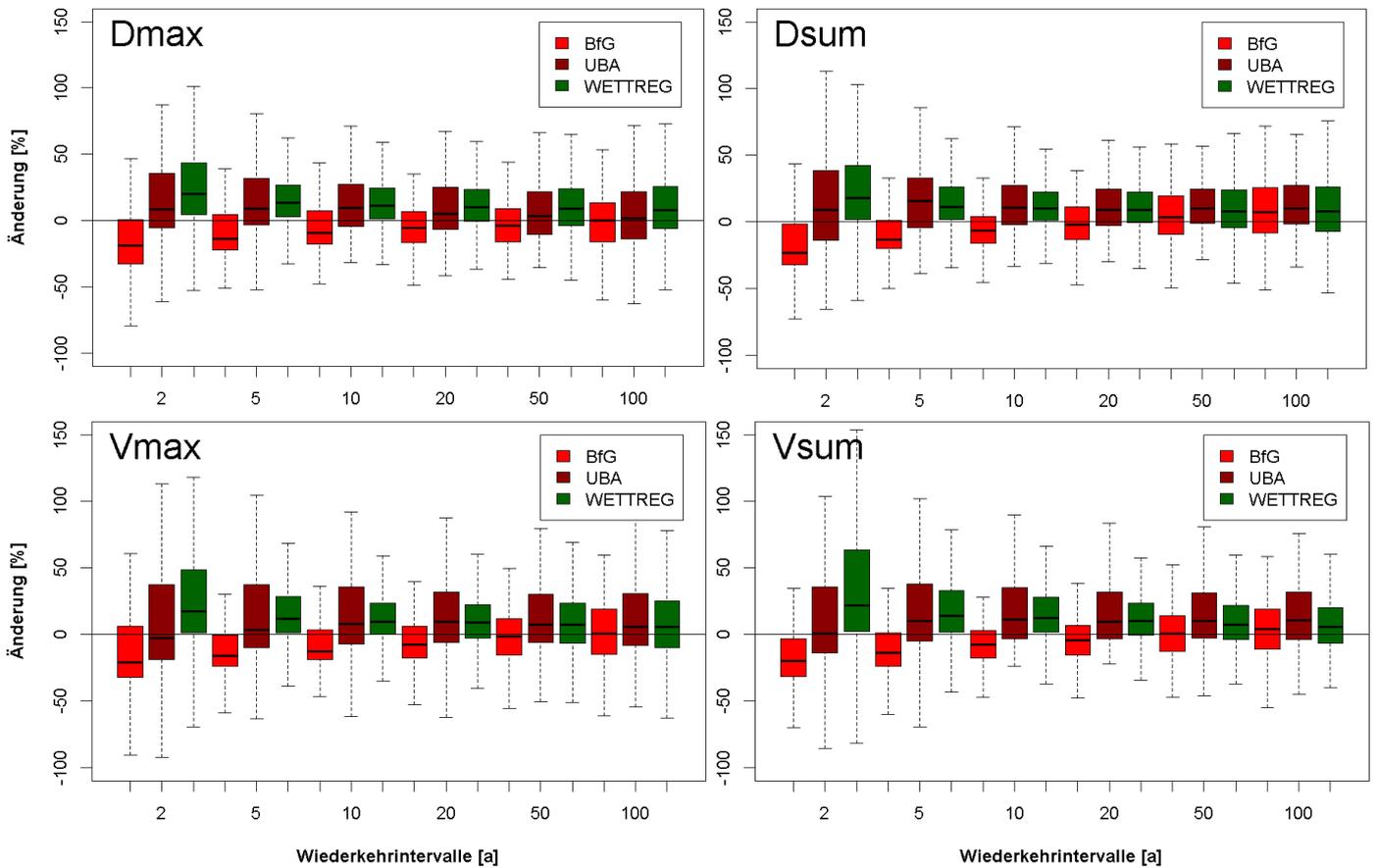
## Anhang

Anhang 1: Räumliche Verteilung der prognostizierten Änderungen der Niedrigwasserindizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall für die nahe Zukunft (2021-2050) gegenüber dem Kontrollzeitraum .....	82
Anhang 2: Prognostizierte Änderungen für die nahe Zukunft (2021-2050) gegenüber dem Kontrollzeitraum für die Niedrigwasserindizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall über alle Stationen. REMO-BfG ist in hellrot, REMO-UBA in dunkelrot und WETTREG in grün dargestellt .....	83
Anhang 3: Räumliche Verteilung der prognostizierten Änderungen der Niedrigwasserindizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall für die ferne Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum .....	84
Anhang 4: Prognostizierte Änderungen für die ferne Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum für die Niedrigwasserindizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall über alle Stationen. REMO-BfG ist in hellrot, REMO-UBA in dunkelrot und WETTREG in grün dargestellt .....	85
Anhang 5: Gütemaße R, E, E_log und E_rel aller Referenzpegel für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode.....	86
Anhang 6: Modelleffizienzen aller Referenzpegel für Klibiw Phase 2 (hellblaue Balken) und 3 (dunkelblaue Balken) für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode. ....	87
Anhang 7: Quartalsbezogene mittlere NM7Q und MQ für die Zeitabschnitte Z1, Z2 und Z3 für den Referenzpegel Göttingen. Zusätzlich sind die Beobachtung und die Simulation mit historischen Klimarandbedingungen eingetragen. ....	88
Anhang 8: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte NM7Q für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2. ....	89
Anhang 9: Auftrittszeitpunkt des NM7Q innerhalb des Jahres für Z1, Z2 und Z3 für 20 WETTREG Realisationen (oben) und 2 REMO Realisationen (unten) am Referenzpegel Göttingen. ....	92
Anhang 10: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte maxD für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2. ....	93
Anhang 11: Auftrittszeitpunkt des maxD innerhalb des Jahres für Z1, Z2 und Z3 für 20 WETTREG-Realisationen (oben) und 2 REMO-Realisationen (unten) am Referenzpegel Göttingen. ....	96
Anhang 12: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte maxV für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2. ....	97
Anhang 13: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte sumD für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2. ....	100
Anhang 14: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte sumV für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2. ....	103
Anhang 15: Informationen zu den verwendeten Klimamodelldaten .....	106

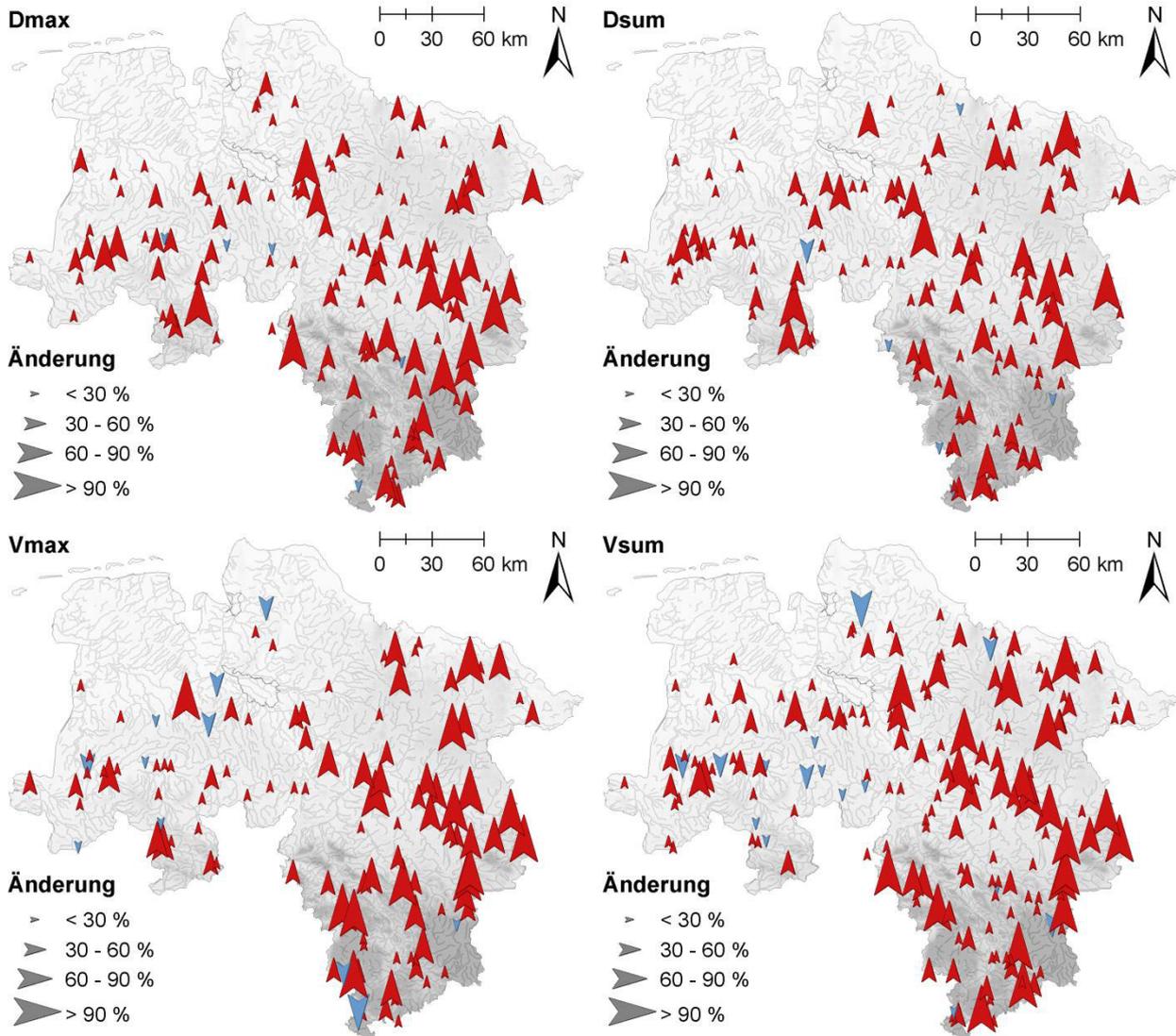
Anhang 1: Räumliche Verteilung der prognostizierten Änderungen der Niedrigwasserindizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall für die nahe Zukunft (2021-2050) gegenüber dem Kontrollzeitraum



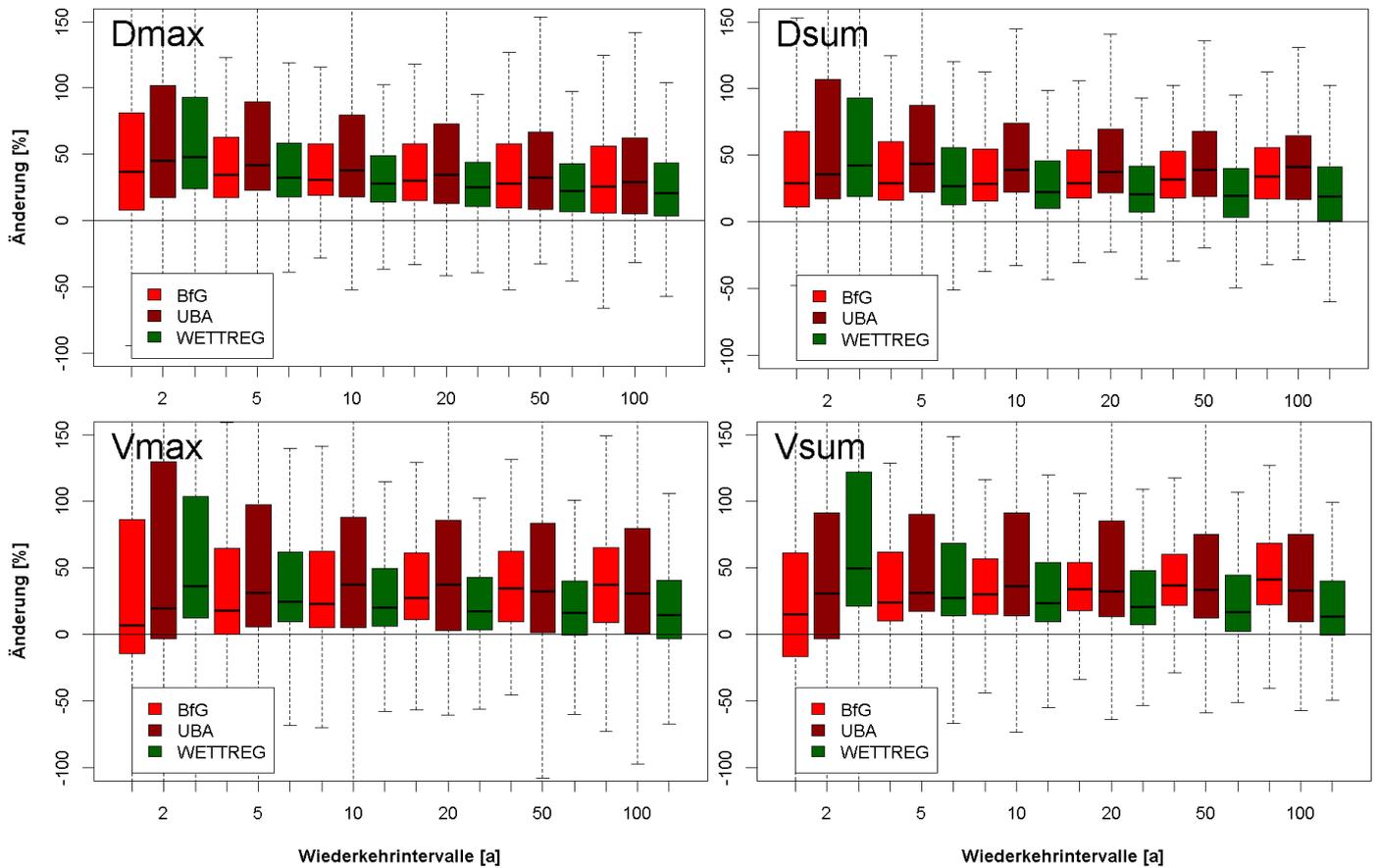
Anhang 2: Prognostizierte Änderungen für die nahe Zukunft (2021-2050) gegenüber dem Kontrollzeitraum für die Niedrigwasserindizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall über alle Stationen. REMO-BfG ist in hellrot, REMO-UBA in dunkelrot und WETTREG in grün dargestellt



Anhang 3: Räumliche Verteilung der prognostizierten Änderungen der Niedrigwasserindizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall für die ferne Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum



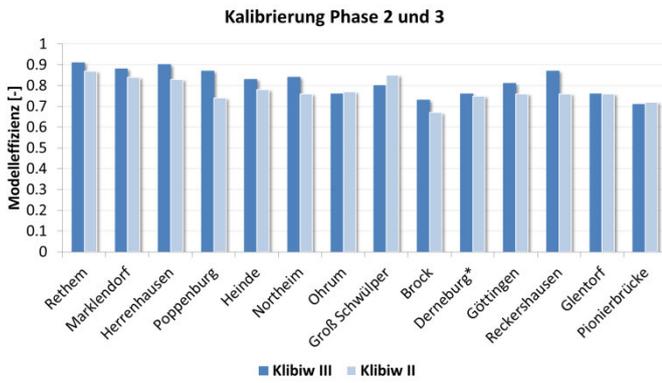
Anhang 4: Prognostizierte Änderungen für die ferne Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum für die Niedrigwasserindizes mit 10-jährlichem Wiederkehrintervall über alle Stationen. REMO-BfG ist in hellrot, REMO-UBA in dunkelrot und WETTREG in grün dargestellt



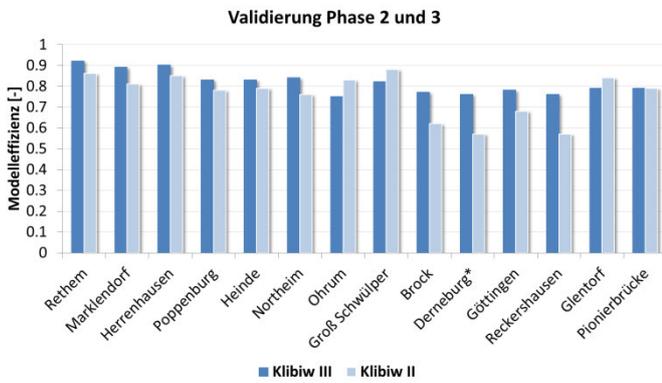
Anhang 5: Gütemaße R, E, E\_log und E\_rel aller Referenzpegel für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode.

Pegelgebiet	Kalibrierung				Validierung			
	E	R	E_log	E_rel	E	R	E_log	E_rel
Rethem	0.91	0.96	0.92	0.95	0.92	0.96	0.91	0.93
Marklendorf	0.88	0.94	0.86	0.87	0.89	0.96	0.80	0.81
Herrenhausen	0.90	0.96	0.91	0.94	0.90	0.96	0.90	0.93
Poppenburg	0.87	0.95	0.88	0.93	0.83	0.93	0.87	0.92
Heinde	0.83	0.93	0.87	0.93	0.83	0.94	0.86	0.91
Northeim	0.84	0.92	0.84	0.91	0.84	0.94	0.80	0.87
Ohrum	0.76	0.88	0.70	0.85	0.75	0.89	0.79	0.87
Groß Schwülper	0.80	0.90	0.76	0.89	0.82	0.93	0.84	0.91
Brock	0.73	0.87	0.66	0.82	0.77	0.90	0.72	0.81
Derneburg*	0.76	0.92	0.85	0.93	0.76	0.92	0.82	0.92
Göttingen	0.81	0.92	0.77	0.90	0.78	0.92	0.74	0.80
Reckershausen	0.87	0.95	0.76	0.86	0.76	0.90	0.72	0.77
Glentorf	0.76	0.88	0.81	0.90	0.79	0.93	0.83	0.90
Pionierbrücke	0.71	0.85	0.78	0.84	0.79	0.93	0.83	0.90
Altenau	0.77	0.89	0.62	0.65	0.77	0.90	0.75	0.63
Harzburg	0.78	0.89	0.79	0.84	0.78	0.90	0.75	0.80
Wunstorf	0.74	0.90	0.46	0.30	0.78	0.92	0.50	0.38
Mittelwerte	0.81	0.91	0.78	0.84	0.81	0.93	0.79	0.83

Anhang 6: Modelleffizienzen aller Referenzpegel für Klibiw Phase 2 (hellblaue Balken) und 3 (dunkelblaue Balken) für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode.

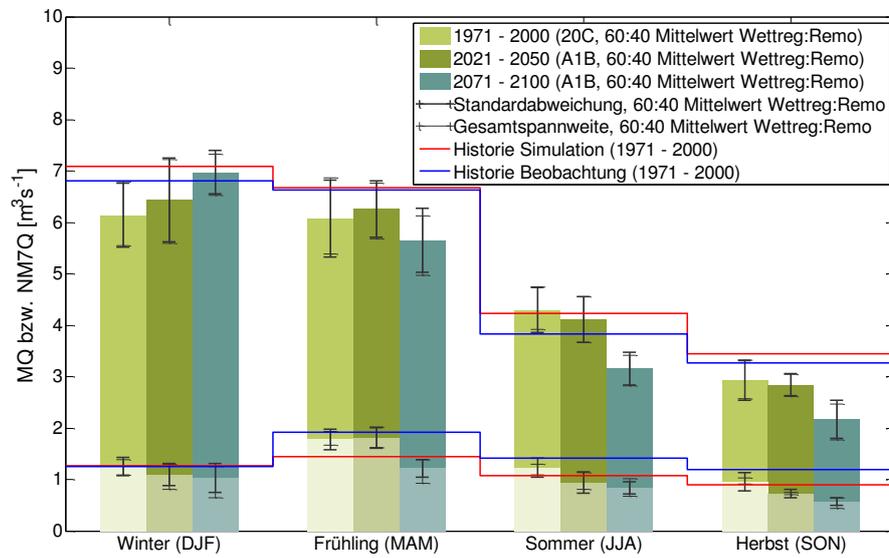


Kalibrierungsperiode



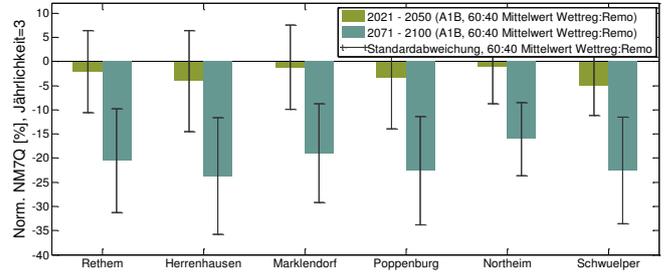
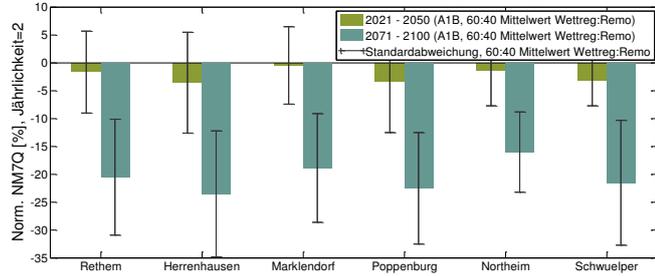
Validierungsperiode.

Anhang 7: Quartalsbezogene mittlere NM7Q und MQ für die Zeitabschnitte Z1, Z2 und Z3 für den Referenzpegel Göttingen. Zusätzlich sind die Beobachtung und die Simulation mit historischen Klimarandbedingungen eingetragen.



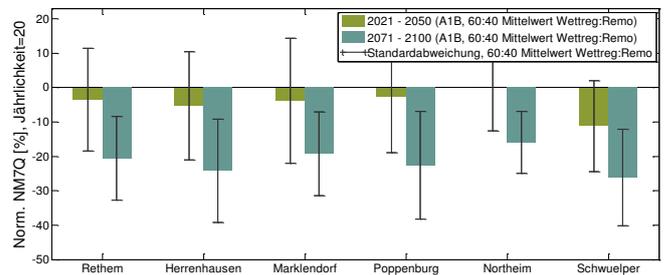
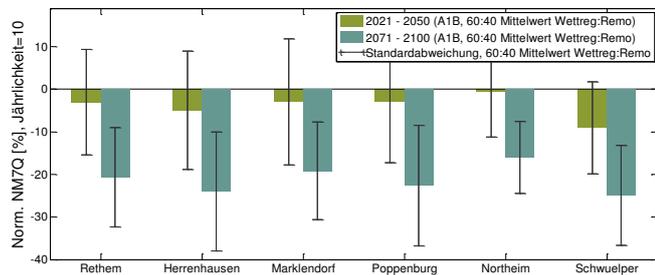
Anhang 8: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte NM7Q für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.

Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim, Groß Schwülper:



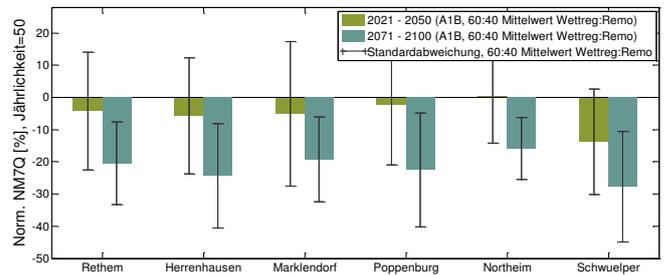
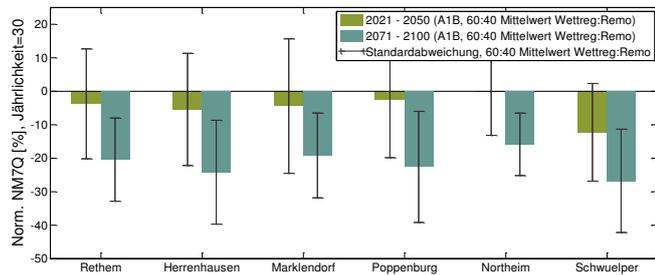
Jährlichkeit = 2

Jährlichkeit = 3



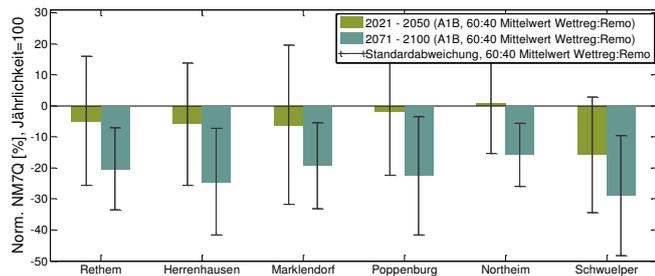
Jährlichkeit = 10

Jährlichkeit = 20



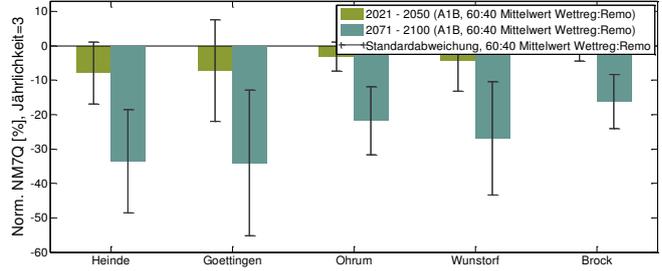
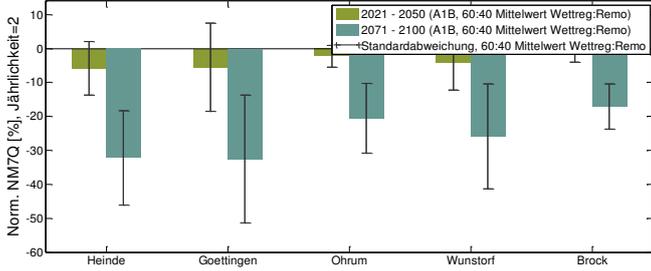
Jährlichkeit = 30

Jährlichkeit = 50

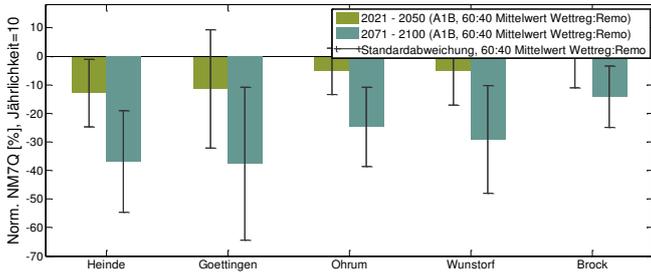


Jährlichkeit = 100

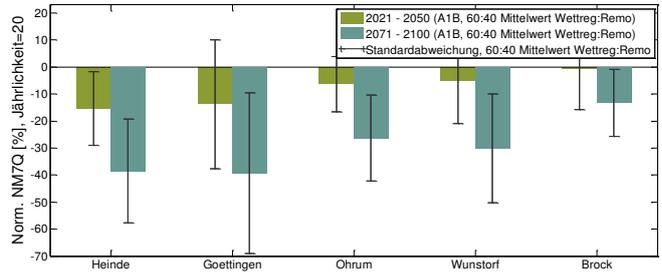
Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf, Brock:



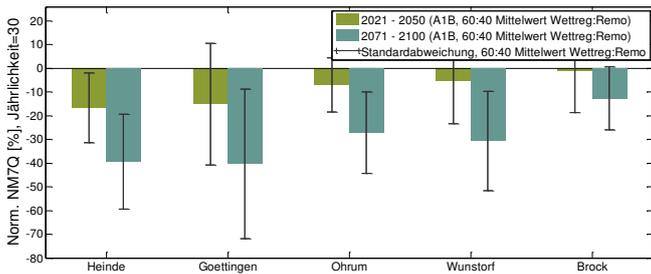
Jährlichkeit = 2



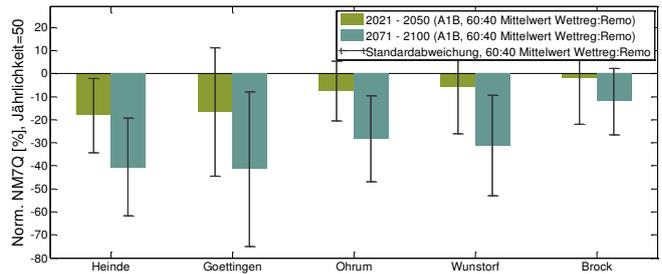
Jährlichkeit = 3



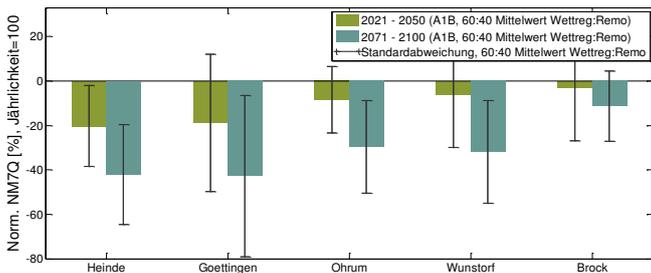
Jährlichkeit = 10



Jährlichkeit = 20



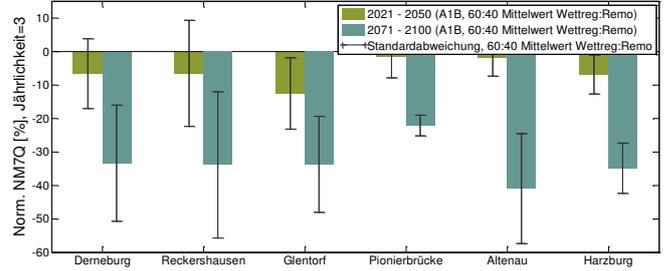
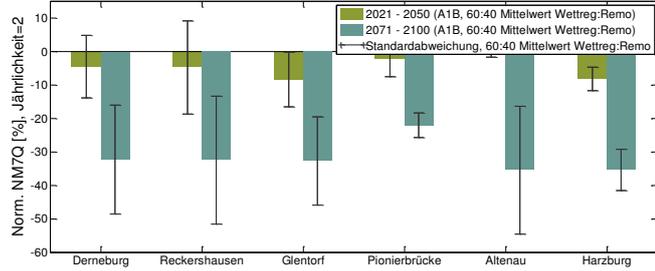
Jährlichkeit = 30



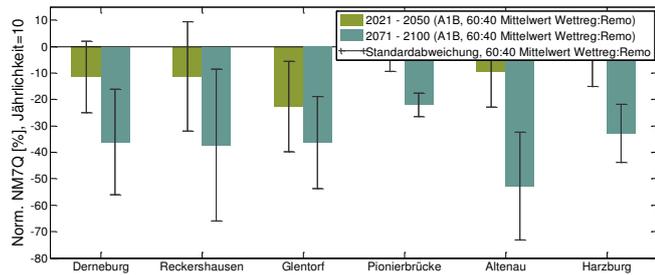
Jährlichkeit = 50

Jährlichkeit = 100

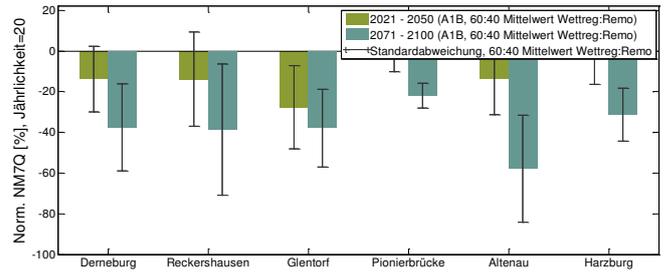
Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau, Harzburg:



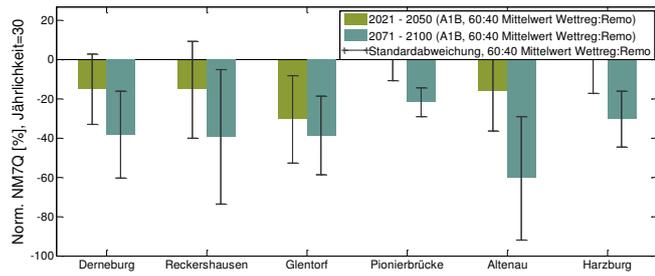
Jährlichkeit = 2



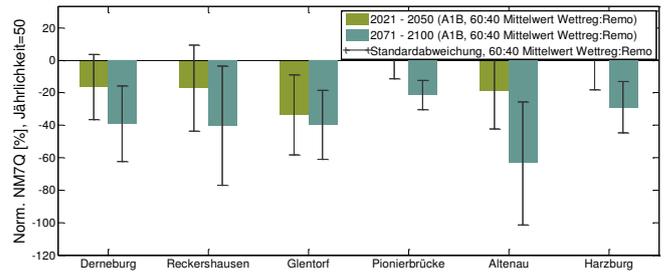
Jährlichkeit = 3



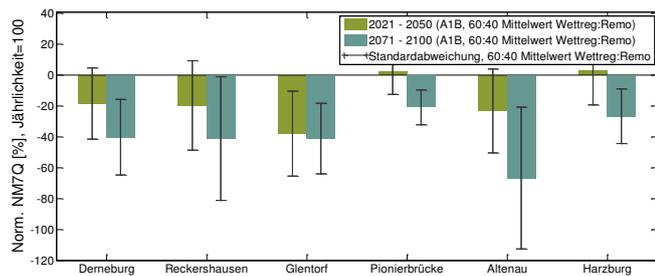
Jährlichkeit = 10



Jährlichkeit = 20



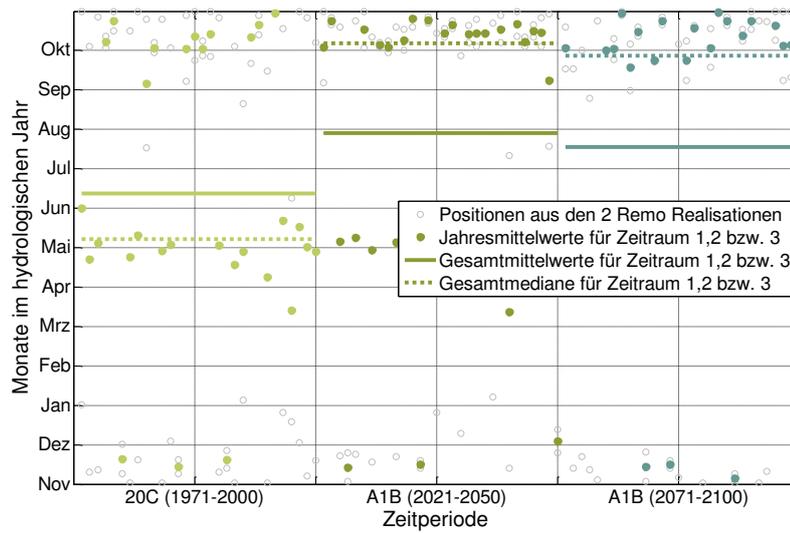
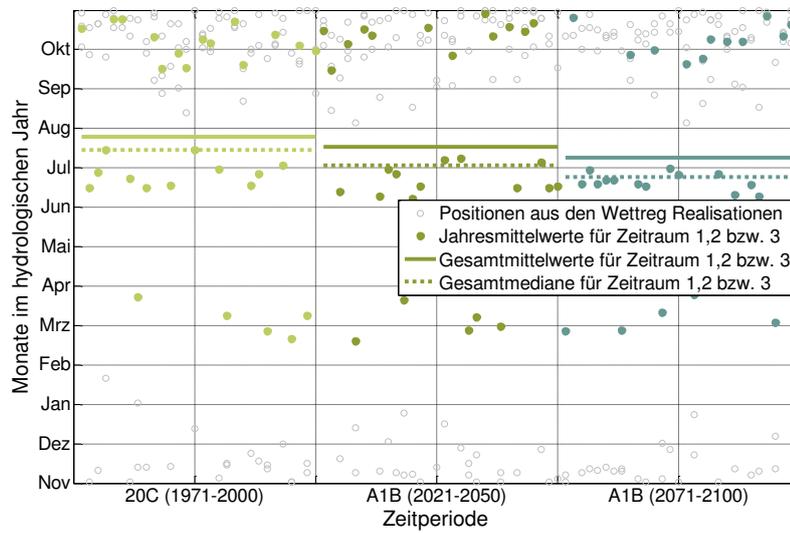
Jährlichkeit = 30



Jährlichkeit = 50

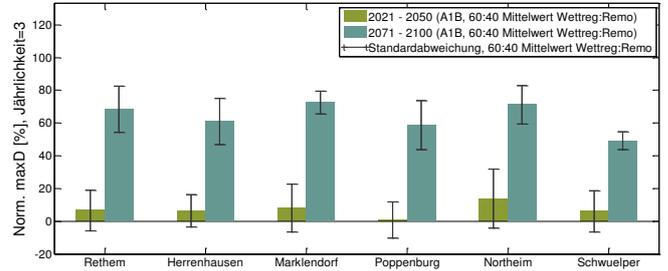
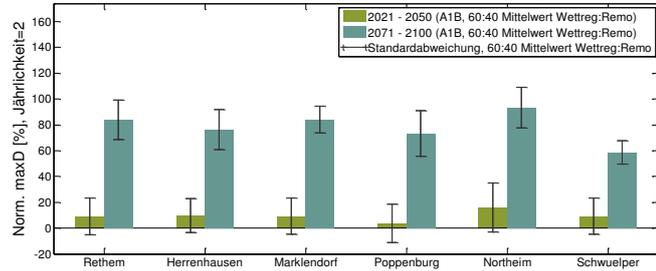
Jährlichkeit = 100

Anhang 9: Auftrittszeitpunkt des NM7Q innerhalb des Jahres für Z1, Z2 und Z3 für 20 WETTREG Realisationen (oben) und 2 RE-MO Realisationen (unten) am Referenzpegel Göttingen.



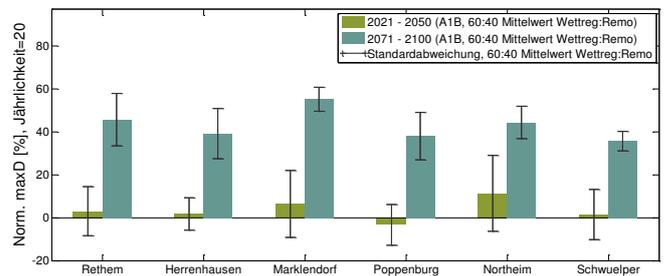
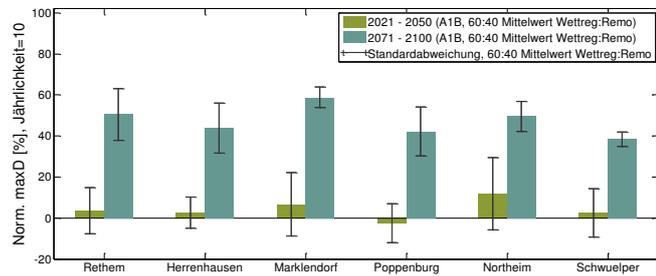
Anhang 10: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte maxD für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.

Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim, Groß Schwülper:



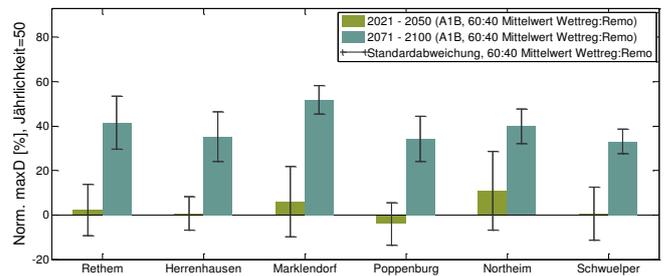
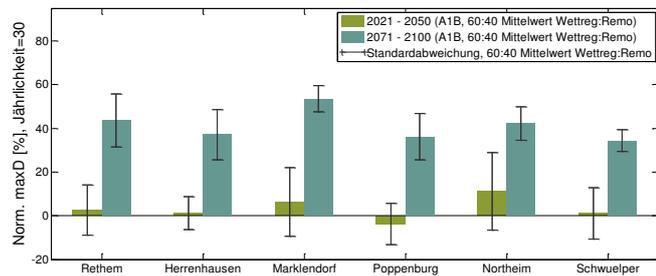
Jährlichkeit = 2

Jährlichkeit = 3



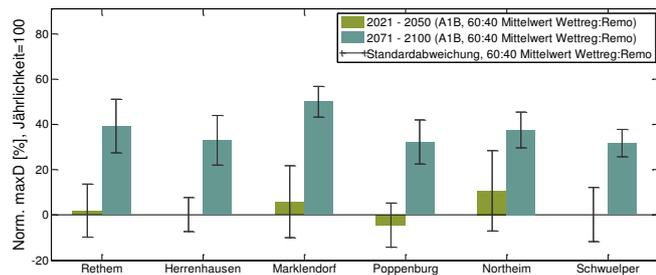
Jährlichkeit = 10

Jährlichkeit = 20



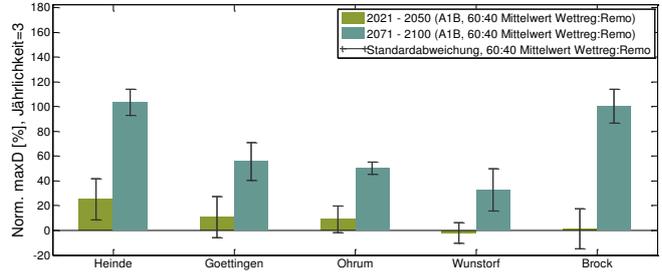
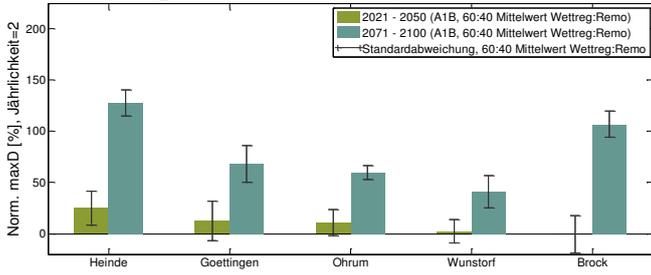
Jährlichkeit = 30

Jährlichkeit = 50

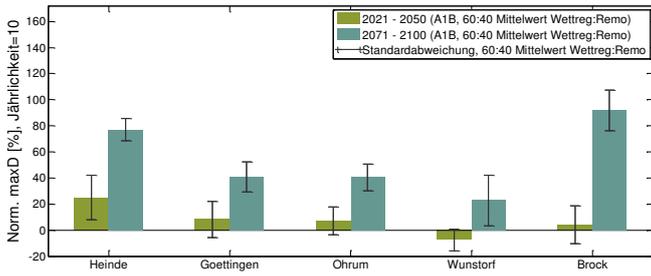


Jährlichkeit = 100

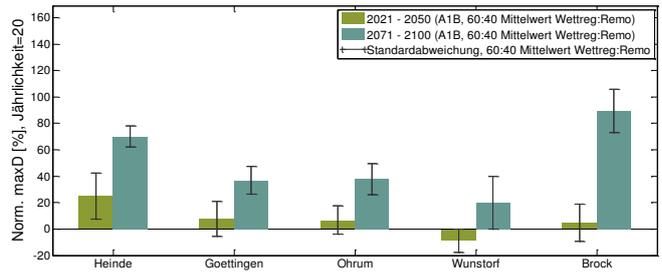
Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf, Brock:



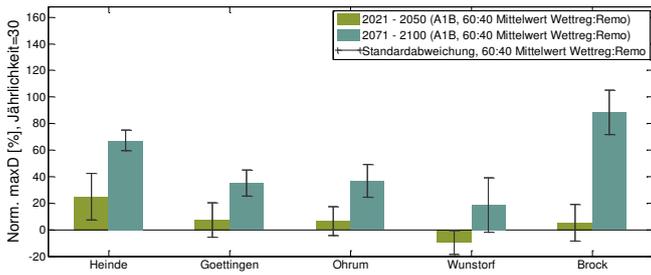
Jährlichkeit = 2



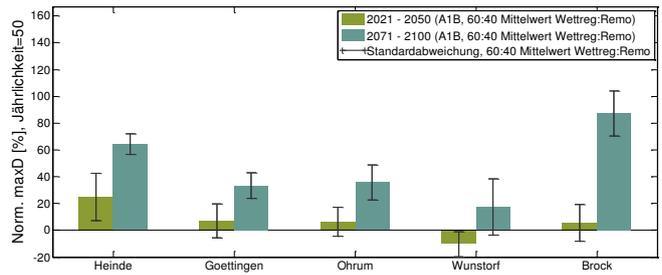
Jährlichkeit = 3



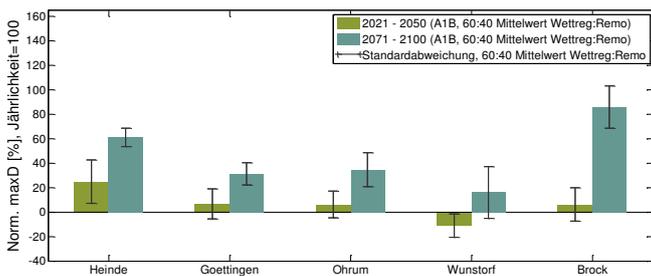
Jährlichkeit = 10



Jährlichkeit = 20



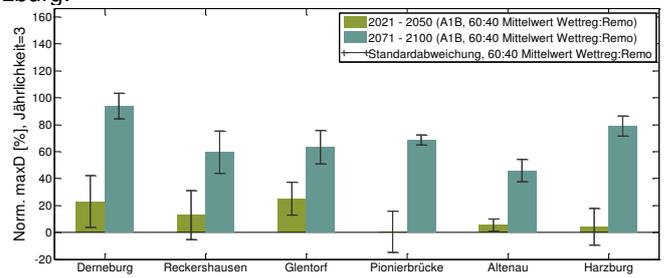
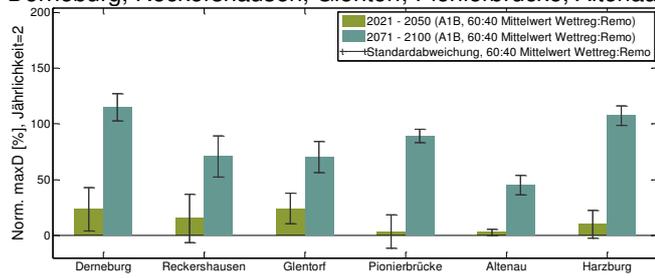
Jährlichkeit = 30



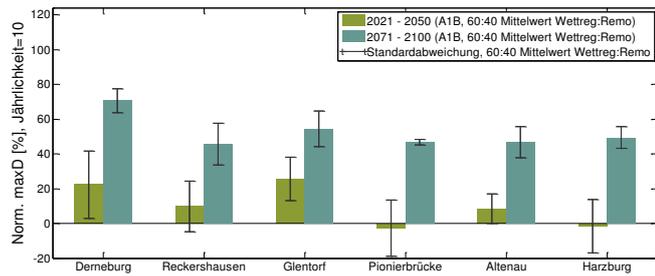
Jährlichkeit = 50

Jährlichkeit = 100

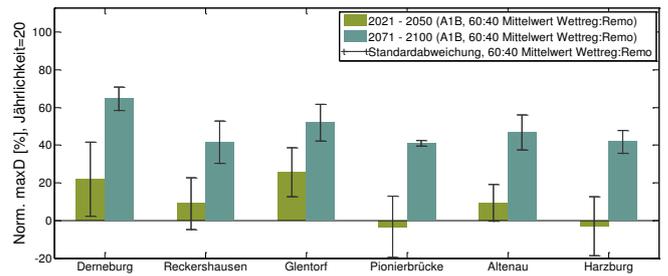
Derneburg, Reckershausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau, Harzburg:



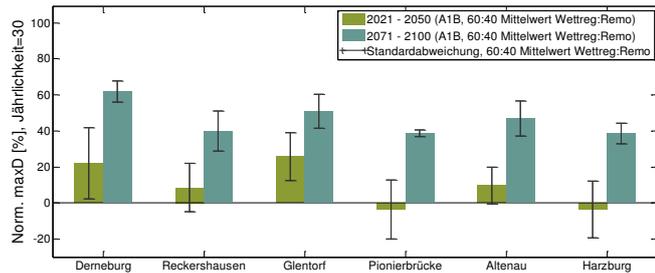
Jährlichkeit = 2



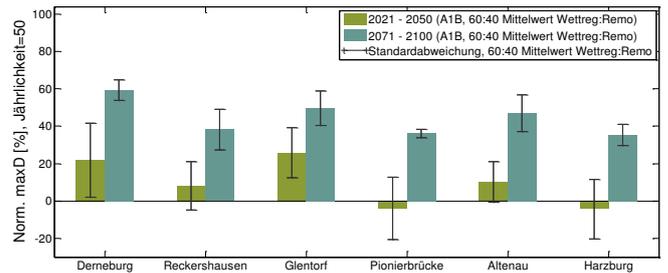
Jährlichkeit = 3



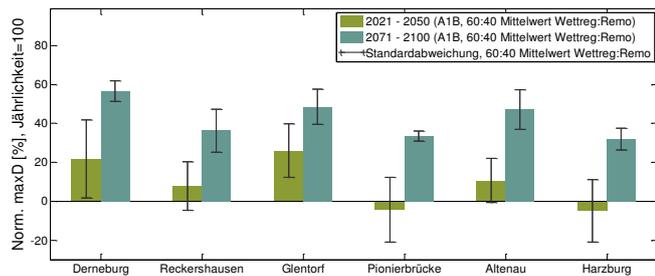
Jährlichkeit = 10



Jährlichkeit = 20



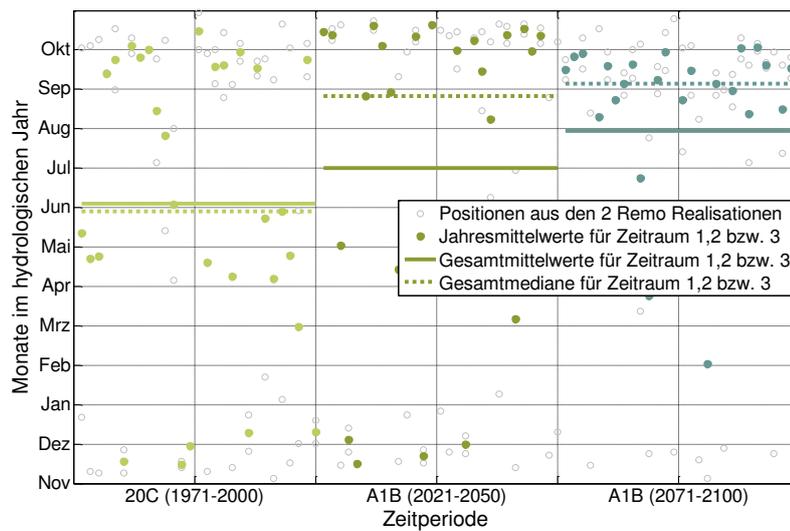
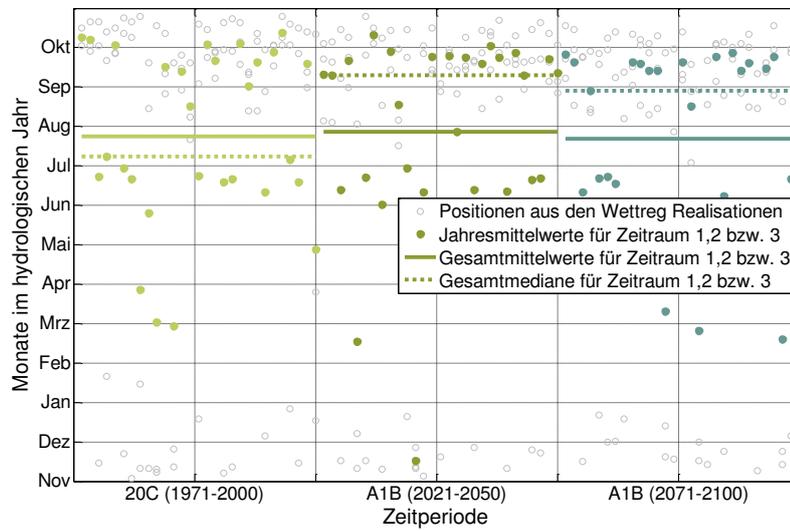
Jährlichkeit = 30



Jährlichkeit = 50

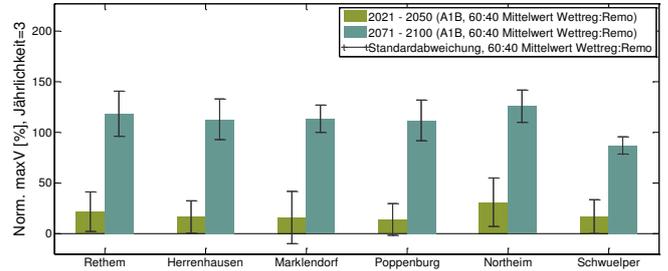
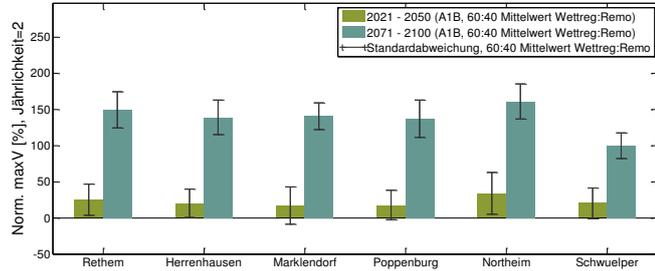
Jährlichkeit = 100

Anhang 11: Auftrittszeitpunkt des maxD innerhalb des Jahres für Z1, Z2 und Z3 für 20 WETTREG-Realisationen (oben) und 2 REMO-Realisationen (unten) am Referenzpegel Göttingen.



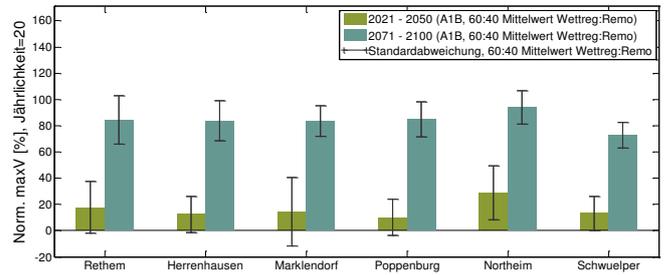
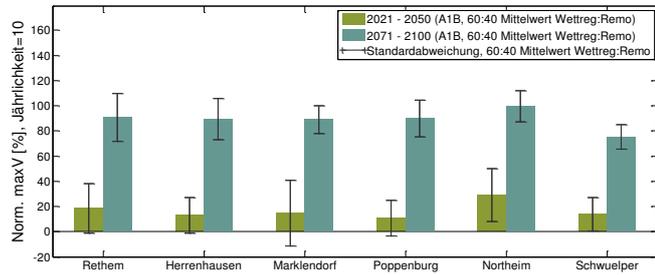
Anhang 12: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte maxV für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.

Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Norheim, Groß Schwülper:



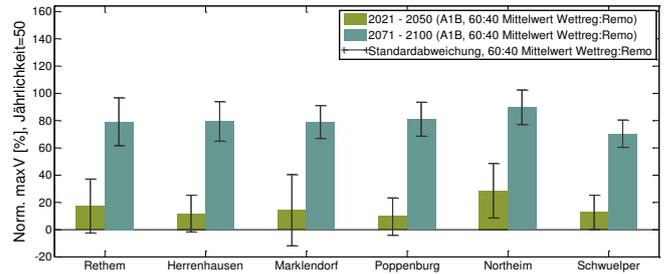
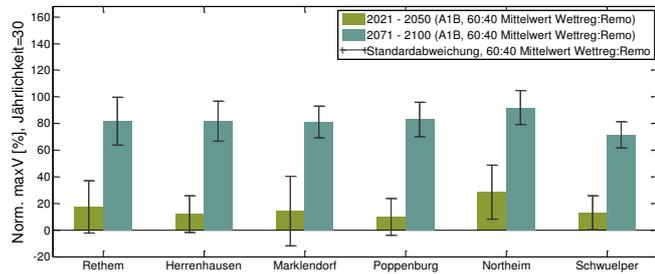
Jährlichkeit = 2

Jährlichkeit = 3



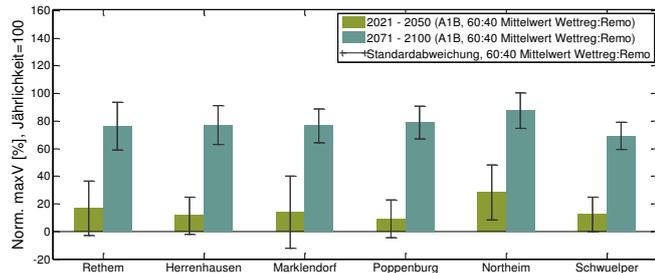
Jährlichkeit = 10

Jährlichkeit = 20



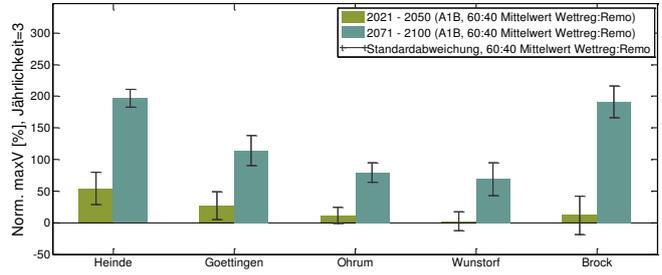
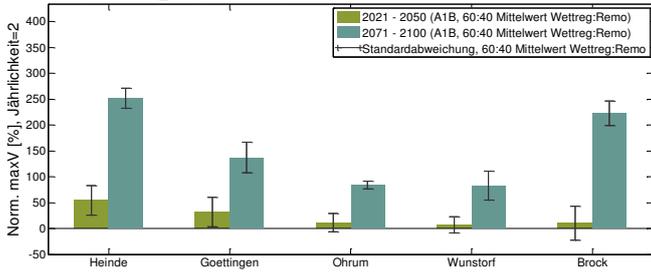
Jährlichkeit = 30

Jährlichkeit = 50

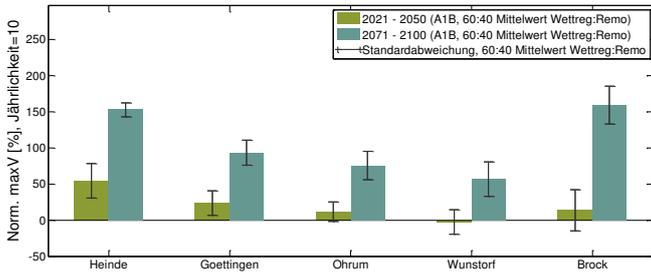


Jährlichkeit = 100

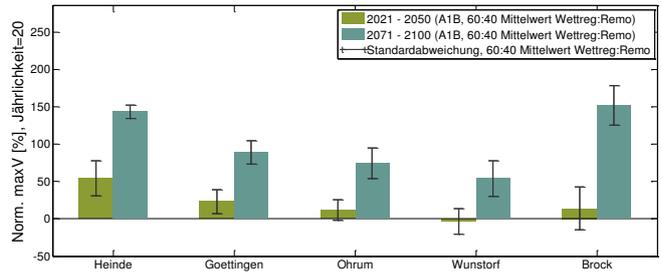
Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf, Brock:



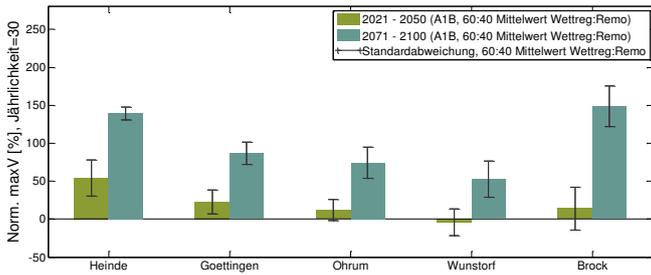
Jährlichkeit = 2



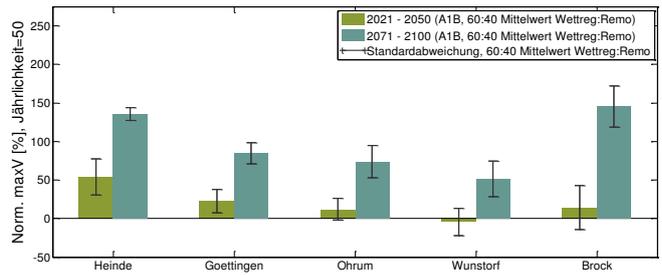
Jährlichkeit = 3



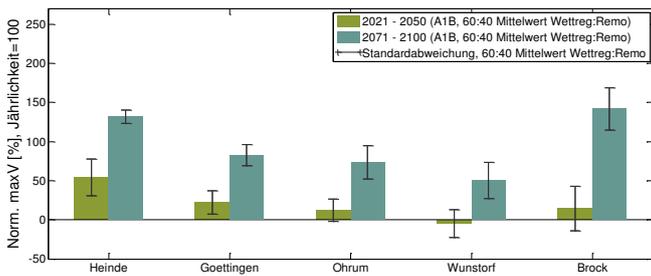
Jährlichkeit = 10



Jährlichkeit = 20



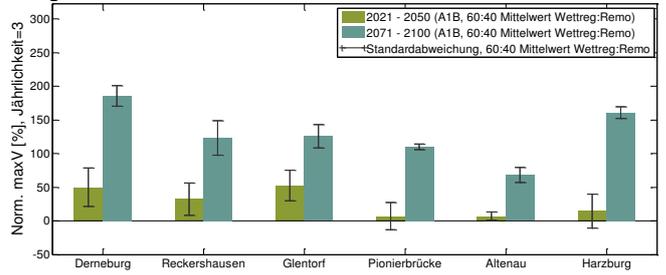
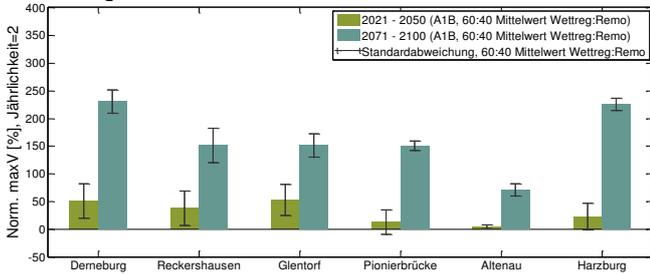
Jährlichkeit = 30



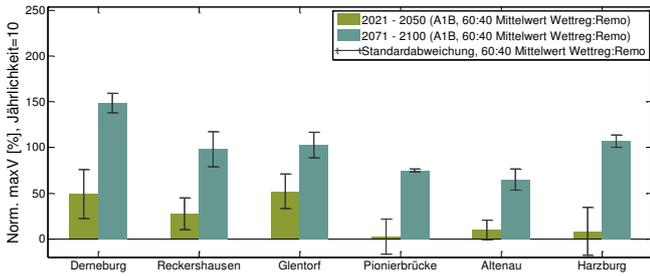
Jährlichkeit = 50

Jährlichkeit = 100

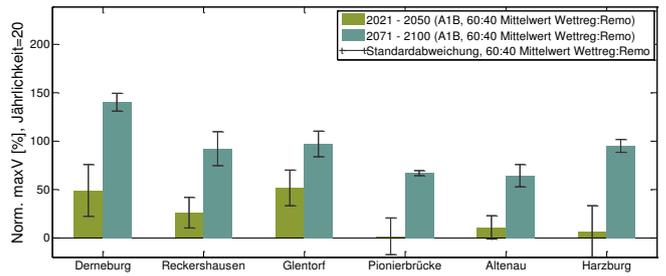
Derneburg, Reckershhausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau, Harzburg:



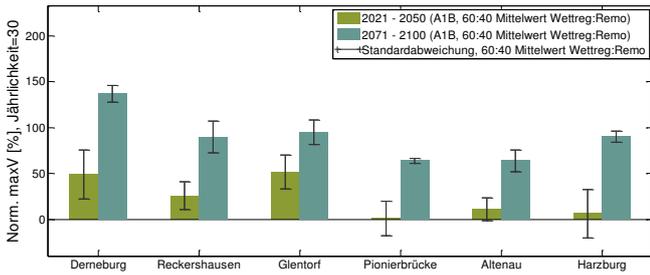
Jährlichkeit = 2



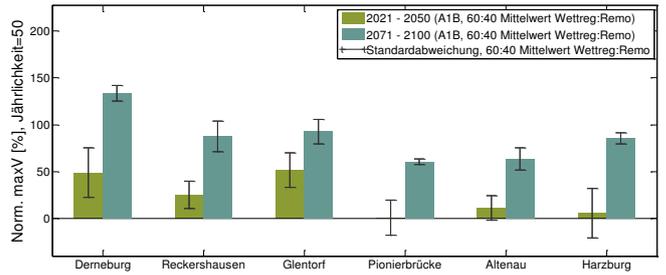
Jährlichkeit = 3



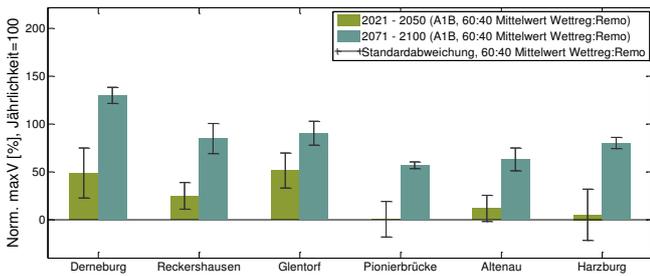
Jährlichkeit = 10



Jährlichkeit = 20



Jährlichkeit = 30

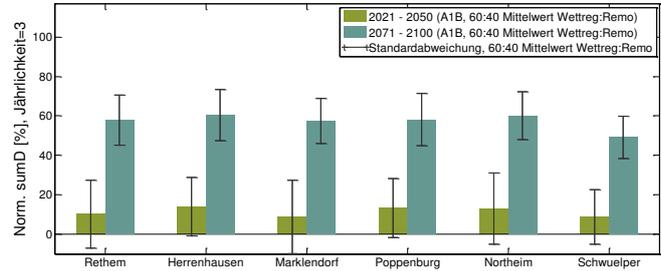
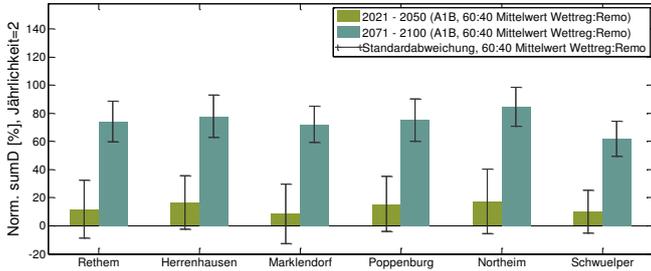


Jährlichkeit = 50

Jährlichkeit = 100

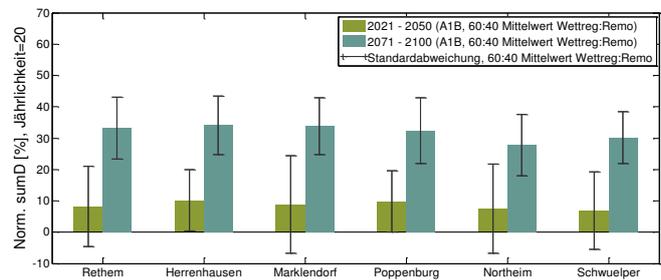
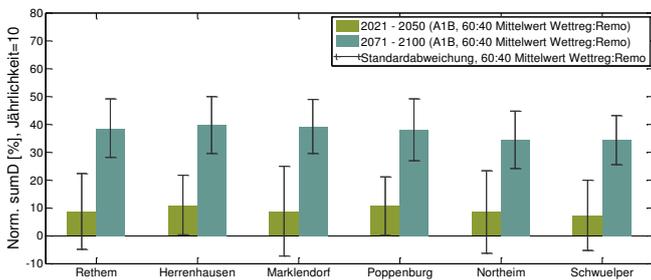
Anhang 13: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte sumD für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.

Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim, Groß Schwülper:



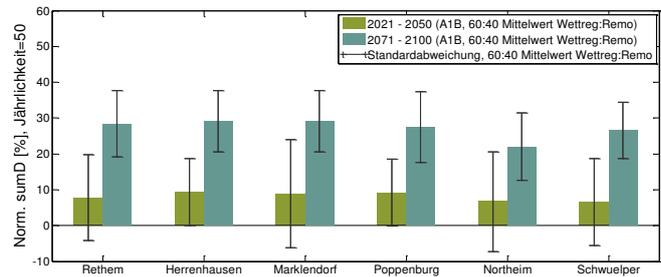
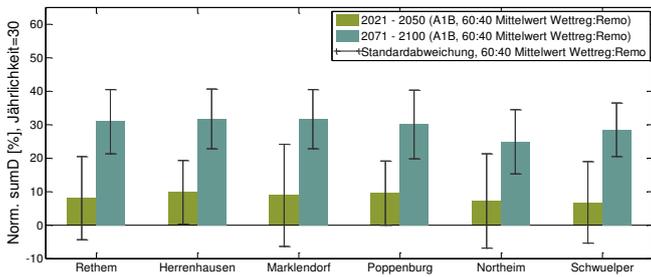
Jährlichkeit = 2

Jährlichkeit = 3



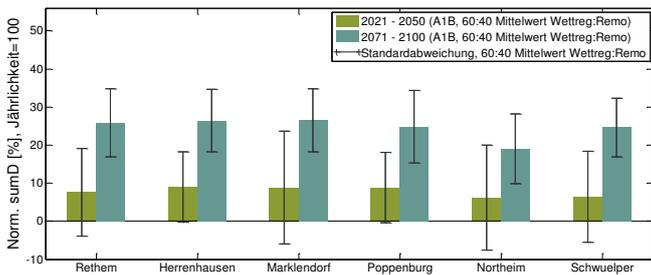
Jährlichkeit = 10

Jährlichkeit = 20



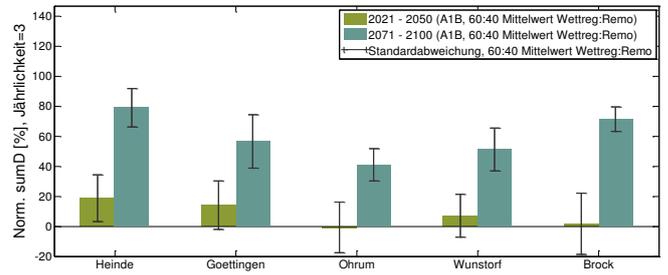
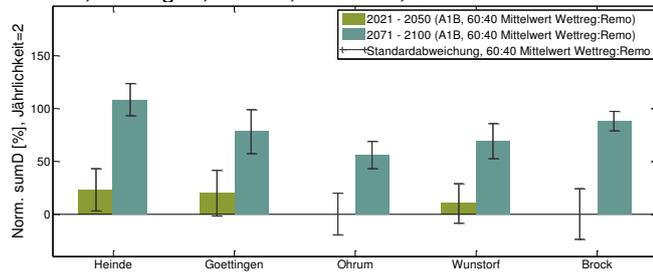
Jährlichkeit = 30

Jährlichkeit = 50

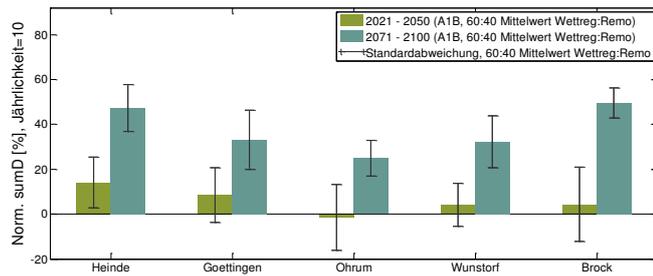


Jährlichkeit = 100

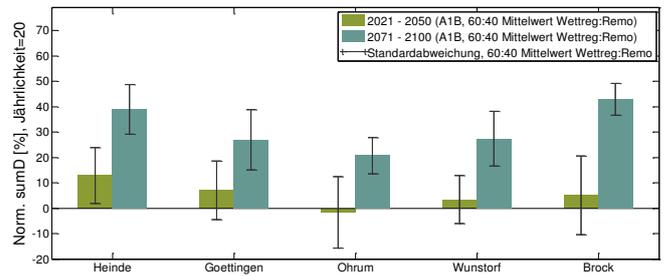
Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf, Brock:



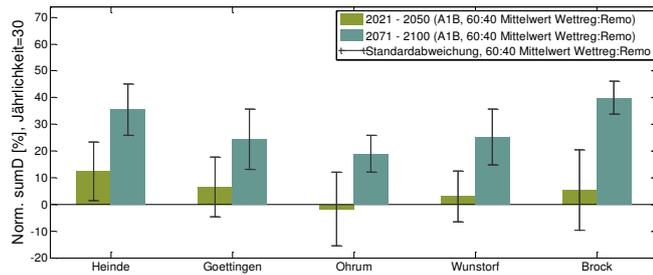
Jährlichkeit = 2



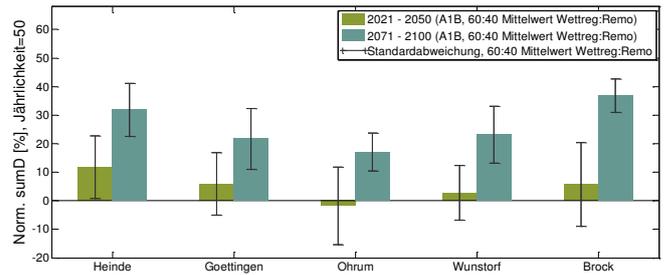
Jährlichkeit = 3



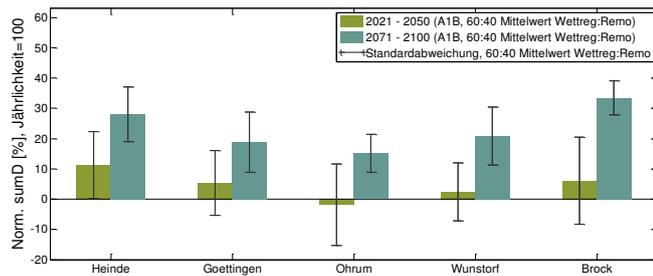
Jährlichkeit = 10



Jährlichkeit = 20



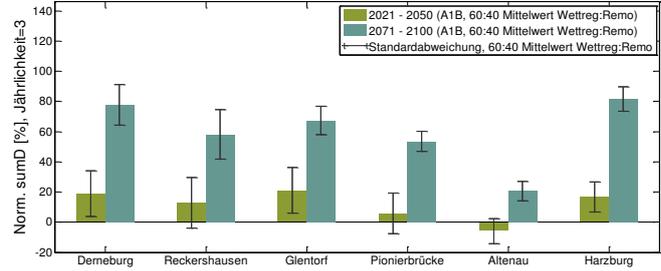
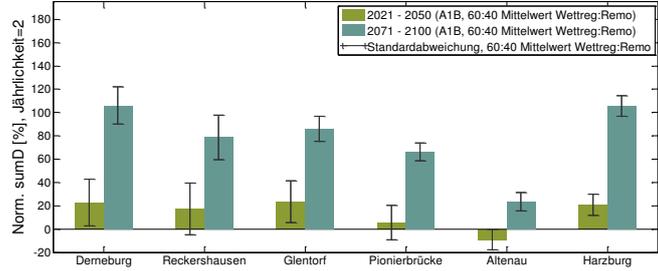
Jährlichkeit = 30



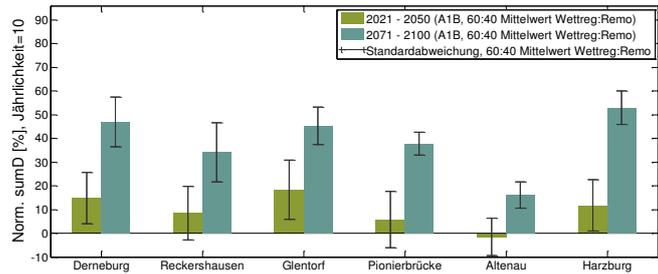
Jährlichkeit = 50

Jährlichkeit = 100

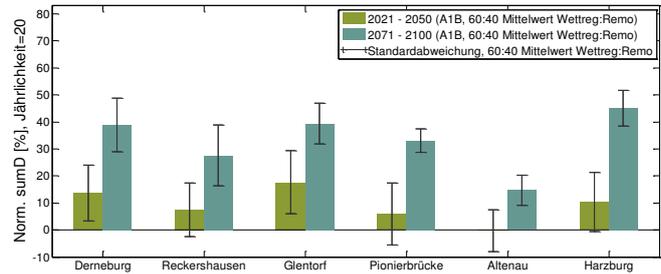
Derneburg, Reckershhausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau, Harzburg:



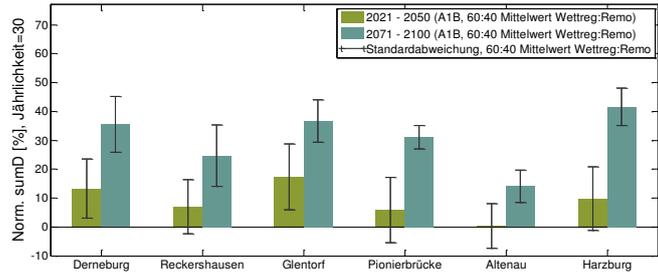
Jährlichkeit = 2



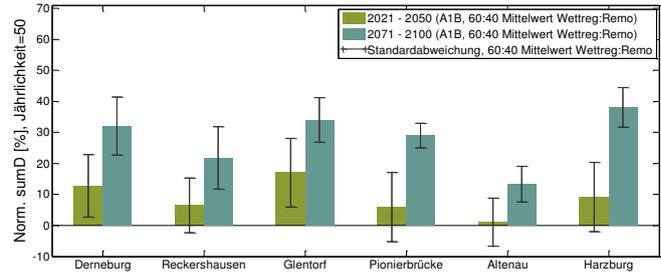
Jährlichkeit = 3



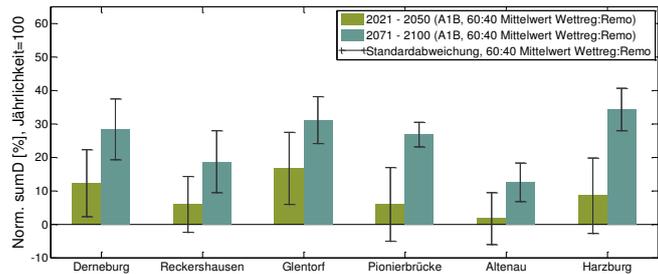
Jährlichkeit = 10



Jährlichkeit = 20



Jährlichkeit = 30

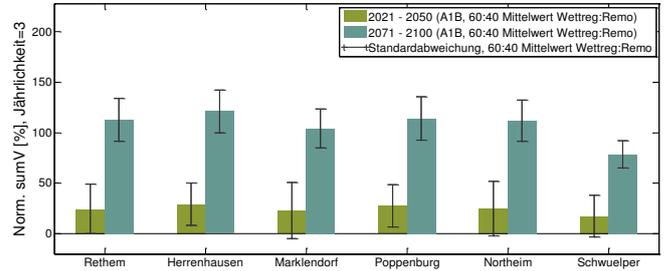
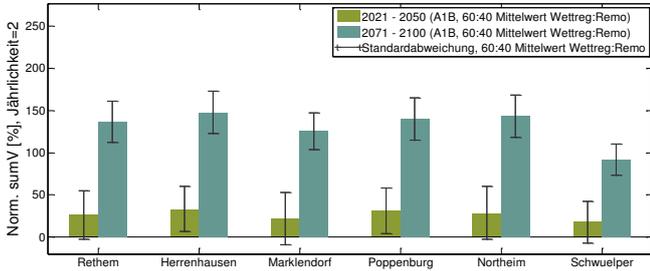


Jährlichkeit = 50

Jährlichkeit = 100

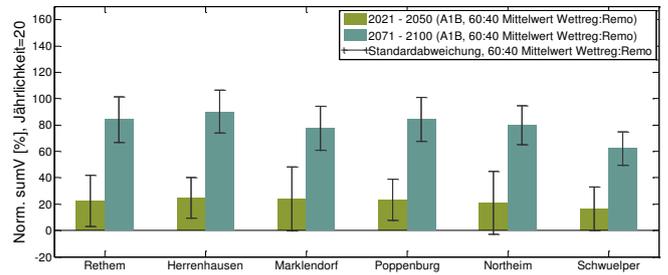
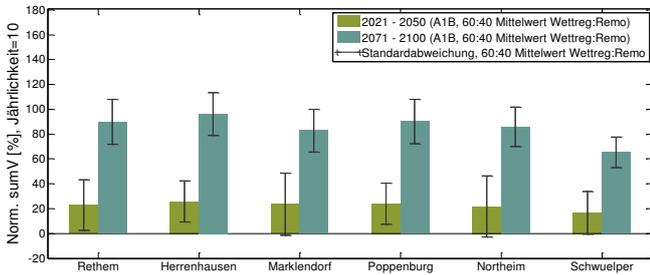
Anhang 14: 2, 3, 10, 20, 30, 50 und 100 jährliche, auf 20C normierte sumV für alle Referenzpegel. Gewicht WETTREG: REMO = 3:2.

Rethem, Herrenhausen, Marklendorf, Poppenburg, Northeim, Groß Schwülper:



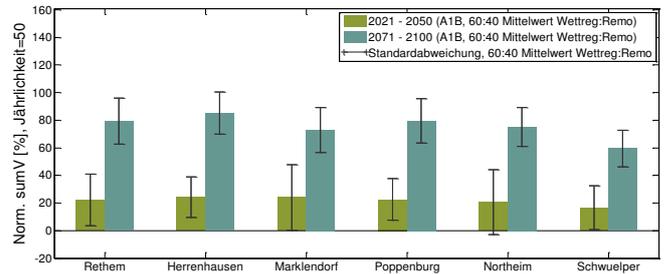
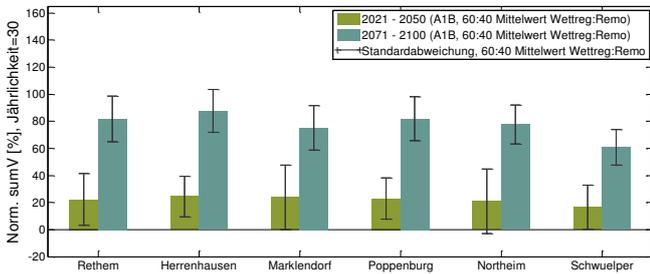
Jährlichkeit = 2

Jährlichkeit = 3



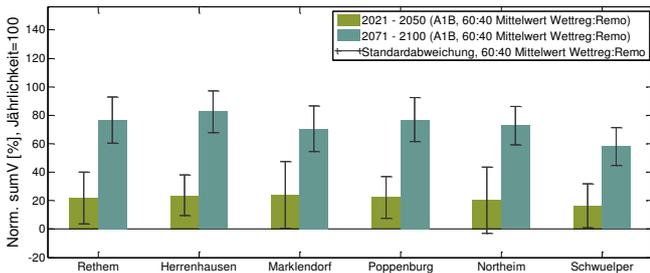
Jährlichkeit = 10

Jährlichkeit = 20



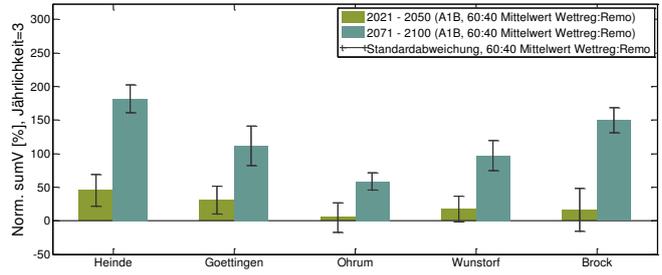
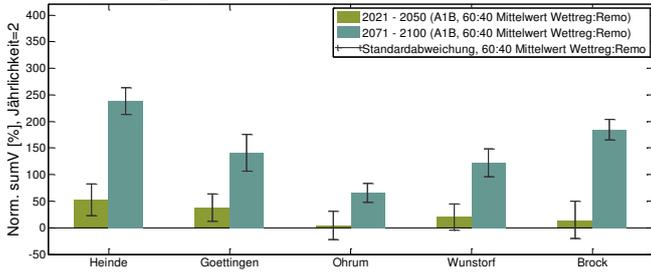
Jährlichkeit = 30

Jährlichkeit = 50

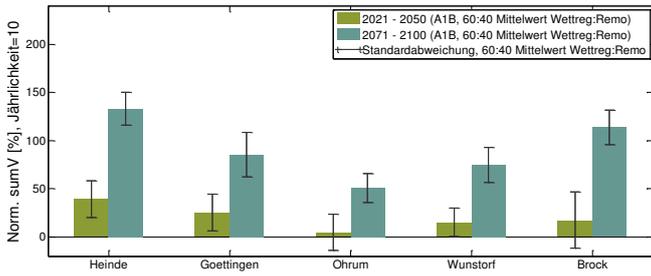


Jährlichkeit = 100

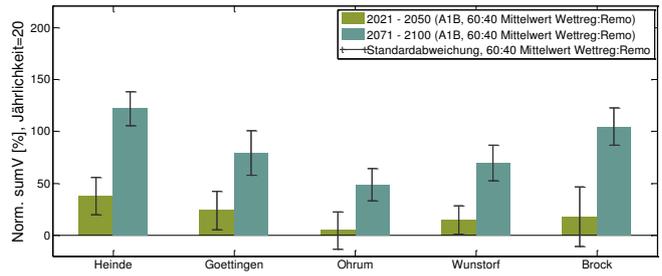
Heinde, Göttingen, Ohrum, Wunstorf, Brock:



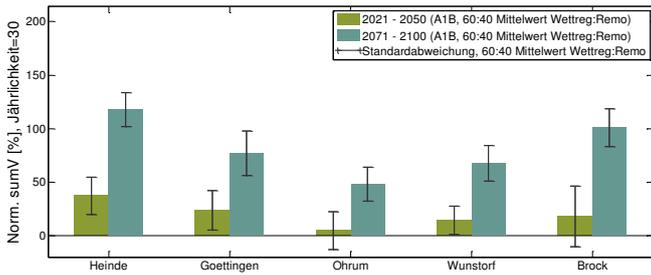
Jährlichkeit = 2



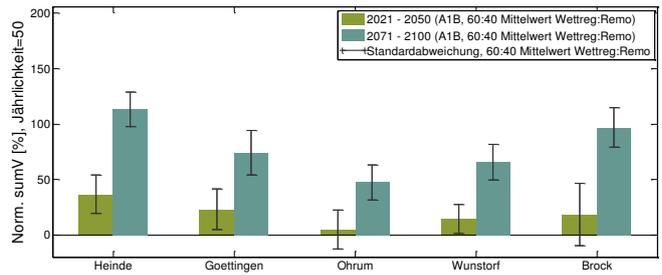
Jährlichkeit = 3



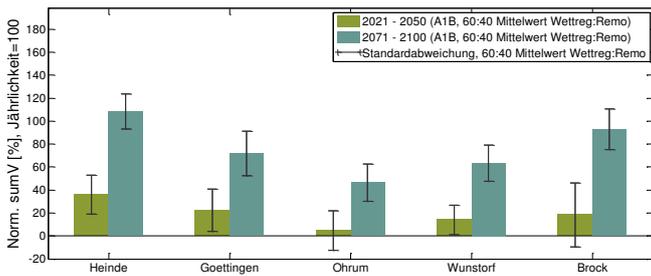
Jährlichkeit = 10



Jährlichkeit = 20



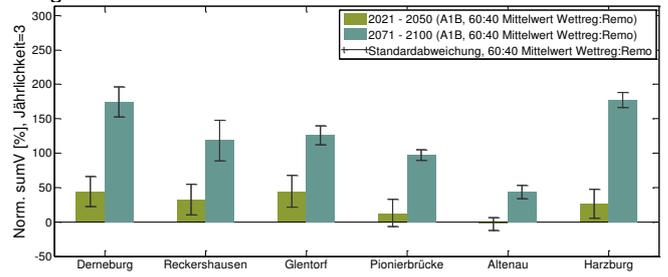
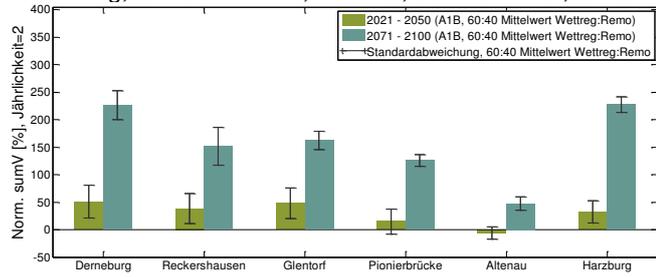
Jährlichkeit = 30



Jährlichkeit = 50

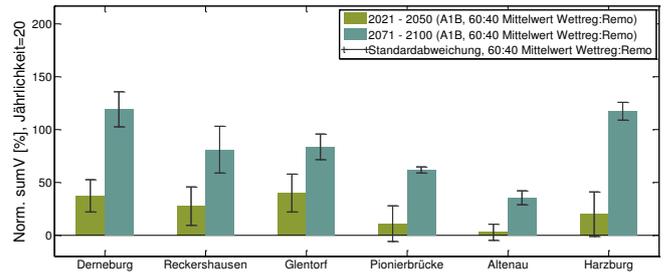
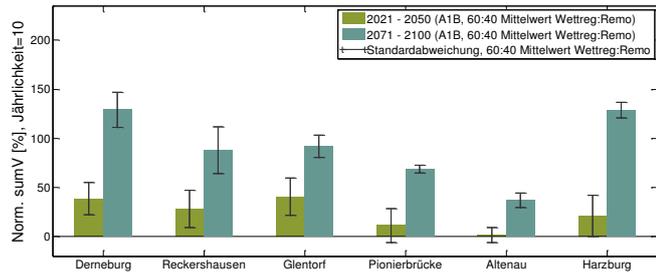
Jährlichkeit = 100

Derneburg, Reckershhausen, Glentorf, Pionierbrücke, Altenau, Harzburg:



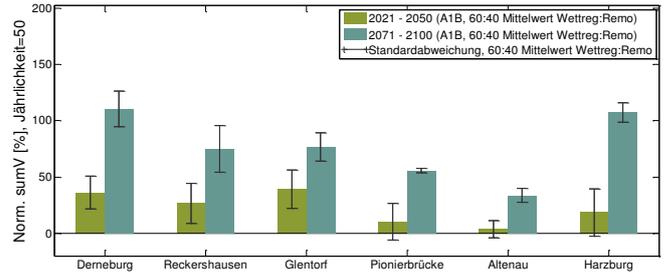
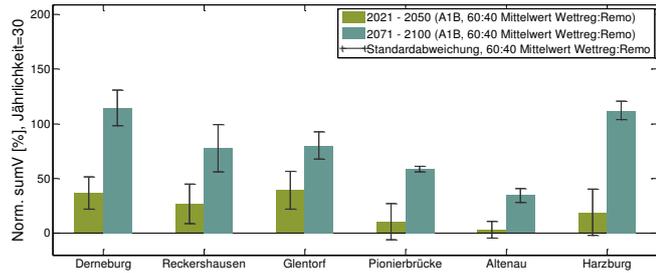
Jährlichkeit = 2

Jährlichkeit = 3



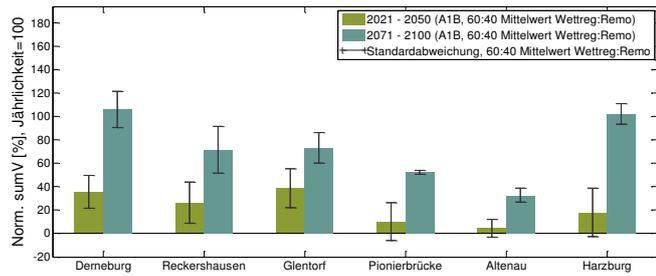
Jährlichkeit = 10

Jährlichkeit = 20



Jährlichkeit = 30

Jährlichkeit = 50



Jährlichkeit = 100

Anhang 15: Informationen zu den verwendeten Klimamodellldaten

	REMO (UBA, BfG)	WETTREG2006	WETTREG2010
Modelltyp	dynamisch	statistisch	statistisch
Antrieb	ECHAM5/MPI-OM (Lauf 1: UBA, Lauf 2: BfG)	ECHAM5/MPI-OM (Lauf 1)	ECHAM5/MPI-OM (Lauf 1)
SRES-Szenario	C20, A1B	C20, A1B	C20, A1B
räumliche Auflösung	0,088° (ca. 10 x 10 km)	Stationen Nds: 157 RR, 34 Klima	Stationen Nds: 309 RR, 38 Klima
zeitliche Auflösung	Stundenwerte	Tageswerte	Tageswerte
Zeitraum	1951 - 2100	1961 - 2100	1961-2100