



Globaler Klimawandel

Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung
für das Binnenland



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 1 + 2



Niedersachsen

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, Marvin Bertram, Markus Anhalt, Silke Schmidtke

Leibniz Universität Hannover,
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau:
Uwe Haberlandt, Hannes Müller, Sven van der Heijden, Christian Berndt, Alexander Verworn, Markus Wallner,
Aslan Belli, Jörg Dietrich

Technische Universität Braunschweig,
Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz:
Günter Meon, Kristian Förster, Marlene Gelleszun, Gerhard Riedel

Harzwasserwerke GmbH:
Andreas Lange, Frank Eggelsmann

1. Auflage: August 2012, 200 Stück

Bezug:
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz
An der Scharlake 39
31135 Hildesheim
www.nlwkn.niedersachsen.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Stand der Klimaforschung	7
2	Projektgrundlagen	10
2.1	Zielsetzung	10
2.2	Organisation	10
2.3	Untersuchungsgebiet	14
2.4	Datenbasis und Datenmanagement	15
3	Analyse und Aufbereitung von Klimadaten	18
3.1	Trends in beobachteten Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag	18
3.1.1	Datenbasis	18
3.1.2	Methodik	18
3.1.3	Ergebnisse der Trenduntersuchung - Temperatur	20
3.1.4	Ergebnisse der Trenduntersuchung - Niederschlag	22
3.1.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	25
3.2	Auswertung von Klimamodellszenarien	25
3.3	Validierung von Klimamodelldaten	28
3.3.1	Methoden	28
3.3.2	Ergebnisse	30
3.4	Regionalisierung von Klimadaten	34
3.4.1	Einleitung und Ziel	34
3.4.2	Methodik	34
3.4.2.1	Allgemeines	34
3.4.2.2	Interpolation und Validierung	35
3.4.3	Interpolation der Beobachtungsdaten	35
3.4.4	Interpolation der WETTREG-Szenarien	38
3.4.5	Interpolation der REMO-Szenarien	40
3.5	Disaggregation von Niederschlägen	41
3.5.1	Einleitung und Ziel	41
3.5.2	Daten	41
3.5.3	Methodik	43
3.5.3.1	Untersuchte Disaggregierungs-varianten	43
3.5.3.2	Validierung des Kaskadenmodells mittels beobachteter Niederschläge	44
3.5.3.3	Validierung anhand von N-A-Modellierung	46
3.5.4	Schlussfolgerungen und Verfahrensauswahl	50
3.5.5	Datenbereitstellung	50
4	Analyse der gegenwärtigen Hochwasserverhältnisse	52
4.1	Trends in beobachteten Abflusszeitreihen in Niedersachsen	52
4.1.1	Datenbasis	52
4.1.2	Methodik	52
4.1.3	Datenprüfung	53
4.1.4	Ergebnisse der Trenduntersuchung	53
4.1.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	55
4.2	Westharz	55

5	Zukünftige Entwicklung von Wasserhaushalt und Hochwasser	57
5.1	Überblick	57
5.2	Hydrologische Modellierung mit dem Modell PANTA RHEI	58
5.2.1	Allgemeine Beschreibung	58
5.2.2	Bausteine des Modells	58
5.2.3	Hydrologische Teilprozesse	58
5.3	Modellerstellung	60
5.3.1	Aufbau des Gesamtmodells	60
5.3.2	Aufbau der Detailgebiete	63
5.4	Kalibrierung und Validierung	64
5.4.1	Kalibrierung des Gesamtmodells der Aller bis zum Pegel Rethem	64
5.4.2	Kalibrierung der Detailgebiete	68
5.5	Simulationen mit Klimamodelldaten	69
5.5.1	Auswertung der Kontrollläufe in Hinblick auf den Wasserhaushalt	70
5.5.2	Auswertung der Kontrollläufe unter Berücksichtigung von Hochwasserkenngößen	74
5.5.3	Auswertung der Kontrollläufe für die Detailgebiete	75
5.5.4	Auswertung der Zukunftsszenarien in Hinblick auf den Wasserhaushalt	76
5.5.5	Hochwasserstatistische Auswertungen der Zukunftsszenarien	80
5.6	Zusammenfassung	86
5.7	Risikobewertung unter Klimawandelbedingungen	87
6	Information und Kommunikation	88
6.1	Ergebnistransfer	88
6.2	Informationsplattform	88
6.3	Erkenntnisse für die fachliche Praxis	89
6.4	Handlungsempfehlungen	90
7	Zusammenfassung	92
8	Ausblick	94
9	Literatur	95
Anhang	100

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Emissionsszenarien als Antrieb der Klimamodelle (aus wiki.bildungsserver.de nach IPCC, 2000)	8
Abbildung 2-1:	Teilprojekte und Projektbearbeiter in KliBiW	11
Abbildung 2-2:	Ablaufschema der einzelnen Arbeitsschritte in KliBiW	13
Abbildung 2-3:	Niedersachsen, Untersuchungsgebiet für das Teilprojekt „Klimaentwicklung“	14
Abbildung 2-4:	Einzugsgebiet von Aller und Leine sowie Harz, Untersuchungsgebiet der Teilprojekte „Wasserhaushalt“ bzw. „Hochwasser“	14
Abbildung 2-5:	Aufbau der Datenstruktur sowie der Datenhaltung auf dem FTP-Server	17
Abbildung 3-1:	Untersuchungsgebiet mit allen Niederschlags- und Klimastationen (links) und mit den verwendeten Niederschlags- und Temperaturstationen (rechts)Tabelle 3-1: Indizes für Tageswerte für Niederschlag, Temperatur.....	18
Abbildung 3-2:	Signifikanz und Richtung von Trends der Temperaturindizes (Richtung der Balken kennzeichnet Richtung des Trends; ausgefüllter Balken kennzeichnet Anteil signifikanter Trends)	21
Abbildung 3-3:	Räumliche Verteilung der Trends für das 90% Quantil des Tagesmaximums der Temperatur im Winter (Kreise = positive Trends, Dreiecke = negative Trends, ausgefüllte Symbole = signifikante Trends, Größe der Symbole zeigt Stärke der Trends).....	21
Abbildung 3-4:	Trendgeraden der Minimaltemperatur tnq_{10} im Winter (links) und der Maximaltemperatur txq_{90} im Sommer (rechts) gemittelt über alle Stationen	22
Abbildung 3-5:	Anzahl, Signifikanz und Richtung von Trends der Niederschlagsindizes (Richtung der Balken kennzeichnet Richtung des Trends; ausgefüllte Balken kennzeichnen Anteil signifikanter Trends)	23
Abbildung 3-6:	Räumliche Verteilung der Trends für das 90%-Quantil des täglichen Niederschlages im Winter (rechts) und die Trockendauer im Sommer (links) (Kreise = positive Trends, Dreiecke = negative Trends, ausgefüllte Symbole = signifikante Trends, Größe der Symbole zeigt Stärke der Trends).....	23
Abbildung 3-7:	Trendgeraden des Niederschlagsanteils für Ereignisse größer als das Langzeit- 90%-Quantil des täglichen Niederschlages pfl_{90} im Winter (links) und der Trockendauer $pxcdd$ im Sommer (rechts) gemittelt über alle Stationen	24
Abbildung 3-8:	Änderungssignal der Mittleren Temperatur in der fernen Zukunft für Nds im Sommer	26
Abbildung 3-9:	Änderungssignal der Mittleren Temperatur in der fernen Zukunft für Nds im Winter	26
Abbildung 3-10:	Änderungssignal der Niederschläge in der fernen Zukunft für Nds im Sommer	27
Abbildung 3-11:	Änderungssignal der Niederschläge in der fernen Zukunft für Nds im Winter	27
Abbildung 3-12:	Box-Whisker-Plot der über alle Teilgebiete gemittelten Änderungen der Extremniederschläge (Tageswert) verschiedener Jährlichkeiten für 2021/2050 gegenüber 1971/2000	28
Abbildung 3-13:	Box-Whisker-Plot der über alle Teilgebiete gemittelten Änderungen der Extremniederschläge (Tageswert) verschiedener Jährlichkeiten für 2071/2100 gegenüber 1971/2000	28
Abbildung 3-14:	Übersicht über die Teilgebiete der Validierung	29
Abbildung 3-15:	Nach Größe sortierte Jahresmitteltemperaturen für das Teilgebiet Aller-Leine.....	30
Abbildung 3-16:	Nach Größe sortierte Jahresniederschlagssummen für das Teilgebiet Aller-Leine	30
Abbildung 3-17:	Nach Größe sortierte Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge für das Teilgebiet Aller-Leine	30
Abbildung 3-18:	Nach Größe sortierte max. Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage ($N < 0,1\text{mm}$) für das Teilgebiet Aller-Leine.....	30
Abbildung 3-19:	qualitative Bewertung der Modellgüte von WETTREG2006, REMO-UBA und REMO-BfG anhand von Beobachtungsdaten für den C20-Zeitraum (1971 – 2000)	33
Abbildung 3-20:	qualitative Bewertung der Modellgüte von WETTREG2006 und WETTREG2010 anhand von Beobachtungsdaten für den C20-Zeitraum (1971 – 2000)	33
Abbildung 3-21:	Für die Interpolation der Beobachtungsdaten verwendete Niederschlags- und Klimastationen in Niedersachsen	36
Abbildung 3-22:	Kreuzvalidierung der Interpolationsverfahren unter Angabe des Nash-Sutcliffe-Effizienz-Kriteriums für den Zeitraum von 1981 bis 1985	36
Abbildung 3-23:	Mit der Varianz normierte und über den Gesamtzeitraum gemittelte experimentelle und theoretische Variogramme für die Interpolation der Beobachtungsdaten.....	37

Abbildung 3-24:	Räumliche Verteilung der interpolierten Klimavariablen pcp und tav für Niedersachsen, aggregiert aus täglichen Rasterkarten für die Jahre 1971-2000 (pcp in mm/a; tav in °C).....	37
Abbildung 3-25:	Scatterplot zum Vergleich von Interpolation und Messung für Niederschlag an der Station Göttingen, im Zeitraum 1951-1960	37
Abbildung 3-26:	WETTREG2006-Stationen - Niederschlag	38
Abbildung 3-27:	WETTREG2006-Stationen - weitere Klimavariablen	38
Abbildung 3-28:	Mit der Varianz normierte und über den Gesamtzeitraum gemittelte experimentelle und theoretische Variogramme für die Interpolation der WETTREG-Daten (20C); links: Niederschlag, rechts: Temperatur.....	38
Abbildung 3-29:	Ergebnisse der Kreuzvalidierung für WETTREG 2006 für den Zeitraum 1961-2000 (20C, Abkürzungen siehe Kapitel 3.4.3)	39
Abbildung 3-30:	Räumliche Verteilung der WETTREG 2006 Klimavariablen für die erste Realisation, gemittelt über den Zeitraum 1961-2000 (pcp in mm/a; tav in °C).....	39
Abbildung 3-31:	REMO Raster und Interpolationsraster für Niedersachsen	40
Abbildung 3-32:	Untersuchte Teilgebiete und beeinflussende Niederschlagsstationen	42
Abbildung 3-33:	Kaskadenschema (Olsson, 1998 - verändert) mit $V = \text{Volumina} [\% \text{ des Ausgangsvolumens}]$ und W_1 & W_2 als Wichtungsfaktoren.....	44
Abbildung 3-34:	Exemplarische Darstellung der Diversionsproblematik	45
Abbildung 3-35:	Schema zur Bewertung der Eignung der untersuchten Disaggregierungsverfahren	46
Abbildung 3-36:	Hochwasserquantile des Pegels Pionierbrücke/Sieber	48
Abbildung 3-37:	Hochwasserquantile des Pegels Derneburg/Nette	48
Abbildung 3-38:	Hochwasserquantile des Pegels Reckershausen/Leine	49
Abbildung 3-39:	Hochwasserquantile des Pegels Göttingen/Leine	49
Abbildung 4-1:	Untersuchungsgebiet mit allen Abflusspegeln (links) und mit den verwendeten Abflusspegeln (rechts)	52
Abbildung 4-2:	Ergebnisse der Trendanalyse der Abflussscheitel.....	54
Abbildung 4-3:	Trends jährliche Scheitelabflüsse (hydrologisches Jahr), leere Symbole: nicht signifikante Trends, ausgefüllte Symbole: signifikante Trends	54
Abbildung 4-4:	Ergebnisse der Trendanalyse der POT90 (links) und der POT75 (rechts).....	54
Abbildung 4-5:	Ergebnisse der Trendanalyse der D90 (links) und der D75 (rechts)	54
Abbildung 4-6:	Ergebnisse der Trendanalyse der mittleren Tageswerte (links) und der NM7Q (rechts)	54
Abbildung 5-1:	Vorgehensweise bei der Untersuchung von möglichen Einflüssen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft mit Hilfe eines hydrologischen Modells.	57
Abbildung 5-2:	Prinzipskizze der hydrologischen Prozesse auf Teilflächenbasis im hydrologischen Modell PANTA RHEI.....	59
Abbildung 5-3:	Das Einzugsgebiet der Aller im südöstlichen Teil Niedersachsens mit Referenzpegeln (rot) an den Flüssen Aller, Leine, Oker, Innerste und Rhume sowie die Detailgebiete mit Pegeln (grün).....	62
Abbildung 5-4:	Gebietsverfeinerung am Beispiel des Siebereinzugsgebietes mit Teilflächenunterteilung nach Hydrographischer Karte und Nachbearbeitung einschließlich Gewässernetz mit künstlichen Gräben.	63
Abbildung 5-5:	Kalibrierung und Validierung des Modells am Beispiel des Pegels Rethem / Aller.....	66
Abbildung 5-6:	Kalibrierung und Validierung des Modells hinsichtlich Jahres-HQ am Beispiel des Pegels Rethem / Aller.	66
Abbildung 5-7:	Vergleich der simulierten und beobachteten Hochwasserereignisse am Pegel Rethem / Aller unter Berücksichtigung der Absolutwerte und des Zeitraums des Auftretens innerhalb eines Jahres.	67
Abbildung 5-8:	Kalibrierung der Detailgebiete mit Stundenwerten des Niederschlags am Beispiel des Pegels Brock / Böhme.....	69
Abbildung 5-9:	Monatsmittel von Niederschlags- und Abflusshöhe aus 20 WETTREG2006-Realisationen am Pegel Ohrum / Oker (Original-WETTREG2006-Datensatz).	70
Abbildung 5-10:	Quotientenkarte der Jahresniederschlagssummen aus der WETTREG2006-20C-Interpolation und der Beobachtung. Werte größer 1 weisen auf höhere Niederschlagssummen im interpolierten WETTREG2006-Datensatz hin, Werte kleiner 1 bedeuten, dass im interpolierten	

WETTREG2006-Datensatz für das entsprechende Rasterfeld eine geringere Niederschlagssumme enthalten ist als in der Beobachtung.	71
Abbildung 5-11: Monatsmittel von Niederschlag- und Abflusshöhe aus 20 WETTREG-Realisationen am Pegel Ohrum / Oker (modifizierter WETTREG-Datensatz).	72
Abbildung 5-12: Monatsmittel von Niederschlag- und Abflusshöhe aus 20 WETTREG-Realisationen am Pegel Rethem / Aller.	73
Abbildung 5-13: Monatsmittel von Niederschlag und Abfluss aus 2 REMO-Läufen am Pegel Rethem / Aller.	73
Abbildung 5-14: Hochwasserstatistik Pegel Rethem / Aller (Beobachtung, WETTREG2006 und REMO), Tageswertbasis. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilung.	74
Abbildung 5-15: Hochwasserstatistik Pegel Brock / Böhme (1971 – 2000, Anpassungen mit Gumbel-Verteilung), Stundenwertbasis.	75
Abbildung 5-16: Mittlere monatliche Abflusshöhen aus WETTREG2006-Läufen für drei Zeiträume für den Pegel Rethem / Aller.	76
Abbildung 5-17: Mittlere monatliche Abflusshöhen aus REMO-BfG für drei Zeiträume für den Pegel Rethem / Aller.	77
Abbildung 5-18: Mittlere Abflusshöhen pro Quartal aus 20 WETTREG2006-Realisationen und 2 REMO-Läufen (UBA und BfG) für drei Zeiträume für den Pegel Rethem / Aller.	78
Abbildung 5-19: Mittlere prozentuale Veränderung des mittleren Abfluss für 8 Referenzpegel, quartalsweise differenziert.	78
Abbildung 5-20: Veränderung der langjährigen mittleren Tageswerte des Abflusses für den Pegel Rethem / Aller.	79
Abbildung 5-21: Vergleich der Hochwasserstatistiken für den Pegel Herrenhausen / Leine mit Plotting Positions als Grundlage zur Ermittlung von Jährlichkeiten und deren Änderungen beim Vergleich verschiedener Zeiträume.	80
Abbildung 5-22: Prozentuale Veränderung von HQ5 (oben) und HQ100 (unten) für WETTREG2006- und REMO-Szenarien bezogen auf den Kontrolllauf, Tageswertbasis.	82
Abbildung 5-23: Prozentuale Veränderung von HQ5 (oben) und HQ100 (unten) für WETTREG2006- und REMO-Szenarien bezogen auf den Kontrolllauf, Stundenbasis.	83
Abbildung 5-24: Prozentuale Veränderung HQ5 und HQ100 als Mittelwert von allen untersuchten Pegeln (Referenzpegel links, Pegel der Detailgebiete rechts).	85
Abbildung 7-1: Qualitative Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Projekt KliBiW hinsichtlich der Entwicklungstendenzen der mittleren und extremen Niederschläge und Abflüsse für Niedersachsen bzw. das Aller-Leine Gebiet.	93

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Erkenntnisse der aktuellen Klimaforschung (vgl. Kapitel 1.2) sowie des 4. und bisher letzten Sachstandsberichts des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) zeigen deutliche Hinweise, dass ein von Menschen mit verursachter globaler Klimawandel stattfindet. Die Aufzeichnungen von Klimagrößen der letzten 100 Jahre zeigen eine deutliche Veränderung der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse, auch in Deutschland, und die Simulationen von Klimamodellen für die Zukunft zeigen Tendenzen, dass diese Veränderungen zukünftig noch fortschreiten bzw. sich noch verstärken können. Dementsprechend würde es zu Veränderungen bei der Hoch- und Niedrigwasserführung sowie bei den Grundwasserständen kommen.

Die Veränderungen sowie daraus resultierende Auswirkungen können regional unterschiedlich ausfallen und erhebliche nachteilige Konsequenzen für den Wirtschaftsstandort Niedersachsen nach sich ziehen. Denkbare Beispiele sind eine zunehmende Hochwassergefährdung mit entsprechend gesteigerten Schadenspotentialen, aber auch häufigere bzw. extremere Niedrigwasserführung mit Einschränkungen für Schifffahrt, Trinkwasser- und Energieversorgung. Diese möglichen Veränderungen stellen die niedersächsische Wasserwirtschaft vor neue Herausforderungen auf die frühzeitig reagiert werden muss.

Daher hat das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz gemeinsam mit dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) das Projekt „Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgen für das Binnenland (KliBiW)“ initiiert. Im Zuge dieses Projektes sollen mögliche klimabedingte Folgen für die Wasserwirtschaft in Niedersachsen abgeschätzt und entsprechende Anpassungsstrategien entwickelt werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse können anschließend Handlungsempfehlungen für Entscheidungs- und Maßnahmenträger abgeleitet werden. Zudem werden Synergieeffekte für die Aufgaben des vorsorgenden Hochwasserschutzes (NWG 2010: §§ 115, 116; WHG 2010: §§ 73 bis 75) unter Berücksichtigung von Klimawandeleffekten erwartet. Nicht zuletzt sollen mit diesem Projekt auch Methoden aus der wissenschaftlichen Forschung in der gängigen fachlichen Praxis der Wasserwirtschaft in Niedersachsen etabliert werden.

Zu diesem Zweck gibt es Schnittstellen zwischen dem Projekt KliBiW und dem Projekt KLIFF / KLIFWA (Klimafolgenforschung in Niedersachsen - Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wasserdargebot, Hochwasserrisiko und Gewässerbelastung in Niedersachsen), welches sich vor allem mit der Entwicklung neuer methodischer Ansätze in der deterministischen und statistischen Hydrologie sowie der Verringerung von Prognoseunsicherheiten auseinandersetzt (vgl. Tabelle 2-1). Die Projektpartner von KliBiW sind ebenfalls an dem Projekt KLIFF / KLIFWA beteiligt, so dass Synergien zwischen den Projekten optimal genutzt werden können.

1.2 Stand der Klimaforschung

Das Klima beschreibt nach heute gängiger (meteorologischer) Definition das „statistische Verhalten der Atmosphäre (bzw. die örtlich charakteristische Häufigkeitsverteilung atmosphärischer Zustände und Vorgänge, d.h. Mittelwerte, Extremwerte, Dauerwerte), das für eine relativ große zeitliche Größenordnung (Empfehlung nach der World Meteorological Organization WMO: 30 Jahre) charakteristisch ist.“ (Hantel et al., 1987)

Klima entwickelt sich aus einem komplexen Wechselspiel von Prozessen zwischen Atmosphäre, Kryosphäre, Biosphäre und den Ozeanen. Die Erforschung des Klimas und seiner Veränderung in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft findet sowohl auf globaler wie regionaler Ebene statt. Aktuelle Themen der Klimaforschung in Deutschland sind nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes (DWD) etwa

- die Datengewinnung und Beobachtung der gegenwärtigen Klimaentwicklung,
- die Modellierung von Klimaszenarien,
- die interdisziplinäre Bewertung und Begutachtung der Klimadiagnosen,
- die Beratung von Politik, Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft.

Über die möglichen Ursachen für die globale Klimaänderung bzw. den Klimawandel herrscht in der Wissenschaftswelt weitgehend Einigkeit. Demnach spielt die Änderung der Energiebilanz der Erde eine wesentliche

Rolle. Diese kann bedingt sein durch (Rahmstorf & Schellnhuber, 2007; Bubenzer & Radtke, 2007; IPCC, 2007; Claussen, 2003)

- Schwankungen der Erdbahn bzw. der Erdachsenneigung sowie Schwankungen der Sonnenemissionsintensität, Sonnenfleckenzyklus,
- Änderung der planetarische Albedo, d.h. der Beschaffenheit der Landoberfläche, z.B. durch Eismassen- und Landnutzungsänderungen,
- die Zusammensetzung der Atmosphäre, d.h. Absorption und Reflexion der Wärmestrahlung, z.B. durch Wasserdampf, Aerosole oder Treibhausgase,
- tektonische Änderungen, d.h. Plattentektonik und Vulkanismus, oder Ozeanzirkulationen.

Neben diesen einzelnen Ursachen spielt vor allem deren Zusammenspiel bzw. Rückkopplungs- bzw. Selbstverstärkungseffekte zwischen den verschiedenen Ursachen eine entscheidende Rolle. Sie haben einen erheblichen Einfluss auf das Ausmaß der Erwärmung bzw. Abkühlung sowie die Intensität und zeitlichen Dimension der Veränderung.

Betrachtet man die aktuellen Klimaänderungen der letzten etwa 100 Jahre, so kann ein Anstieg der globalen Mitteltemperatur um rund 0,7 bis 0,8 Grad Celsius festgestellt werden (Rahmstorf factsheet; IPCC, 2007), für Deutschland sind es sogar zwischen 0,9 und 1,1 Grad Celsius (DMG, 2007; DWD). Dabei ist die Erwärmungsrate der letzten Dekaden größer als zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Zudem zählt der Beginn des 21. Jahrhunderts laut IPCC (2007) zu den wärmsten Jahren seit Beginn der Messungen um 1850. Diese Entwicklung hat globale Konsequenzen (IPCC, 2007), wie z.B.

- Anstieg des Wasserdampfgehalts in der Atmosphäre
- Anstieg der Wassertemperatur der Ozeane (→ Meeresspiegelanstieg)
- Abschmelzen von Gletschern (→ Meeresspiegelanstieg)
- Zunahme der Häufigkeit von Extremereignissen (Niederschlag, Trockenheit)

In Deutschland ist die jährliche Niederschlagsmenge seit 1900 kontinuierlich leicht gestiegen. Zudem zeigt sich verstärkt eine Tendenz abnehmender Niederschläge im Sommer sowie zunehmender Niederschlä-

ge im Herbst und Winter. Auch die Extreme erscheinen variabler, d.h. es zeigt sich ein zunehmender Trend zu extrem hohen wie niedrigen Niederschlagsmengen bzw. daraus resultierenden Überschwemmungen und Trockenperioden. Diese Veränderungen können jedoch regional unterschiedlich ausgeprägt sein (DMG, 2007; LAWA, 2010).

Die zukünftige Entwicklung des Klimas wird heutzutage von Klimamodellen simuliert. Diese werden auf Basis wesentlicher physikalischer Prinzipien entwickelt (Abbildung von Prozessen innerhalb und zwischen verschiedenen Systemen wie der Atmosphäre, der Kryosphäre, den Ozeanen und der Landoberfläche). Ihre Ergebnisse sind jedoch mit mehr oder weniger Ungenauigkeiten behaftet, z.B. je nach untersuchter Klimagröße (Temperatur, Niederschlag) oder Betrachtungsmaßstab (IPCC, 2007). Die gewonnenen Daten sind nicht als Klimavorhersage zu interpretieren, sondern als mögliche Szenarien, die auf bestimmten Annahmen bzgl. der Entwicklung der Treibhausgasemissionen basieren. Diese stützen sich nach dem Ansatz des IPCC und dessen Special Report on Emission Scenarios (Nakicenovic et al., 2000) auf mögliche Entwicklungen von Gesellschaft, Wirtschaft und Technologie auf globaler bzw. regionaler Ebene und gliedern sich in vier Familien (vgl. Abbildung 1-1 und Anhang 1).

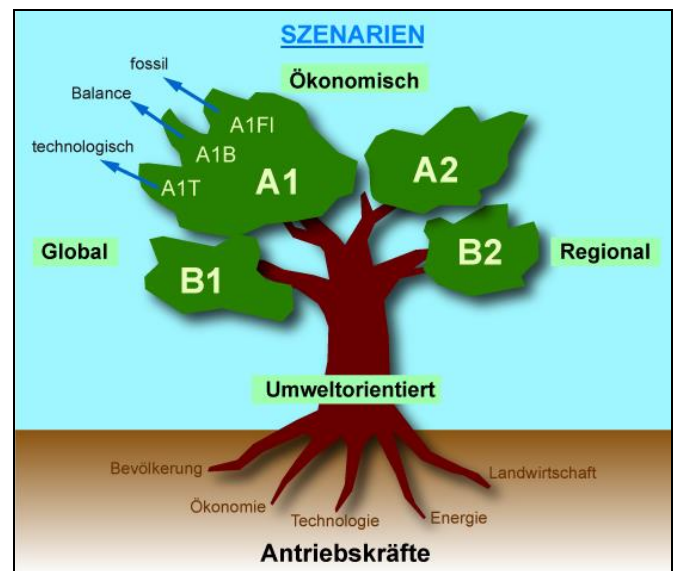


Abbildung 1-1: Emissionsszenarien als Antrieb der Klimamodelle (aus wiki.bildungsserver.de nach IPCC, 2000)

Bei den weiteren Analysen wird das Szenario A1B betrachtet, ein gemäßigtes Szenario mit einer ausgewogenen Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Energiequellen. Für den 5. Sachstandsbericht des

IPCC, der voraussichtlich 2013/2014 erscheinen wird, werden jedoch bereits neue Szenarien entwickelt, die u.a. die Reaktionen der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung auf den Klimawandel berücksichtigen werden (Rückkopplungseffekte). Grundsätzlich dienen diese Szenarien als Eingangsdaten für globale Klimamodelle, die wiederum die Randbedingungen für räumlich und z.T. auch zeitlich höher aufgelöste Regionale Klimamodelle darstellen. Die Folgen der Klimaentwicklung werden schließlich je nach Fragestellung in verschiedenen Impactmodellen (z.B. hydrologischen Modellen) simuliert.

Folgende Trends ergeben sich nach bisherigen Ergebnissen der Klimamodelle für die zukünftige Klimaentwicklung in Deutschland nach dem Szenario A1B (DMG, DWD):

- Anstieg der mittleren Temperatur um 1 – 2 Grad bis 2050 und um 2,5 – 5 Grad bis 2100 (je nach Modell, Region und Jahreszeit) im Vergleich zu dem Zeitraum 1970 - 2000
- vermehrter Hitzestress sowie häufigere und stärkere Hitzeperioden
- kaum Veränderung der Jahresniederschlagssummen bis 2050 (-15 bis +10 %), verstärkte saisonale Verschiebung bis 2100 (bis -40% im Sommer und +30% im Winter)
- im Winter mehr Starkniederschläge (vor allem ab 2040), z.T. höhere Ergiebigkeit von Einzelereignissen verbunden mit extremen Abflussschwankungen

Regionale Studien innerhalb Deutschlands hinsichtlich der Tendenzen der Klimaentwicklung weisen darauf hin, dass z.B. im Bereich von Süddeutschland die Temperaturen bis Mitte des Jahrhunderts im Mittel um 1,7 Grad gegenüber heute ansteigen können, wobei die Erwärmung im Winter deutlicher ausfallen wird als im Sommer. Demgegenüber steht eine Entwicklung hin zu trockeneren Sommern (Niederschlag bis -10%) und feuchteren Wintern (Niederschlag bis + 35%). Daraus wird u.a. eine erhöhte Hochwassergefahr im Winterhalbjahr abgeleitet (KLIWA 2009, 2006). Im Bereich Nordrhein-Westfalens geht man von einer Temperaturerhöhung von im Mittel etwa 1,9 Grad bis Mitte des Jahrhunderts aus, auch hier fällt die Zunahme im Winter am größten aus. Ebenso kommt es zu einer Verschiebung der Niederschläge vom Sommer (bis -30%) in den Winter (bis +30%). Dieser Tendenz scheinen auch die mittleren Abflüsse zu folgen. Hinsichtlich der

(extremen) Hochwasserabflüsse gibt es hier bislang keine eindeutigen Tendenzen (MUNLV, 2007).

Wichtig für die Einschätzung und den Vergleich solcher Aussagen zur Klimaentwicklung sind stets folgende Kriterien:

- gültig / erhoben für welche Region (global, regional, lokal)?
- welche Zeitskala / Vergleichszeitraum?
- welche Datenbasis (Stationen, Messverfahren)?
- welche Darstellung (Jahreswerte, Dekadenmittel, Extremwerte)?
- welche Größe (z.B. Temperatur oder CO₂-Konzentration)?
- Absolutwerte oder Änderung (Anomalie)?

2 Projektgrundlagen

2.1 Zielsetzung

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 1.2 findet nach heutigem Stand der wissenschaftlichen Diskussion und Erkenntnisse ein Klimawandel statt, der neben natürlichen Faktoren auch maßgeblich vom Menschen verursacht wird. Diese Entwicklungen werden auch dann anhalten, wenn sämtliche Einflüsse des Menschen (z.B. Treibhausgasemissionen, Landnutzungsänderungen) ab sofort auf dem Niveau von dem Jahr 2000 gehalten würden, da das Klimasystem nur sehr träge auf Veränderungen reagiert (DMG, 2007).

Daher muss sich die niedersächsische Wasserwirtschaft mit den möglichen Folgen des Klimawandels befassen und entsprechende nachhaltige Anpassungsstrategien entwickeln. Die Wasserwirtschaft umfasst hierbei die Einflussbereiche des menschlichen Handelns auf das ober- und unterirdische Wasser, wie etwa den Hochwasserschutz, die Wasserversorgung, die Be- und Entwässerung oder die Wasserkraftnutzung (nach Maniak, 1997).

Das Projekt KliBiW dient dazu, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft fundiert und sachgerecht beurteilen zu können, Grundlagen für eine effiziente Planung zu schaffen (speziell im Bereich Hoch- / Niedrigwasserverhältnisse) und Maßnahmen nachhaltig bewerten zu können. Im Besonderen sollen mit den Erkenntnissen aus dem Projekt die fachlichen Kompetenzen des NLWKN sowie der beteiligten Projektpartner im Bereich Klimawandel und Klimafor-schung ausgebaut werden; speziell die Befähigung des Gewässerkundlichen Landesdienstes (GLD), das Hochwasserrisiko unter Wirkung des Klimawandels regional zu beurteilen und kommunale Entscheidungsgremien zu beraten.

Folgende konkrete Zielsetzungen sind mit dem Projekt verbunden:

- die landesweite Zusammenstellung, Aufbereitung und Auswertung von Grundlagendaten für Niederschlag, Temperatur und Abfluss
- die (Weiter-)Entwicklung eines Wasserhaushaltsmodells für das Aller-Leine-Oker-Gebiet zur Langzeit-Simulation von Abflüssen unter Berücksichtigung ausgewählter Klimaszenarien
- die Identifikation von Schwerpunkten der wasserwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels für das niedersächsische Binnenland

- der Ausbau der fachlichen und methodischen Kompetenzen des GLD
- Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf das zukünftige Hochwasserrisiko und Berücksichtigung der Ergebnisse in der Hochwasserschutzplanung
- die Beratung von kommunalen Entscheidungsträgern (hinsichtlich Anpassungsstrategien)

2.2 Organisation

Das Projekt wird gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU) und umfasst folgende Institutionen:

- das Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Leibniz Universität Hannover (Herr Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt)
- das Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig (Herr Prof. Dr.-Ing. Günter Meon)
- die Harzwasserwerke GmbH (Herr Dr. Andreas Lange)
- den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz – Betriebsstelle Hildesheim (Herr. Prof. Dr.-Ing. Josef Hölscher)

Die Koordination der Arbeiten zwischen bzw. innerhalb der in Abbildung 2-1 dargestellten Teilprojekte erfolgte durch den NLWKN über eine Lenkungsgruppe, in der neben den o.g. Projektpartnern Frau Gerhild Lienau als Vertreterin des MU teilnahm. Zudem waren auch Vertreter des Klimawandel-Projektes KLIF / KLIFWA in regelmäßigen Abständen in den Abstimmungsprozess involviert, um Synergien zwischen den beiden Projekten optimal nutzen zu können (vgl. Tabelle 2-1). Der fachliche Austausch zwischen den Teilprojekten erfolgte über regelmäßige Sitzungen der Bearbeiter aus den jeweiligen Institutionen.

Das Projekt KliBiW umfasst folgende Teilprojekte (TP):

- 1) Analyse der Klimaentwicklung (u.a. Auswertung von Klimamess- und –modelldaten, Regionalisierung von Klimadaten, Disaggregation von Niederschlagsdaten)
- 2) Wasserhaushalt (u.a. Anpassung und Kalibrierung eines NA-Modells für die Langzeitsimulation)
- 3) Hochwasserschutz (Simulation gegenwärtiger und zukünftiger Abflüsse, Analyse der simulierten Abflusszeitreihen)
- 4) Niedrigwasser (Simulation gegenwärtiger und zukünftiger Niedrigwasserabflüsse, Analyse der simulierten Abflusszeitreihen)
- 5) Information & Kommunikation (u.a. Datenmanagement, Öffentlichkeitsarbeit)
- 6) Projektleitung & Koordination (u.a. Umsetzung der Ergebnisse / Methoden in die fachliche Praxis)

Die Bearbeitung des Teilprojektes 4 „Niedrigwasser“ erfolgt in Einvernehmen mit dem MU aufgrund der eigenständigen, komplexen klimarelevanten Zusammenhänge in der Phase 3 von KliBiW, deren Durchführung unmittelbar an die Phase 2 anschließt.

Die wesentlichen Arbeitsschritte der einzelnen Teilprojekte sind in Abbildung 2-2 dargestellt.

Projektbeginn von KliBiW 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 NA-Modells. Im Mai 2009 wurde ein Zwischenbericht angefertigt und an das MU übergeben. 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 angewendet. Die Phase 2 des Projektes endet mit Abgabe dieses Abschlussberichts im April 2012.

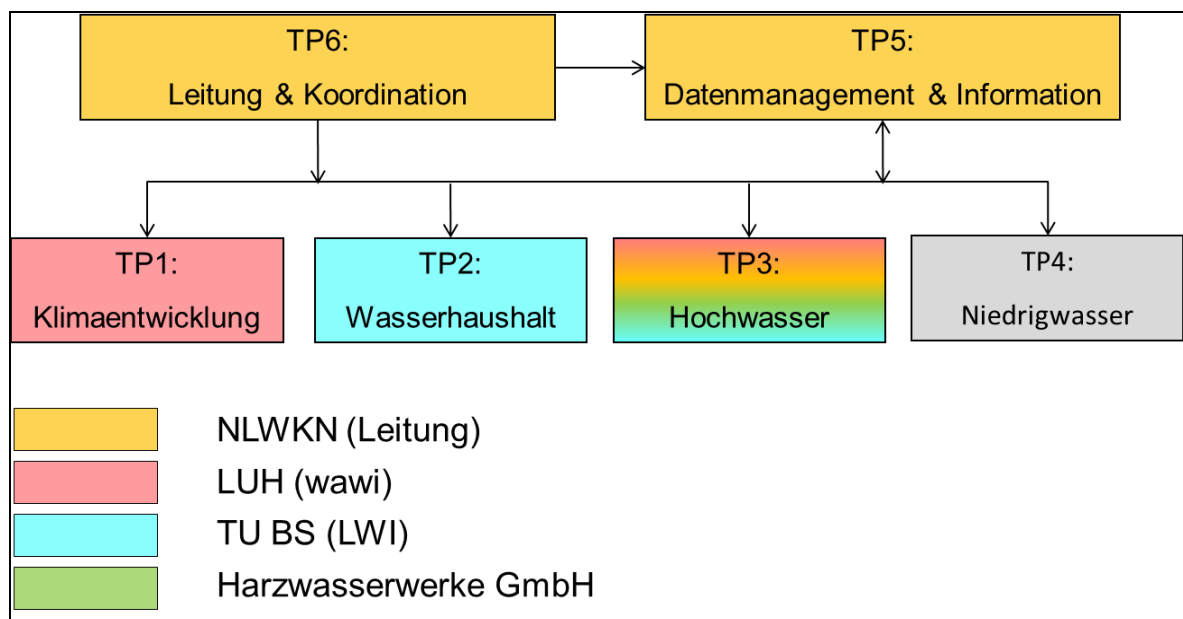


Abbildung 2-1: Teilprojekte und Projektbearbeiter in KliBiW

Tabelle 2-1: Synergien und Unterschiede zwischen KLIFF / KLIFWA und KliBiW

<ul style="list-style-type: none"> • Gemeinsame Datenbasis und Datenaufbereitung • Ergebnistransfer in Öffentlichkeit bzw. fachliche Praxis • Aufbau von Kommunikationsstrukturen • Aufbau einer Informations- und Kommunikationsplattform 		Synergien
<p>KLIFF / KLIFWA:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Methodenentwicklung und –kopplung (Forschung) • Integrative Analyse (multisektoruell) 	<p>KliBiW:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Methodenübertragung in die fachliche Praxis (GLD) • Qualifizierung d. Fachplanung (Wasserwirtschaft) 	Unterschiede

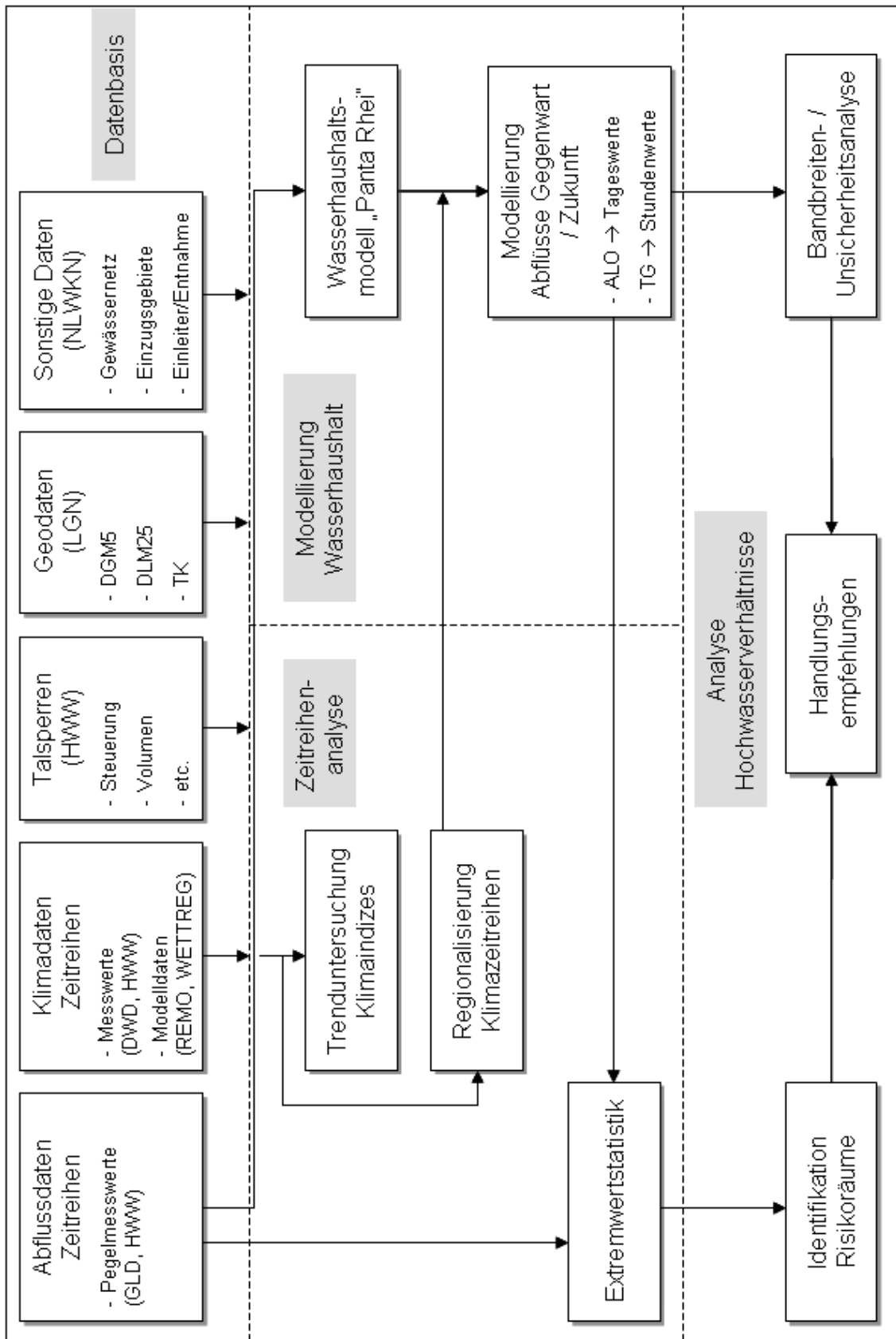


Abbildung 2-2: Ablaufschema der einzelnen Arbeitsschritte in KLiBiW

2.3 Untersuchungsgebiet

Die Analyse der gegenwärtigen wasserwirtschaftlichen und klimatischen Verhältnisse anhand gemessener Klima- bzw. Pegelzeitreihen in Teilprojekt 1 erfolgt landesweit für ganz Niedersachsen (vgl. Abbildung 2-3), auf einer Fläche von rund 47.600 km². Dadurch können aktuelle wasserwirtschaftliche Folgen des Klimawandels, unter Berücksichtigung der topographischen Gegebenheiten bzw. der naturräumlichen Einheiten und Flussgebiete, großräumig erfasst und bewertet werden. Als besonders charakteristisch kann in diesem Zusammenhang das vorherrschende Westwindklima bezeichnet werden, das in den flachen Marsch- und Geestbereichen im nördlichen bzw. nordwestlichen Niedersachsen die Einzugsgebiete prägt, und durch ozeanische Luftmassen milde Winter und verhältnismäßig feuchte Sommer bewirkt. Auf der anderen Seite unterliegt der Osten bzw. Südosten Niedersachsens (zusammen mit den Ausläufern der Mittelgebirge) dem Einfluss eines kontinentalen Klimas mit kälteren Wintern und trocken-heißen Sommern.

Auch die Regionalisierung, d.h. Interpolation, von Klimadaten bzw. Zeitreihen erfolgt für ganz Niedersachsen auf Rastern mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung. Auf diese Weise können Flächeninformationen abgeleitet werden, die im Zuge des Projektes, aber auch darüber hinaus, für verschiedenste klimarelevante Fragestellungen und Regionen genutzt werden können.

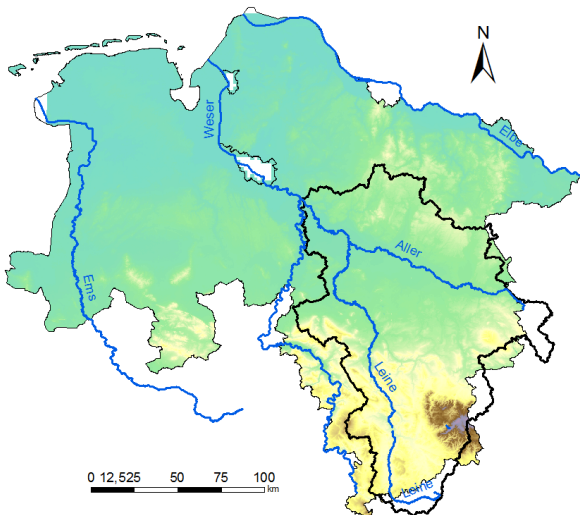


Abbildung 2-3: Niedersachsen, Untersuchungsgebiet für das Teilprojekt „Klimaentwicklung“

Die Untersuchungen zum Wasserhaushalt und Hochwasser unter Wirkung des Klimawandels in Teilprojekt 2 und 3 konzentrieren sich auf das Einzugsgebiet von Aller, Leine und Oker (vgl. Abbildung 2-4), mit einer Größe von rund 15.700 km². Gründe hierfür sind zum einen die Mittelgebirgszüge und der Harz, die für einen Großteil der Gewässer hier den Oberlauf prägen und für die erhebliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot erwartet werden. Zum anderen repräsentiert dieses Gebiet eine Vielzahl unterschiedlicher Naturräume und topographischer Verhältnisse in Niedersachsen. Des Weiteren können die gewonnenen Erkenntnisse bzgl. der Wirkung des Klimawandels auf die hydrologischen Verhältnisse für die derzeit aufzustellenden Hochwasserschutzpläne (u.a. Aller, Leine, Oker) genutzt werden. Letztlich liegt für dieses Gebiet bereits ein Wasserhaushaltsmodell vor, das in der Hochwasservorhersagezentrale (HWVZ) benutzt wird. Im Zuge des Projektes wurde es für die erforderlichen Fragestellungen erweitert bzw. angepasst (vgl. Kapitel 5.3). Die Erkenntnisse und Methoden, die für dieses Gebiet exemplarisch gewonnen bzw. entwickelt werden, können später ggf. für die Analyse anderer Einzugsgebiete in Niedersachsen übertragen werden.

Für den Bereich des Westharzes bzw. ausgewählter Teilgebiete werden detaillierte Untersuchungen der Veränderungen wasserwirtschaftlicher Kenndaten (Gebietsniederschlag, Mittel- / Hochwasserabflüsse) unter der Wirkung eines sich wandelnden Klimas in der Vergangenheit bis heute durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2).

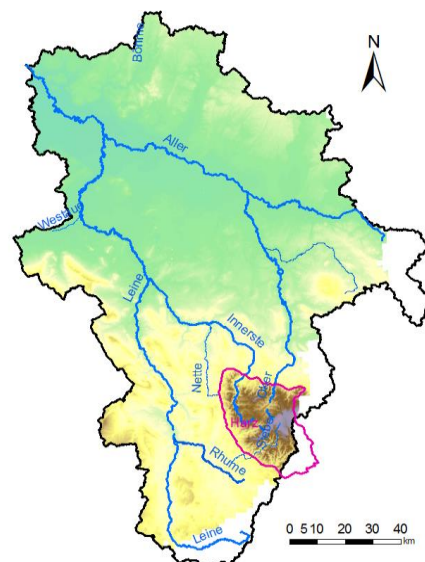


Abbildung 2-4: Einzugsgebiet von Aller und Leine sowie Harz, Untersuchungsgebiet der Teilprojekte „Wasserhaushalt“ bzw. „Hochwasser“

2.4 Datenbasis und Datenmanagement

Ein wesentliches Ziel des Projektes KliBiW ist die nachhaltige Zusammenstellung von Grundlagendaten für die Bewertung und Analyse des gegenwärtigen und zukünftigen Klimawandels sowie der daraus resultierenden wasserwirtschaftlichen Verhältnisse im niedersächsischen Binnenland. Zu diesem Zweck wurden im Zuge des Teilprojektes 5 „Datenmanagement“ sämtliche verfügbaren klimatologischen und hydrologischen Informationen über die Betrachtungsräume (vgl. Kapitel 2.3) gesammelt. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Stationszeitreihen von gemessenen Klimagrößen und Abflüssen. Für die Darstellung der zukünftigen Klimaentwicklung wurden zwei bzw. drei verschiedene Klimamodell Datensätze herangezogen, zum

einen WETTREG2006 (20 Realisationen), zum anderen REMO mit den Rechenläufen 1 (UBA) und 2 (BfG). Auch der Datensatz von WETTREG2010 wurde zum Zwecke der Validierung herangezogen. Alle Klimamodelldaten repräsentieren das Szenario A1B, ein hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung „gemäßigtes“ Szenario (vgl. Abbildung 1-1 und Anhang 1). Sämtliche Klimadaten lagen für ganz Niedersachsen sowie vereinzelt für Bereiche außerhalb davon vor, etwa für den sächsischen Teil des Aller-Gebietes sowie den thüringischen Bereich des Leine-Gebietes. Hinzu kamen verschiedene Geodaten, z.B. Landnutzungsdaten und digitale Geländehöhen (vgl. Tabelle 2-2). Die Daten lagen zumeist in geprüfter Form vor, wurden aber bzgl. ihrer Verwendbarkeit bei den einzelnen Untersuchungen und Analysen zum Teil nochmals validiert.

Tabelle 2-2: Datenbasis auf dem FTP-Server für das KliBiW-Projekt

	Herkunft	Daten	Räumliche Auflösung (Anzahl)	Zeitliche Auflösung	Zeitraum
Messdaten	DWD	Niederschlag	Stationsdaten (651)	Tageswerte	1951-2009
	DWD		Stationsdaten (116)	10-Minutenwerte	1991-2009
	DWD		Stationsdaten (14)	5-Minutenwerte	1950-2008
	NLWKN		Stationsdaten (7)	15-Minutenwerte	1998-2009
	HWW		Stationsdaten (15)	15-Minutenwerte	1998-2011
	DWD	Temperatur	Stationsdaten (67)	Stundenwerte	1949-2009
	DWD	Feuchte	Stationsdaten (67)	Stundenwerte	1949-2009
	DWD	Wind	Stationsdaten (51)	Stundenwerte	1950-2009
	DWD	Sonnenscheindauer	Stationsdaten (76)	Stundenwerte	1951-2009
	DWD	Globalstrahlung	Stationsdaten (5)	Tageswerte	1957-2008
	DWD	Klimadatensatz *)	Stationsdaten (123)	Tageswerte	1890-2010
	DWD	Synopdatensatz **)	Stationsdaten (120)	Stundenwerte	1949-2009
	DWD	MUQ ***)	Stationsdaten (109)	10-Minutenwerte	2009-2011
	GLD	Pegel Q	Stationsdaten (330)	Monatsmaximalwerte	1875-2010
	GLD		Stationsdaten (338)	Tageswerte	1831-2010
	GLD		Stationsdaten (113)	15-Minutenwerte	1999-2010
	HWW		Stationsdaten (20)	15-Minutenwerte	1992-2011
	GLD	Pegel W	Stationsdaten (293)	Monatsmaximalwerte	1839-2010
	GLD		Stationsdaten (307)	Tageswerte	1820-2010
	GLD		Stationsdaten (120)	15-Minutenwerte	1988-2010
HWW	Stationsdaten (20)		15-Minutenwerte	1992-2011	
NLWKN	AKN Lagebericht	Stationsdaten (458)	-	2009	
Modelldaten	CEC	WETTREG2006; A1B (Niederschlag)	Stationsdaten (159)	Tageswerte	1961-2100
	CEC	WETTREG2006; A1B (Klima) ****)	Stationsdaten (36)	Tageswerte	1961-2100
	CEC	WETTREG2010; A1B (Niederschlag)	Stationsdaten (309)	Tageswerte	1961-2100
	CEC	WETTREG2010; A1B (Klima) ****)	Stationsdaten (38)	Tageswerte	1961-2100
	MPI	REMO_UBA; A1B	10x10 km	Stundenwerte	1951-2100
	MPI	REMO_BFG; A1B	10x10 km	Stundenwerte	1951-2100
Geodaten	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

**) Wind, Temperatur, Luftdruck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Taupunktstemperatur

***) Temperatur, Niederschlag, Wind, Sonnenscheindauer, Globalstrahlung, Erdbodentemperatur, Luftdruck

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

Tabelle 2-3: Informationen zu den verwendeten Klimamodelldaten

	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

Die Datenbereitstellung und der Datenaustausch erfolgten zentral über einen Daten-Server (als File Transfer Protokoll, kurz FTP-Server), auf den sowohl die Beteiligten von KliBiW wie auch die Projektpartner des KLIFF-Verbundprojektes Zugriff haben. Sämtliche Basisdaten (vgl. Tabelle 2-2) wurden unter der Kategorie „Rohdaten“ verwaltet. Ergebnisse, wie Zeitreihen, Diagramme oder Karten, mit kurzen erläuternden Dokumentationen können unter der Kategorie „Endprodukte“ gefunden werden. Der grundsätzliche Aufbau der Datenstruktur auf dem FTP-Server kann Abbildung 2-5 entnommen werden. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Daten- / Ordnerstruktur auf dem FTP-Server ist im Anhang 2 zu finden.

Durch diese Art der Datenhaltung ist gewährleistet, dass sowohl Basisdaten wie (End-) Produkte aus den beiden Klimawandel-Projekten nachhaltig genutzt und

gepflegt bzw. vorgehalten werden können. Denkbar sind in diesem Zusammenhang etwa Serviceleistungen von Seiten des GLD bei klimarelevanten Anfragen durch Dritte, die Weiterverarbeitung der Daten bei eigenen Untersuchungen (z.B. in der Wasserhaushalts- oder Stoffmodellierungen) oder auch eine einheitliche und fundierte Datenbasis für zukünftigen Projekte mit Bezug zum Klimawandel in Niedersachsen, die stets den aktuellen Stand der Klimaforschung widerspiegelt. Es soll jedoch betont werden, dass es sich hierbei grundsätzlich um einen Datenpool für interne bzw. projektbezogene Zwecke handelt, im Gegensatz z.B. zur Landesdatenbank (LDB), auf die auch Externe Zugriff haben. Ausgewählte Ergebnisse können ggf. als Extrakt des FTP-Servers ebenfalls auf der LDB vorgehalten werden.

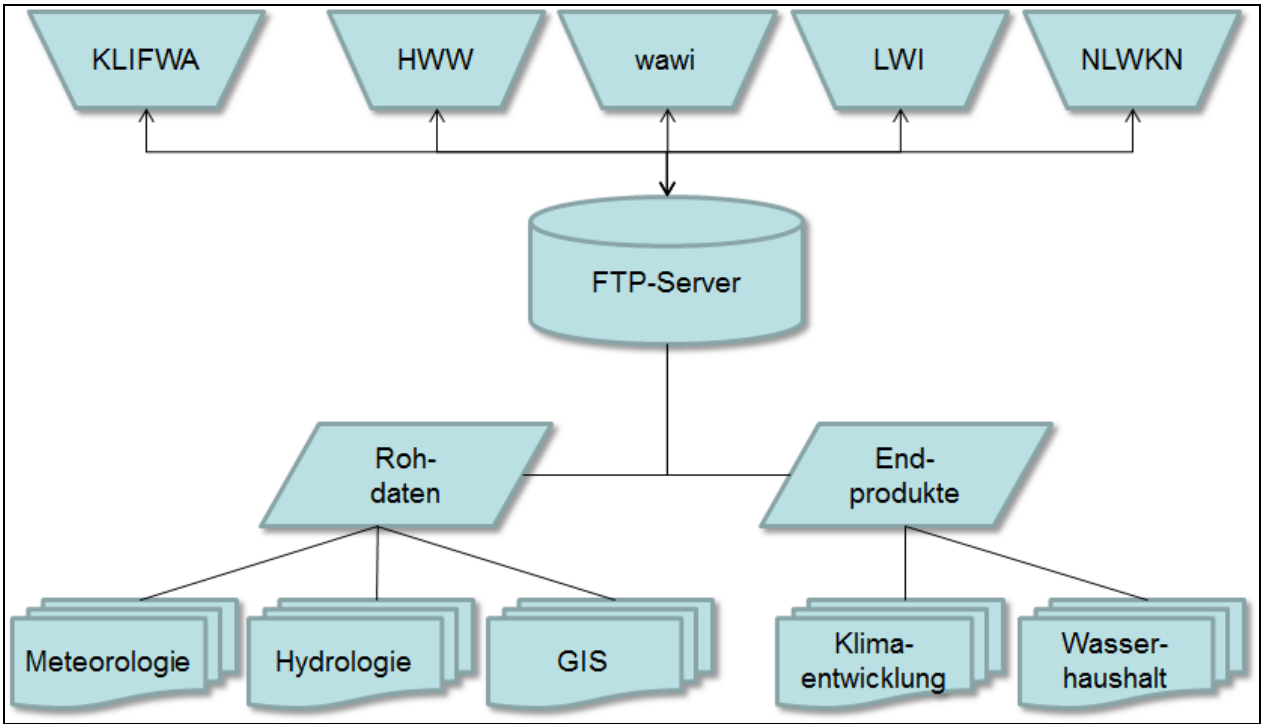


Abbildung 2-5: Aufbau der Datenstruktur sowie der Datenhaltung auf dem FTP-Server

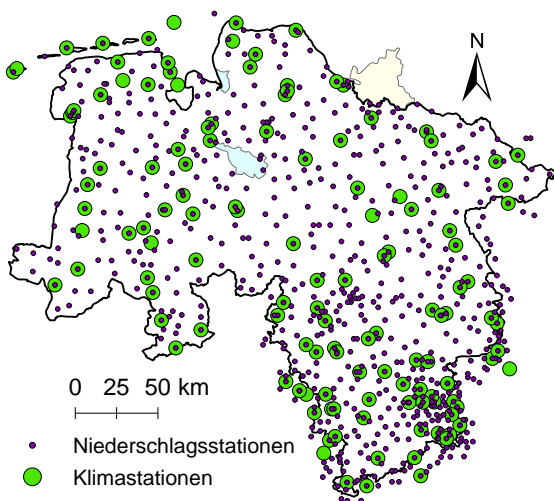
3 Analyse und Aufbereitung von Klimadaten

3.1 Trends in beobachteten Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag

Analysen zu in der Vergangenheit aufgetretenen längerfristigen Veränderungen des Niederschlages und der Temperatur erlauben einerseits die Abschätzung der Stationarität vorhandener Daten für Bemessungsfragen und sind andererseits Ausgangspunkt für Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf das zukünftige hydrologische Regime und wasserwirtschaftliche Verhältnisse. Grundlage der Analyse sind Zeitreihen aus der Beobachtung der betreffenden Klimagrößen an Klima- bzw. Niederschlagsstationen. Die folgende Beschreibung stellt eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse dar. Eine detailliertere Darstellung kann Haberlandt et al. (2010) entnommen werden.

3.1.1 Datenbasis

An Klimadaten standen insgesamt Daten von 701 Tageswertstationen des Niederschlages und 131 Stationen mit Aufzeichnungen von täglichen Minimum-, Maximum- und Mitteltemperaturen der Luft des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung.



Für die Klimadaten wurde zur Gewährleistung einer hinreichenden Reihenlänge und der Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen als Untersuchungszeitraum die 55-jährige Periode von 1951 bis 2005 festgelegt. Unter Berücksichtigung dieses Zeitraumes und dem Ausschluss aller Stationen mit einem Gesamtfehlwertanteil größer als 5% oder einem zusammenhängenden Beobachtungsausfall, der länger als ein Jahr andauerte, konnten 263 Stationen des Niederschlages und 18 Temperaturstationen für die Trendanalysen beibehalten werden (siehe Abbildung 3-1).

3.1.2 Methodik

Zur Analyse von Veränderungen im Klima wurden Indizes verwendet, die neben dem mittleren Verhalten speziell die wasserwirtschaftlich relevanten Extremwerte charakterisieren (Hundecca & Bárdossy, 2005), siehe Abbildung 3-1.

Die Indizes der Klimadaten wurden aus den Tageswerten der 55-jährigen Reihen für jede Station berechnet. Dabei wurden jährliche Serien der Indizes sowohl für das Gesamtjahr, als auch für die vier Jahreszeiten Winter (Dez.-Feb.), Frühling (Mrz.-Mai), Sommer (Jun.-Aug.) und Herbst (Sept.-Nov.) gebildet.

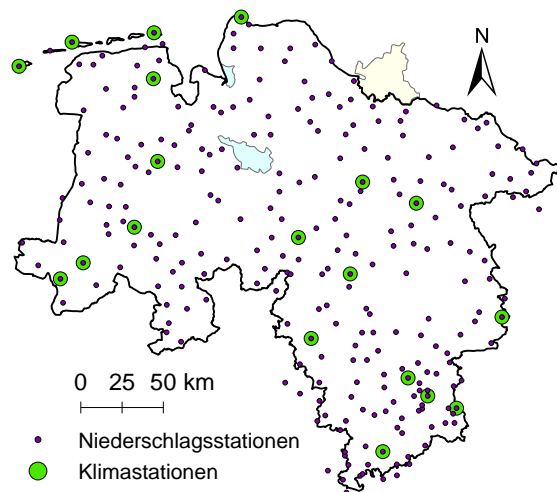


Abbildung 3-1: Untersuchungsgebiet mit allen Niederschlags- und Klimastationen (links) und mit den verwendeten Niederschlags- und Temperaturstationen (rechts)

Tabelle 3-1: Indizes für Tageswerte für Niederschlag, Temperatur

Niederschlagsindizes	
pq100	Maximaler Tageswert des Niederschlages N [mm/d]
pq90	90%-Quantil für Tageswerte mit N > 1mm/d [mm/d]
px5d	Größte 5-Tages-Niederschlagssumme [mm/5d]
pav1	Mittelwert des Niederschlages für Tage mit N ≥ 1 mm/d [mm/d]
pfl90	Prozentanteil N aus Ereignissen > Langzeit-90%-Quantil [%]
pnl90	Anzahl der Ereignisse > Langzeit-90%-Quantil [-]
pav0	Mittelwert des Niederschlages für Tage mit N ≥ 0 mm/d [mm/d]
pxcdd	Max. Anzahl aufeinander folgender Trockentage mit N < 1 mm/d [mm/d]
Temperaturindizes	
txq90	90%-Quantil der Tagesmaxima Tmax [°C]
tnq10	10%-Quantil der Tagesminima Tmin [°C]
tmav	Mittelwert der Tagesmittelwerte Tmean [°C]
tnfd	Anzahl der Tage mit Tmin < 0°C (Frosttage) [d]
txhwd	Heat Wave Duration: Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Tmax > 90% Quantil des Kalendertages (über einen 5 Tagezeitraum berechnet) [d]

Zur Analyse des Trends wurde der klassische Mann-Kendall-Test verwendet (Kendall, 1975). Zur Überprüfung der Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests wurde zusätzlich der Cox-Stuart-Test angewendet. Beide Tests lieferten qualitativ dasselbe Ergebnis. Daher wird in diesem Bericht nur der Mann-Kendall-Test diskutiert.

Da die Form der Anwendung des Mann-Kendall-Tests in der Literatur leicht variiert, wird die hier benutzte Methodik im Folgenden noch einmal kurz skizziert.

Der Mann-Kendall-Trendtest ist ein nicht-parametrischer Rang basierter Test, der nach einem relativen Ansteigen oder Abfallen der Reihenwerte sucht. Daraus resultiert, dass die Daten keiner bestimmten Verteilung gehorchen müssen und auch nicht-lineare Trends berücksichtigt werden. Die Nullhypothese des Mann-Kendall-Tests ist, dass die Zeitreihe keinen Trend hat. Dementsprechend lautet die Alternativhypothese, dass sie einen Trend hat. Es wurde hier durchgängig das Signifikanzniveau von 0,05 verwendet. Bei dem Test wird jeder Wert der Zeitreihe mit allen vorangegangenen Werten verglichen. Hierbei wird die Mann-Kendall-Statistik als Summe der Vorzeichenfunktion aller möglichen Paare (x_k, x_j) mit $k < j$ ermittelt:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad [3-1]$$

Kendall erweiterte diese Statistik zur Berücksichtigung von Bindungen, d.h. von Paaren mit betragsmäßig gleichen Reihenwerten:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p \cdot (t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad [3-2]$$

wobei g die Anzahl der Bindungsgruppen und t_p die Anzahl der Elemente der p-ten Gruppe ist. Daraus ergibt sich die folgende Teststatistik als Prüfgröße:

$$Z = \frac{S'}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad [3-3]$$

wobei $S' = S - \text{sgn}(S)$ eine Korrektur darstellt. Der kritische Wert des Tests $Z_{1-\alpha/2}$ wird mit der Standardnormalverteilung ermittelt. Die Nullhypothese des Tests wird verworfen, wenn $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ gilt. Ein Trend ist positiv für $Z > 0$ und negativ für $Z < 0$. Zusätzlich wird die Stärke der Trends aus dem Anstieg der Regressionsgeraden der Indizes gegen die Zeit geschätzt.

Die Messung von Punktniederschlägen unterliegt verschiedenen Messfehlern, z.B. durch Windeinflüsse und Verdunstung. Daher erfolgte eine Korrektur der Niederschlagstageswerte für alle Stationen nach dem Verfahren von Richter (1995). Die Trends von korrigierten und unkorrigierten Werten werden verglichen, um den Einfluss der Korrektur zu bestimmen.

In den Untersuchungen wurde die frei verfügbare Statistik-Software R verwendet (R Development Core Team, 2011).

Die Prüfung der Daten auf Inkonsistenzen erfolgte über den Vergleich statistischer Kennwerte benachbarter Stationen, Doppelsummenanalyse und einen Ausreißertest. Bei den ausgewählten Stationen konnten keine Unregelmäßigkeiten festgestellt werden.

3.1.3 Ergebnisse der Trenduntersuchung - Temperatur

In der Abbildung 3-2 ist das Ergebnis des Mann-Kendall-Tests dargestellt. Es lassen sich saisonal und für die verschiedenen Indizes deutliche Unterschiede feststellen. Die Maximaltemperatur zeigt positive Trends, die, mit Ausnahme des Herbstes, größtenteils signifikant sind. Die Minimaltemperatur zeigt ebenfalls positive Trends, die jedoch im Herbst und Winter nicht signifikant sind. Die Anzahl der Frosttage nimmt an den meisten Stationen in den dafür relevanten Saisons signifikant ab. Die Heat Wave Duration nimmt in allen Saisons mit unterschiedlicher Signifikanz zu. Die mittlere Temperatur nimmt in allen Saisons bis auf den Herbst mit einem hohen Anteil signifikanter Stationen zu. Der Herbst zeigt im Vergleich mit den anderen Sai-

sons generell die geringsten Veränderungen im Temperaturregime.

Ein räumliches Muster für die Temperaturindizes ist nicht erkennbar. Beispielhaft ist dies in der Abbildung 3-3 dargestellt. Bis auf zwei Stationen sind die Trends für die Maximaltemperatur im Winter stets positiv signifikant mit Anstiegen zwischen 1,3 und 2,2 Grad.

Zur Abschätzung mittlerer Temperaturtrends für Niedersachsen wurden die einzelnen Indizes jeweils über alle Stationen gemittelt. Anschließend wurden Regressionsgeraden an die mittleren Indizes für die Periode zwischen 1951 und 2005 angepasst und die Stärke der Trends aus dem Anstieg abgeschätzt. Die Tabelle 3-2 enthält die Ergebnisse dieser Analyse für die Temperaturindizes.

Im Mittel nimmt die Minimaltemperatur im Winter stärker zu als die Maximaltemperatur. Im Sommer ist es umgekehrt. Die Anzahl der signifikanten Trends ist nicht immer proportional zur Stärke der Änderung (vgl. Abbildung 3-2). Maximal- und Minimaltemperatur ändern sich stärker als die mittlere Temperatur. Die Änderungen für das Gesamtjahr im Zeitraum von 1951 bis 2005 betragen ungefähr +1,6 Grad für die Extreme und +1,3 Grad für die Mitteltemperatur. Im Mittel nimmt die Anzahl der Frosttage um 23 Tage im Jahr ab und die Heat Wave Duration um 15 Tage zu. Exemplarisch ist dies für Minimal- und Maximaltemperatur als Mittel für Niedersachsen in Abbildung 3-4 dargestellt. Beide Abbildungen demonstrieren die steigenden Trends in den Temperaturextremen, wobei die Minimaltemperaturen im Winter eine deutlich stärkere Schwankungsbreite als die Maximaltemperaturen im Sommer aufweisen.

Tabelle 3-2: Stärke der Veränderung der Temperaturindizes in °C bzw. Tagen im Mittel über alle Stationen in Niedersachsen für den Zeitraum von 1951 bis 2005

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Ganzjahr
txq90 [°C]	2.05	1.69	2.56	0.47	1.59
tnq10 [°C]	2.43	1.93	1.44	-0.04	1.61
tnfd [d]	-12.95	-10.45	-0.03	-0.60	-23.11
txhwd [d]	7.12	2.86	3.37	2.25	15.11
tmav [°C]	1.86	1.67	1.41	0.32	1.29

Zur Überprüfung der Voraussetzungen der verwendeten linearen Regression wurde eine Residualanalyse durchgeführt. In den meisten Fällen waren die Voraussetzungen von Unabhängigkeit, Homoskedastizität und Normalverteilung ausreichend erfüllt. Nur in sehr wenigen Fällen musste die Hypothese der Normalverteilung

für die Residuen verworfen werden. Speziell für den Indikator Heat Wave Duration werden die Voraussetzungen zur Anwendung der Regression jedoch verletzt, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

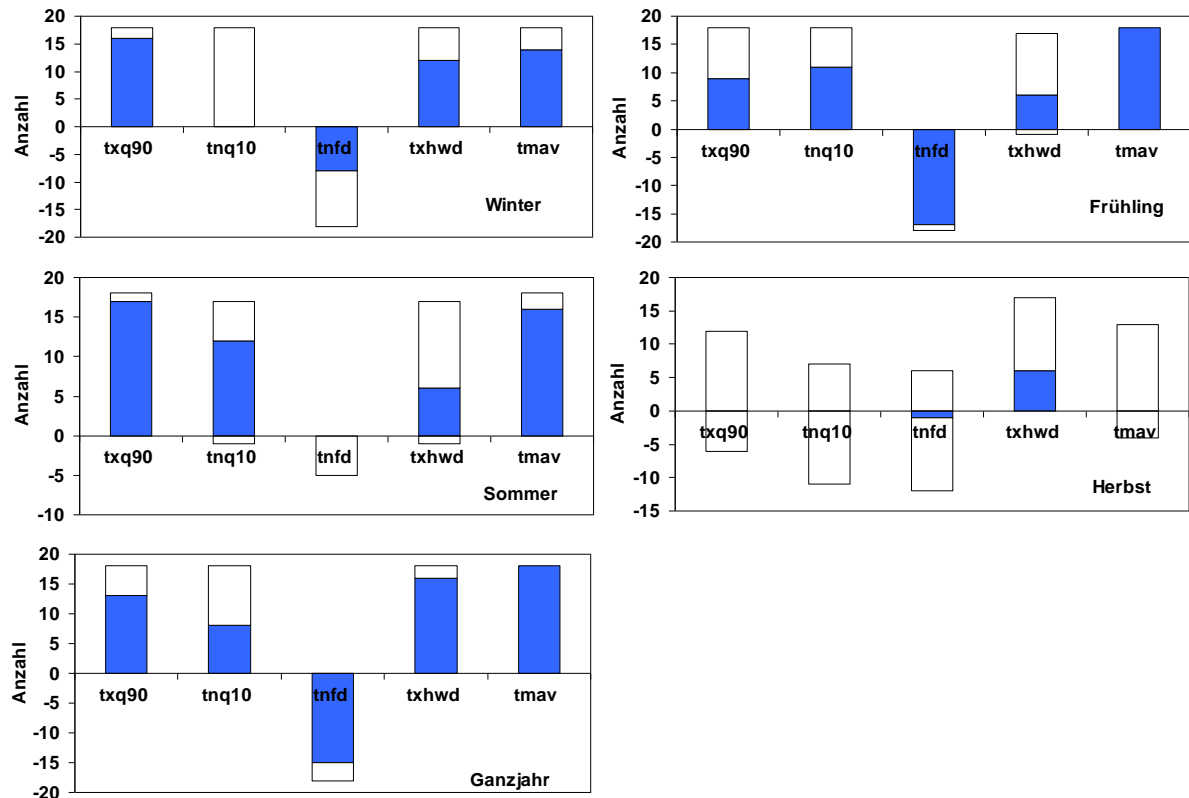


Abbildung 3-2: Signifikanz und Richtung von Trends der Temperaturindizes (Richtung der Balken kennzeichnet Richtung des Trends; ausgefüllter Balken kennzeichnet Anteil signifikanter Trends)

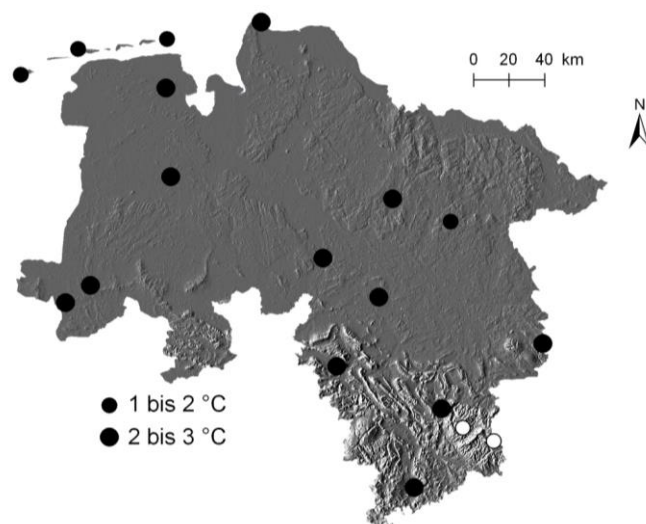


Abbildung 3-3: Räumliche Verteilung der Trends für das 90% Quantil des Tagesmaximums der Temperatur im Winter (Kreise = positive Trends, Dreiecke = negative Trends, ausgefüllte Symbole = signifikante Trends, Größe der Symbole zeigt Stärke der Trends)

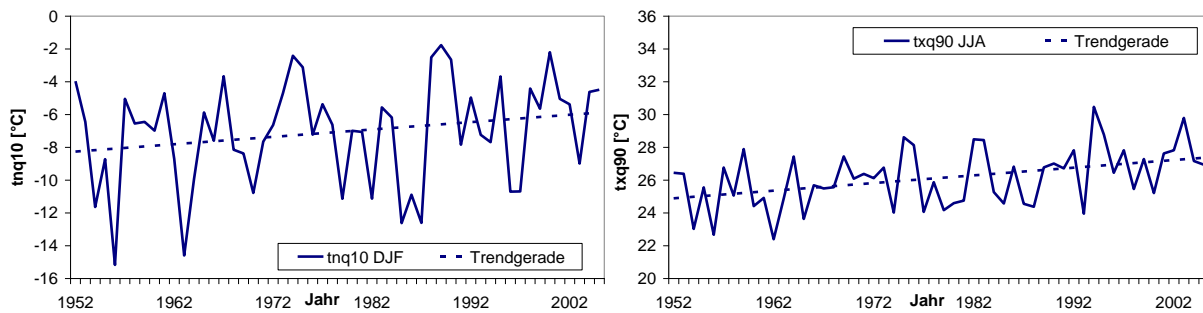


Abbildung 3-4: Trendgeraden der Minimaltemperatur tnq10 im Winter (links) und der Maximaltemperatur txq90 im Sommer (rechts) gemittelt über alle Stationen

3.1.4 Ergebnisse der Trenduntersuchung - Niederschlag

Alle Trendanalysen wurden zunächst für die unkorrigierten Niederschlagswerte durchgeführt. In der Abbildung 3-5 sind die Trends der Niederschlagsindizes und Saisons dargestellt. Wieder sind saisonal und für die verschiedenen Indizes deutliche Unterschiede festzustellen.

Im Vergleich zur Temperatur ist jedoch der Anteil der Stationen mit signifikanten Trends geringer. Im Winter treten bei allen Indizes fast nur positive Trends auf, die ausgenommen der Trockendauer an 21% bis 45% aller Stationen signifikant sind. Im Herbst ist das Bild ähnlich mit vorwiegend positiven Trends, die an 12% bis 28% aller Stationen signifikant sind. Die Trockendauer zeigt hier hauptsächlich negative Trends, die jedoch kaum signifikant sind. Im Frühling überwiegen ebenfalls positive Trends bei allen Indizes, wobei jedoch nur an wenigen Stationen eine Signifikanz nachweisbar ist. Im Sommer dagegen dominieren negative Trends mit einem geringen Anteil signifikanter Stationen zwischen 5% und 11%. Das deutlichste Signal im Sommer zeigt die Trockendauer mit fast nur positiven Trends und einem Anteil signifikanter Stationen von 35%. Das Ergebnis für das Gesamtjahr zeigt sowohl positive als auch negative Trends für die verschiedenen Indizes mit mehr signifikanten Anteilen im positiven Bereich. Damit wird noch einmal die Notwendigkeit für eine saisonal differenzierte Analyse deutlich.

Für die untersuchten Niederschlagsindizes lassen sich eher räumliche Muster erkennen als für die Temperaturindizes. Allgemein konnte festgestellt werden, dass die Zunahme des Niederschlags im Winter vor allem im Norden und Süden von Niedersachsen signifikant ist.

Ein Beispiel hierfür ist in der Abbildung 3-6 anhand des 90%-Quantils des Niederschlages dargestellt. Im Vergleich dazu ist die räumliche Verteilung der Trends für die Trockendauer im Sommer dargestellt. Deren Zunahme ist vor allem in der Mitte Niedersachsens signifikant.

Zur Abschätzung mittlerer Niederschlagstrends für Niedersachsen wurden die einzelnen Indizes jeweils über alle Stationen gemittelt. Anschließend wurden Regressionsgeraden an die mittleren Indizes angepasst und die Stärke der Trends aus dem Anstieg abgeschätzt. Die Tabelle 3-3 enthält die Ergebnisse dieser Analyse für die Niederschlagsindizes.

Die Trends für die gemittelten Werte bestätigen die bereits mit den einzelnen Stationen erhaltenen Ergebnisse. Die stärksten prozentualen Änderungen sind im Winter und im Herbst für die Niederschlagsmengen und im Sommer für die Trockendauer festzustellen. Besonders fallen die beiden Indizes pfl90 und pnl90 auf, welche die Menge des Niederschlages und Anzahl der Ereignisse für extreme Niederschläge kennzeichnen. Für diese wurden im Winter prozentuale Zunahmen von 51% für pfl90 und 84% für pnl90 festgestellt. Betrachtet man das Gesamtjahr sind die Änderungen bis auf pnl90 moderat.

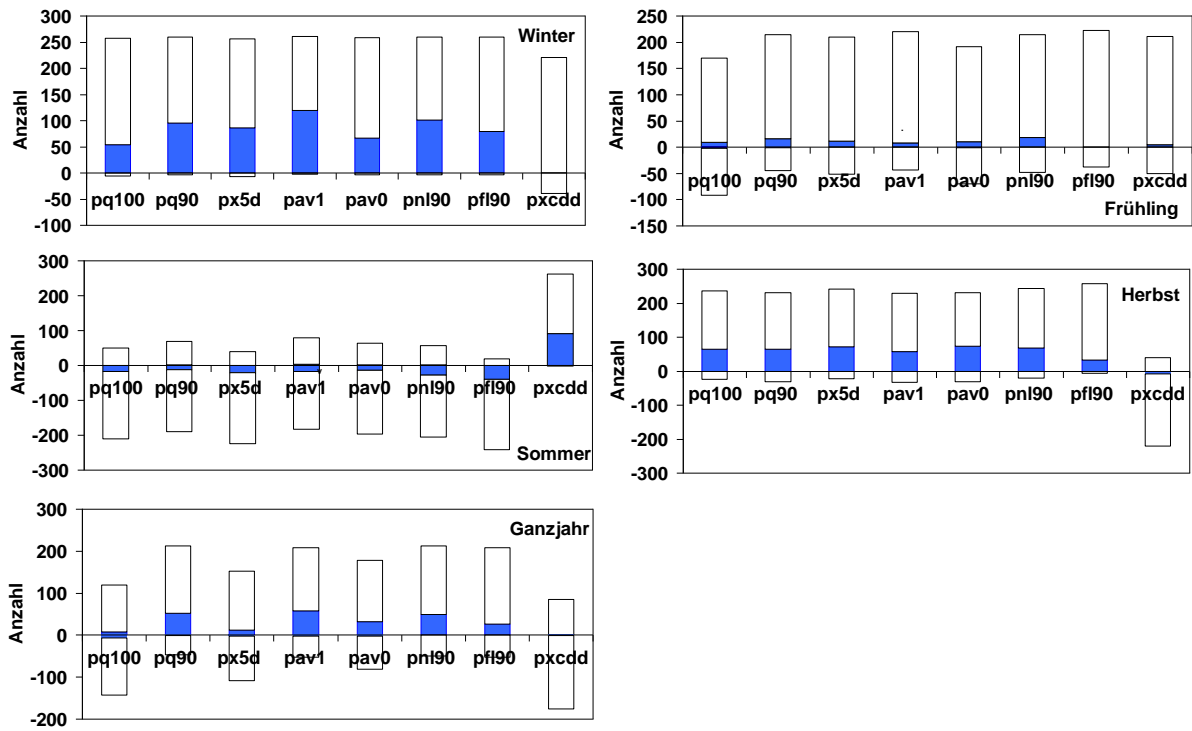


Abbildung 3-5: Anzahl, Signifikanz und Richtung von Trends der Niederschlagsindizes (Richtung der Balken kennzeichnet Richtung des Trends; ausgefüllte Balken kennzeichnen Anteil signifikanter Trends)

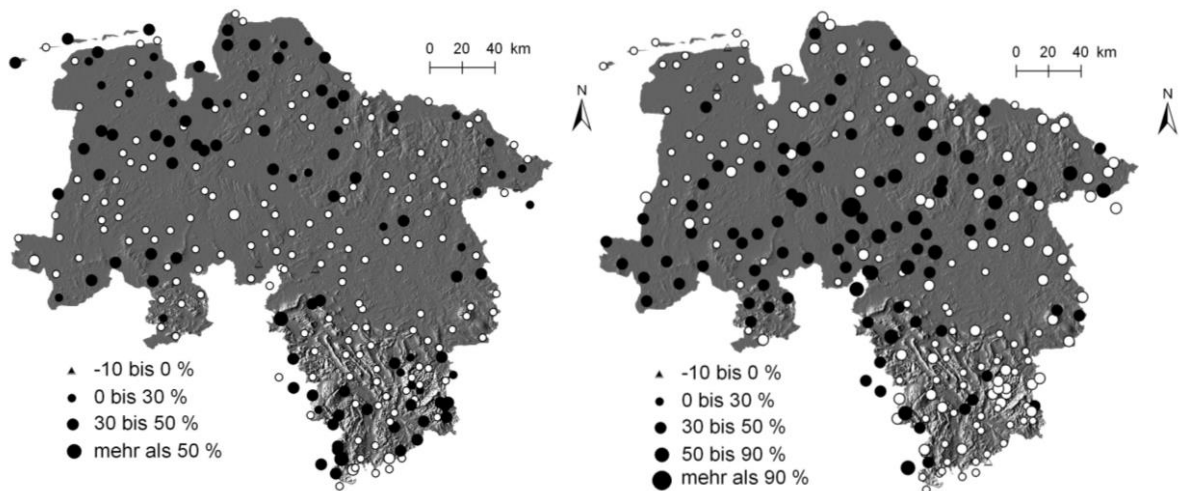


Abbildung 3-6: Räumliche Verteilung der Trends für das 90%-Quantil des täglichen Niederschlages im Winter (rechts) und die Trockendauer im Sommer (links) (Kreise = positive Trends, Dreiecke = negative Trends, ausgefüllte Symbole = signifikante Trends, Größe der Symbole zeigt Stärke der Trends)

Tabelle 3-3: Stärke der Veränderung der Niederschlagsindizes in % im Mittel über alle verwendeten Stationen

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Gesamtjahr
pq100 [%]	19	5	-9	30	3
pq90 [%]	23	9	-7	17	8
px5d [%]	29	10	-10	30	6
pav1 [%]	20	6	-4	13	6
pav0 [%]	32	8	-13	24	9
pxcdd [%]	10	5	36	-22	-9
pfl90 [%]	51	15	-11	34	7
pnl90 [%]	84	22	-21	50	20

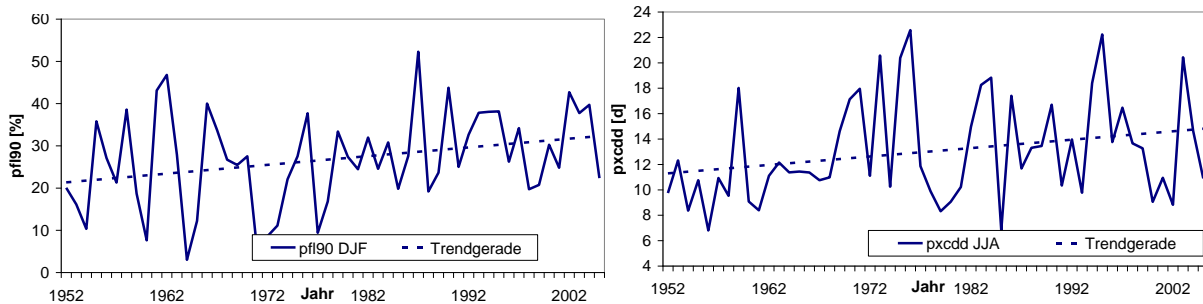


Abbildung 3-7: Trendgeraden des Niederschlagsanteils für Ereignisse größer als das Langzeit- 90%-Quantil des täglichen Niederschlages pfl90 im Winter (links) und der Trockendauer pxcdd im Sommer (rechts) gemittelt über alle Stationen

Die Gesamtzunahme des mittleren Niederschlages pav0 von 9% zeigt, dass nicht nur eine Umverteilung des Niederschlages innerhalb der Saisons und auf stärkere Ereignisse stattgefunden hat, sondern zusätzlich auch die Gesamtwassermenge im Niederschlag angestiegen ist. Als Beispiele für die mittleren Trends sind in der Abbildung 3-7 die Trendgeraden für den pfl90 im Winter und die pxcdd im Sommer dargestellt. Die Trockendauer steigt dabei von 11 Tagen auf 15 Tage und der Anteil des Niederschlages für die großen Ereignisse von ungefähr 20% auf 30%.

Die Voraussetzungen der linearen Regression wurden hier ebenso wie bei den Temperaturindizes mit einer Residualanalyse geprüft. Auch bei den Niederschlagsindizes waren in den meisten Fällen die Voraussetzungen erfüllt. Es gab nur zwei Fälle, bei denen die Normalität der Residuen nicht gegeben war und deshalb spezielle Vorsicht bei der Ergebnisinterpretation geboten ist. Dies betrifft den maximalen Tageswert

des Niederschlages und die Trockendauer jeweils im Sommer.

Um zu untersuchen, inwieweit eine Veränderung der systematischen Messfehler mit steigender Temperatur die Trends beeinflusst, wurden die nach dem Verfahren von RICHTER (1995) korrigierten Niederschläge (siehe Kapitel 3.1.2) einer erneuten Trendanalyse unterzogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-4 für die dabei relevante Wintersaison dargestellt. Die Anzahl signifikanter Aufwärtstrends für alle Niederschlagsindizes ausgenommen der Trockendauer nimmt um 2% bis 18% ab. Die Indikatoren für die mittleren Niederschläge pav1 und pav0 sind mit 18% Abnahme dabei am stärksten betroffen. Es lässt sich schlussfolgern, dass die Niederschlagskorrektur zwar einen Einfluss auf die Trends hat, aber nicht das Gesamtbild einer generellen Niederschlagszunahme im Winter verändert.

Tabelle 3-4: Vergleich der Anzahl der Trends im Winter zwischen korrigierten und unkorrigierten Niederschlägen für alle Stationen

	Niederschlag unkorrigiert				Niederschlag korrigiert				Differenz			
	Sig Auf	Auf	Abw	Sig Abw	Sig Auf	Auf	Abw	Sig Abw	Sig Auf	Auf	Abw	Sig Abw
pq100	54	257	6	0	50	249	12	0	-4	-8	6	0
pq90	95	260	3	0	93	251	12	0	-2	-9	9	0
px5d	86	256	7	0	81	254	9	0	-5	-2	2	0
pav1	119	261	2	0	98	240	22	1	-21	-21	20	1
pav0	79	260	3	0	65	260	3	0	-14	0	0	0
pxcdd	0	221	39	0	6	140	121	2	6	-81	82	2
pfl90	67	259	4	0	64	255	5	0	-3	-4	1	0
pnl90	101	260	3	0	93	259	4	0	-8	-1	1	0

3.1.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Ergebnisse für die Temperatur lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Änderungen betragen im Mittel über ganz Niedersachsen für das Gesamtjahr ungefähr +1,6 Grad für die Extreme und +1,3 Grad für den Mittelwert. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der Frosttage um 23 Tage im Jahr ab und die Heat Wave Duration (Hitzewellendauer) um 15 Tage zu.
- Saisonal differenziert nimmt die Temperatur im Winter, Frühling und Sommer zu. Im Herbst ist nur die Zunahme der „Heat Wave Duration“ klar erkennbar.
- Ein räumliches Muster für die Temperaturindizes ist nicht sichtbar.

Für den Niederschlag lässt sich folgendes zusammenfassen:

- Es wurde eine Zunahme im Winter (größte Signifikanz), Frühjahr und Herbst und eine Abnahme im Sommer festgestellt. Komplementär nimmt die Trockendauer im Sommer zu und im Herbst ab.

- Die stärksten prozentualen Niederschlagszunahmen gemittelt über ganz Niedersachsen für Anteil und Anzahl großer Ereignisse sind im Winter zu finden.
- Räumlich gesehen sind Zunahmen für den Niederschlag vor allem im Norden und Süden und für die Trockendauer vor allem in der Mitte von Niedersachsen signifikant.
- Eine Korrektur des systematischen Messfehlers für den Niederschlag hat zwar einen Einfluss auf die Trends, verändert aber nicht das Gesamtbild.

Die Resultate dieser Untersuchung sind konsistent mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen in Deutschland. Regionalspezifische Besonderheiten wurden für die räumliche Verteilung der Trends und teilweise deren Stärke gefunden. Obwohl die Trends nicht einfach in die Zukunft extrapoliert werden dürfen, geben sie Hinweise auf potentielle zukünftige wasserwirtschaftliche Probleme und auf instationäres Verhalten von Wasserhaushaltsgrößen.

3.2 Auswertung von Klimamodellszenarien

Die mögliche Entwicklung der zukünftigen klimatischen Verhältnisse lässt sich aus den Klimamodelldaten des

betrachteten Klimamodell-Ensembles abschätzen, hier aus den Tageswert-Zeitreihen von WETTREG2006, REMO-UBA und REMO-BfG (alle Szenario A1B). Ähnlich wie in Kapitel 3.1 lässt sich eine relativ zuverlässige Aussage zu den Trends in der Zukunft nur machen, wenn dabei entsprechend ausreichend lange Zeiträume betrachtet werden. Grundsätzlich werden in der Klimaforschung Klimagrößen über Zeitscheiben von wenigstens 30 Jahren gemittelt und für unterschiedliche Perioden miteinander in Beziehung gesetzt. Als sogenannter Kontroll- oder Referenzzeitraum (auch mit C20 bezeichnet) wird in KliBiW hierzu die Periode von 1971 – 2000 herangezogen. Als Zukunftszeiträume werden zum einen eine „nahe Zukunft“ von 2021 – 2050 sowie eine „ferne Zukunft“ von 2071 – 2100 betrachtet. Es wird die Entwicklung der Klimagrößen mittlere Temperatur und mittlerer Jahresniederschlag analysiert. Deren Tendenzen können erste Hinweise auf mögliche Änderungen in der Hydrologie geben. Wegen der Nichtlinearität zwischen dem Klima und den resultierenden Abflüssen ist jedoch für konkrete Aussagen eine zusätzliche hydrologische Modellierung erforderlich (vgl. Kapitel 5.5). Zusätzlich wird das Änderungssignal extremer Niederschläge extremwertstatistisch analysiert. Hierzu werden mittels einer Verteilungsfunktion (Pearson3) die Quantile vorgegebener Wieder-

kehrintervalle (von $T = 2$ Jahre bis $T = 100$ Jahre) aus den Jahreshöchstwerten der Klimamodelldaten berechnet und über die jeweiligen 30-Jahres-Zeiträume gemittelt. Anschließend werden die Quantile der Zukunft mit denen des Referenzzeitraums verglichen.

Grundsätzlich kann eine Veränderung der mittleren Temperaturverhältnisse Auswirkungen auf die Verdunstung und somit auf den langjährigen Wasserhaushalt haben. Die Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 verdeutlichen die Bandbreite der Veränderung der Temperatur gegen Ende des 21. Jahrhundert im Sommer bzw. Winter gegenüber der Periode von 1971 – 2000 für ganz Niedersachsen anhand von Box-Whisker-Plots. Der rote Strich gibt dabei den Median der Werte an, die „Box“ den Bereich des 25%- bzw. 75%-Quantils, also die mittleren 50% aller Werte. Die gestrichelten Linien markieren die unteren bzw. oberen 25% aller Werte. Es wird deutlich, dass alle Modelle einen Anstieg der mittleren Temperaturen und somit ein robustes Temperatursignal aufzeigen. Die Bandbreite zwischen den Modellen liegt bei mehr oder weniger einem Kelvin (bezogen auf den Median), wobei alle Modelle im Winter eine deutlichere Zunahme projizieren (etwa +2,9 bis +3,6 Grad Celsius) als im Sommer (etwa +1,6 bis +2,8 Grad Celsius).

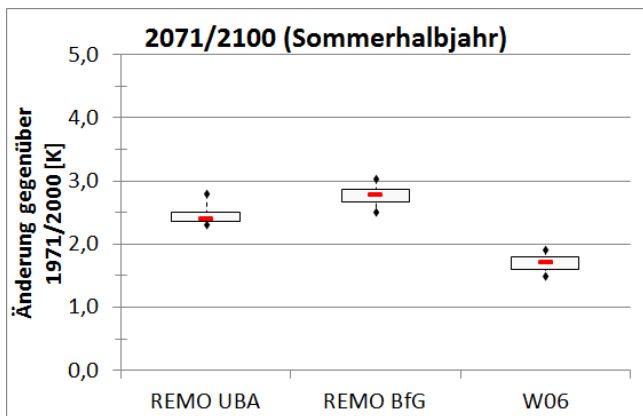


Abbildung 3-8: Änderungssignal der Mittleren Temperatur in der fernen Zukunft für Nds im Sommer

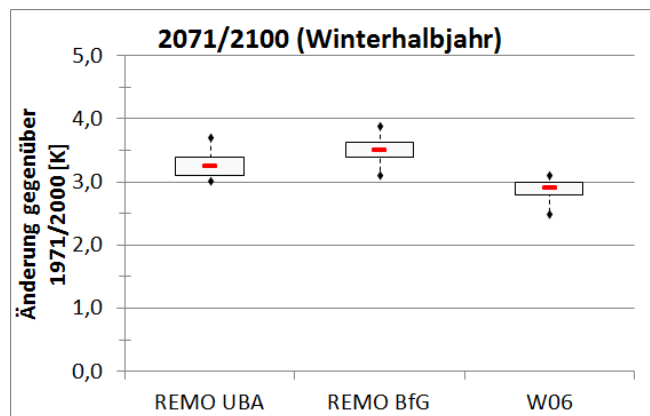


Abbildung 3-9: Änderungssignal der Mittleren Temperatur in der fernen Zukunft für Nds im Winter

Auch bei den Niederschlägen zeigen die drei Modelle für die ferne Zukunft relativ robuste, d.h. einheitliche Signale (vgl. Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11). Während im Sommerhalbjahr die Werte demnach um etwa -8 bis -12% in Niedersachsen abnehmen werden (einzelne Regionen können durchaus davon abweichen, wie die gepunkteten Linien der oberen bzw. unteren 25%-Quantile belegen), zeigt sich im Winter eine deutliche Zunahme um etwa +12 bis +22%. Diese Entwicklungen lassen bereits erste Vermutungen bzgl. der zukünftigen Entwicklungen des Wasserhaushaltes zu (Näheres hierzu siehe Kapitel 5.5). Im Vergleich zu den Entwicklungen der Temperaturen zeigen die Niederschläge jedoch eine deutlich größere Spannweite bei den „extremere“ Mittelwerten, was durch die Länge der gepunkteten Linien, deutlich wird. Für Niedersachsen bedeutet dies, dass es regional durchaus zu erheblichen Abweichungen vom mittleren Trend der Niederschläge kommen kann.

Die Analyse der Extreme wurde aufgrund des thematischen Schwerpunktes von KliBiW (Phase 2) bzgl. der Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserverhältnisse auf die Niederschläge beschränkt. Betrachtet wurden ausgewählte Teilgebiete im Aller-Leine-Gebiet (vgl. Abbildung 3-14), für die später auch die Auswertung der modellierten Abflüsse an den Pegeln erfolgte (vgl. Abbildung 5-3). Die Grundlage für die auszuwertenden Zeitreihen waren regionalisierte

Klimamodelldaten (vgl. Kapitel 3.4) aus denen entsprechende Gebietsmittel gebildet wurden.

Für die Gebietsmittel-Zeitreihen wurde jeweils eine extremwertstatistische Analyse mittels der Pearson3-Verteilung durchgeführt. Die Veränderungen der resultierenden Quantile dieser Zeitreihen, also die Änderung der Niederschlagsmengen bestimmter Jährlichkeiten (der Tageswerte), sind in Tabelle 3-5 und Tabelle 3-6 sowie Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13 jeweils für die nahe und ferne Zukunft dargestellt. Es zeigt sich, dass die Niederschlagsmengen grundsätzlich zunehmen. Diese Tendenz scheint in der fernen Zukunft etwas stärker ausgeprägt (im Mittel etwa +13 bis +17%) als in der nahen Zukunft (im Mittel etwa +10 bis +15%), allerdings sind auch die Spannweiten zwischen den Modellen, und damit die Unsicherheiten, hier größer, speziell bei den großen Extremereignissen. Hinsichtlich der räumlichen Differenzierung der Niederschlagssignale scheint es so, dass vor allem in Teilen des Einzugsgebiets der Leine und ihrer Nebengewässer in der fernen Zukunft die Zunahmen der seltenen Extremniederschläge deutliche und robuste Tendenzen aufweisen. Die Signale im Bereich der Aller scheinen hier weniger eindeutig. Für konkrete Aussagen sollten jedoch weitere Teilgebiete von Aller und Leine untersucht werden. Zudem sollten diese Tendenzen mit Ergebnissen anderer Untersuchungen, vor allem KLIFF / KLIFWA, verglichen werden.

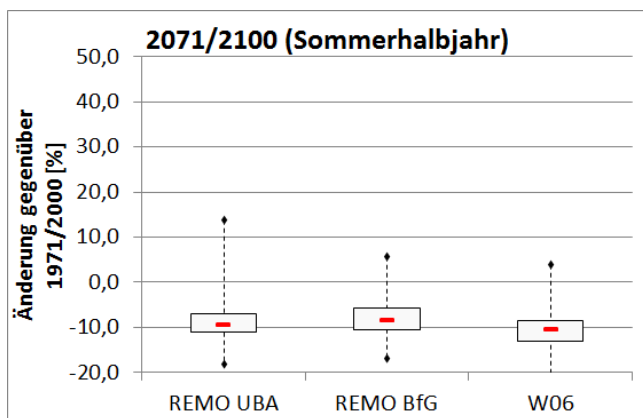


Abbildung 3-10: Änderungssignal der Niederschläge in der fernen Zukunft für Nds im Sommer

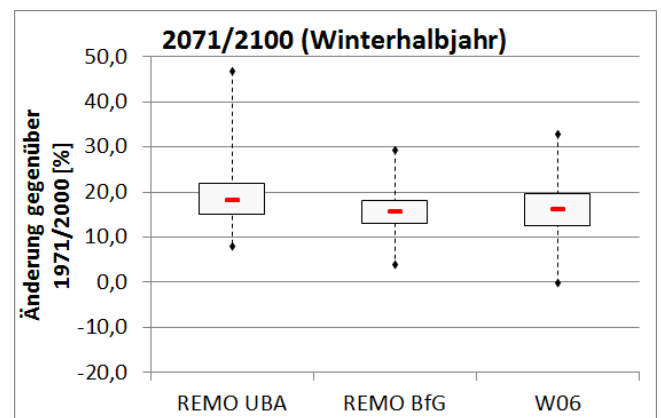


Abbildung 3-11: Änderungssignal der Niederschläge in der fernen Zukunft für Nds im Winter

Tabelle 3-5: Änderungssignal der Extremniederschläge für 2021/2050 gegenüber 1971/2000 (Median)

Gebiet	Jährlichkeit T					
	2	5	10	25	50	100
Aller-Leine						
Aller						
Leine						
Böhme						
Schunter						
Südaue						
Nette						
Sieber						
Obere Leine						

Tabelle 3-6: Änderungssignal der Extremniederschläge für 2071/2100 gegenüber 1971/2000 (Median)

Gebiet	Jährlichkeit T					
	2	5	10	25	50	100
Aller-Leine						
Aller						
Leine						
Böhme						
Schunter						
Südaue						
Nette						
Sieber						
Obere Leine						

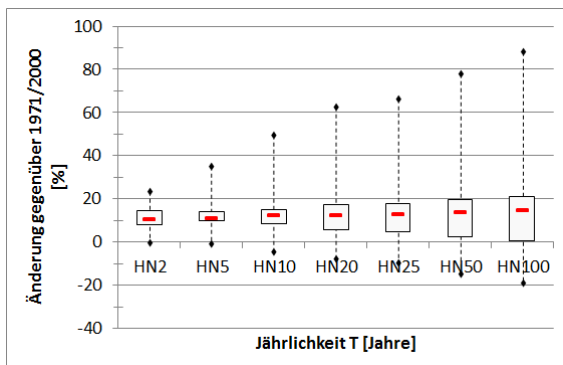
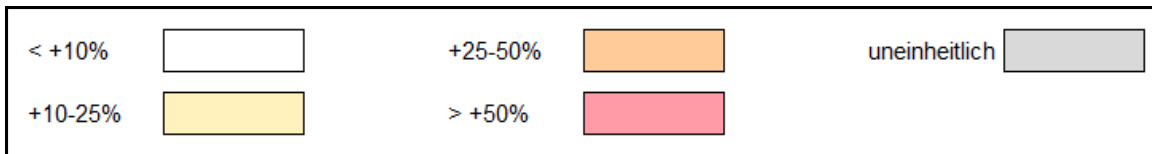


Abbildung 3-12: Box-Whisker-Plot der über alle Teilgebiete gemittelten Änderungen der Extremniederschläge (Tageswert) verschiedener Jährlichkeiten für 2021/2050 gegenüber 1971/2000

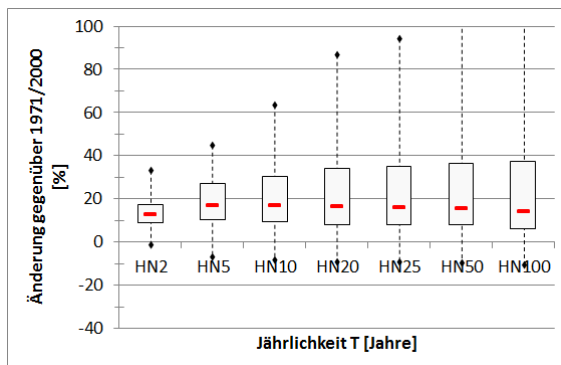


Abbildung 3-13: Box-Whisker-Plot der über alle Teilgebiete gemittelten Änderungen der Extremniederschläge (Tageswert) verschiedener Jährlichkeiten für 2071/2100 gegenüber 1971/2000

3.3 Validierung von Klimamodelldaten

3.3.1 Methoden

Klimamodelldaten sollten grundsätzlich in der Lage sein, die klimatischen Verhältnisse der Gegenwart und Zukunft repräsentativ darzustellen. Um zu prüfen, ob dies wirklich der Fall ist, können die Modelldaten zum einen unter dem Gesichtspunkt der Impactmodellierung mit beobachteten Klimazeitreihen verglichen bzw. validiert (z.B. Mittelwerte, Extreme). Aussagen zu der Modellgüte bzgl. des Zukunftszeitraumes können daraus

nicht automatisch abgeleitet werden, da diese u.a. auch von den physikalischen Modelleigenschaften abhängen, die zukünftigen Verhältnisse widerzuspiegeln, etwa veränderte Großwetterlagen (Bronstedt et al., 2007). Man kann jedoch davon ausgehen, dass die Wahrscheinlichkeit auf eine „realitätsnahe“ Darstellung der zukünftigen Verhältnisse grundsätzlich steigt, wenn die gegenwärtigen Verhältnisse hinreichend genau erfasst werden.

Das Ziel dieser Validierung ist es also, die Qualität der Wiedergabe ausgewählter „Klimaeigenschaften“ durch die Klimamodelldaten aufzuzeigen, die für die

Modellierung des Wasserhaushaltes relevant erscheinen. Die aufgezeigten Stärken und Schwächen der Daten sollen eine Interpretationshilfe bei den Analyseergebnissen und modellierten zukünftigen Veränderungen im Wasserhaushalt sein.

Entsprechend den Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamolldaten des gleichnamigen Bund-Länder-Fachgesprächs sollte bei der Betrachtung von Klimaentwicklungen eine möglichst große Bandbreite von Klimamodellen und Emissionsszenarien herangezogen werden (Modell-Ensemble). Ist dies nicht möglich, so wird empfohlen, sich auf das mittlere Szenario A1B zu konzentrieren und wenigstens zwei verschiedene Modelle (dynamisch, statistisch) als Antrieb zu nutzen.

Dieser Empfehlung folgend werden im Zuge des KliBiW-Projektes folgende Klimamolldaten für die Aufstellung eines Modell-Ensembles herangezogen:

- WETTREG2006 (C20, A1B)
- REMO UBA bzw. BfG (C20, A1B)

Die Validierung erfolgt über den Zeitraum 1971 – 2000 auf Basis von Tageswerten gemessener Stationsdaten des DWD (vom DWD geprüft). Als Betrachtungsräume dienen das Einzugsgebiet von Aller und Leine sowie ausgewählte Teilgebiete davon (vgl. Abbildung 3-14 und Tabelle 3-7). Für diese Gebiete werden aus den regionalisierten Beobachtungs- bzw. Klimamolldaten (Kapitel 3.4) zunächst Gebietsmittelzeitreihen gebildet. Anhand dieser Zeitreihen erfolgt anschließend eine Bewertung der Modellgüte für folgende „Kenngrößen“:

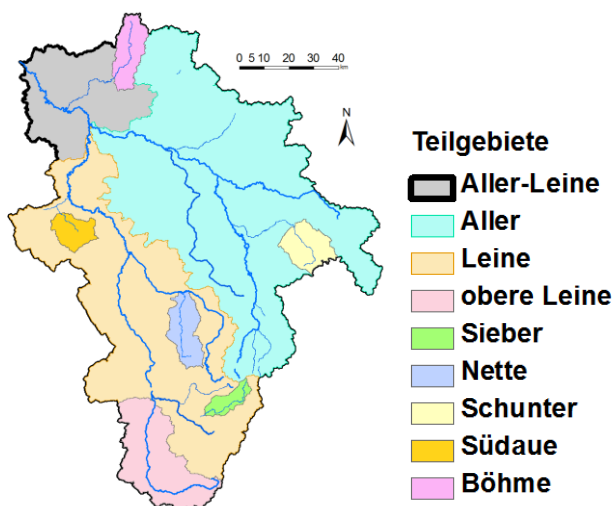


Abbildung 3-14: Übersicht über die Teilgebiete der Validierung

- Mittelwerte von Niederschlag und Temperatur (→ Wasserhaushalt)
- Extremwerte von Niederschlag (→ Hochwasser)
- Trockenphasen mit Tages-Niederschlag < 0,1mm (→ Niedrigwasser)

Als Gütekriterien für die Bewertung werden folgende Werte herangezogen:

Root Mean Square Error (RMSE) bei Reihenwerten:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim}^i - X_{obs}^i)^2}{n}} \quad [3-4]$$

mit X_{sim} : Wert aus der Simulation
 X_{obs} : Wert aus der Beobachtung
n: Anzahl der Werte

Prozentuale Abweichung (PA) bei Einzelwerten:

$$PA = \frac{X_{sim} - X_{obs}}{|X_{obs}|} * 100 \quad [3-5]$$

mit X_{sim} : Wert aus der Simulation
 X_{obs} : Wert aus der Beobachtung

Tabelle 3-7: Kenngrößen der Teilgebiete der Validierung

Gebiet	Größe [km ²]	mittlere Höhe [mNN]
Aller-Leine	15,73	129,7
Aller	7,42	94,9
Leine	6,45	194,2
Obere Leine	0,99	244,5
Böhme	0,29	76,7
Nette	0,3	207,9
Schunter	0,29	137,5
Sieber	0,13	479,7
Südaue	0,19	92,7

3.3.2 Ergebnisse

Exemplarisch werden an dieser Stelle graphisch die Ergebnisse für das Einzugsgebiet von Aller und Leine dargestellt sowie die zugehörigen Gütekriterien für alle Teilgebiete. Eine detaillierte Darstellung aller Ergebnisse ist in Anhang 3 bis Anhang 8, zu finden.

Die Tabelle 3-8 bis Tabelle 3-12 belegen, dass die Modelle hinsichtlich der Wiedergabe der Mitteltemperaturen durchaus Unterschiede aufweisen. Die beiden

REMO-Datensätze fallen im Frühjahr (UBA) und Herbst (UBA und BfG) mit einer deutlichen Überschätzung gegenüber der Beobachtung auf (Tabelle 3-10).

Auch bei den mittleren Niederschlagssummen zeigen beide REMO-Datensätze eine grundsätzlich schlechtere Modellgüte als WETTREG2006 (vgl. Tabelle 3-9 und Tabelle 3-13). Vor allem im Sommer kommt es zu erheblichen Überschätzungen von mehr als +20% (UBA) bzw. mehr als +30% (BfG) gegenüber der Beobachtung (vgl. Tabelle 3-11).

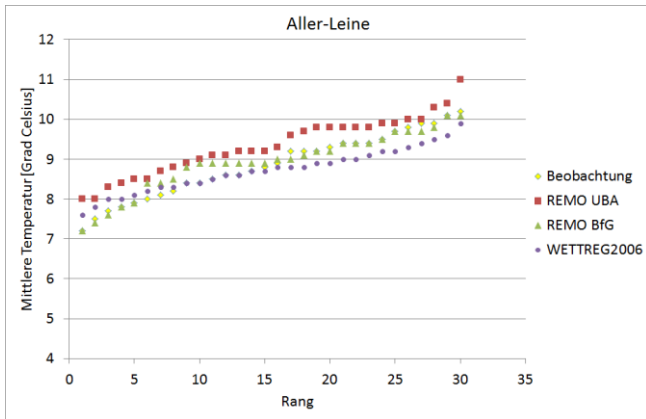


Abbildung 3-15: Nach Größe sortierte Jahresmitteltemperaturen für das Teilgebiet Aller-Leine

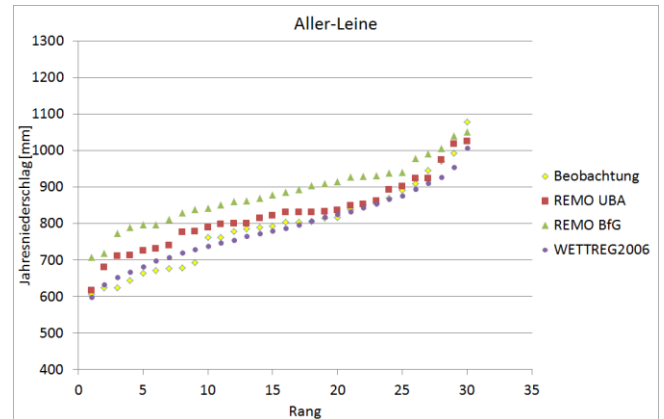


Abbildung 3-16: Nach Größe sortierte Jahresniederschlagssummen für das Teilgebiet Aller-Leine

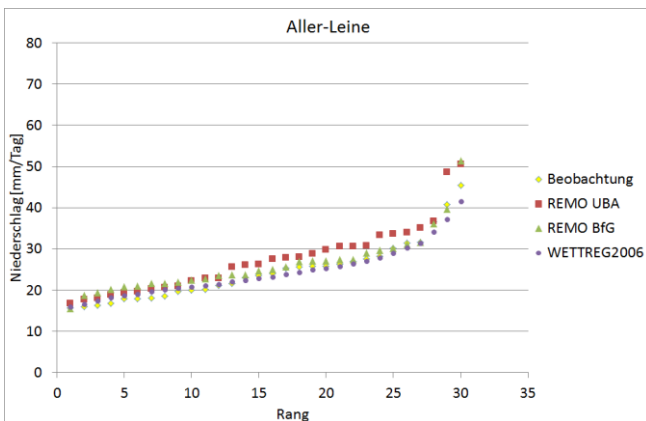


Abbildung 3-17: Nach Größe sortierte Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge für das Teilgebiet Aller-Leine

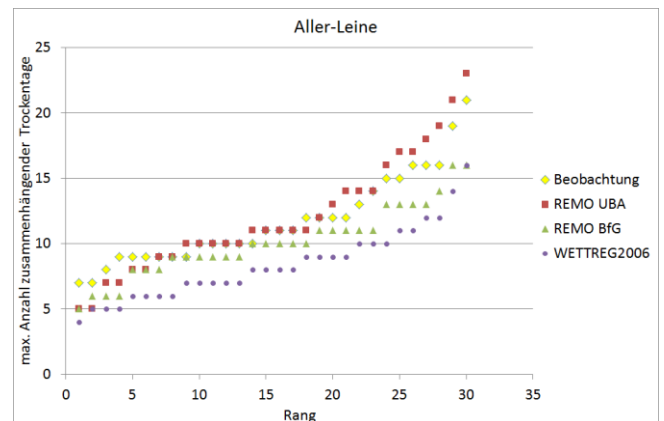


Abbildung 3-18: Nach Größe sortierte max. Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (N < 0,1mm) für das Teilgebiet Aller-Leine

Tabelle 3-8: RMSE der nach Größe sortierten Jahresmitteltemperaturen

TEZG	UBA	BfG	W06
Aller-Leine	0.5	0.2	0.3
Aller	0.5	0.2	0.3
Leine	0.5	0.2	0.3
Obere Leine	0.8	0.4	0.2
Böhme	0.5	0.2	0.3
Nette	0.6	0.2	0.3
Schunter	0.5	0.2	0.4
Sieber	0.4	0.2	0.3
Südaue	0.5	0.2	0.4

Tabelle 3-9: RMSE der nach Größe sortierten Jahresniederschlagssummen

TEZG	UBA	BfG	W06
Aller-Leine	43	97	25
Aller	52	106	18
Leine	47	90	36
Obere Leine	75	77	52
Böhme	42	68	29
Nette	59	65	35
Schunter	87	139	48
Sieber	105	141	95
Südaue	41	113	21

Tabelle 3-10: Absolute Abweichung (in K) der saisonalen Mitteltemperaturen von der Beobachtung

Saison	UBA	BfG	W06
MAM	1.3	0.1	-0.1
JJA	0.0	-0.2	0.1
SON	0.9	0.7	-0.1
DJF	-0.2	-0.3	-0.4

Tabelle 3-11: Abweichung (in %) der saisonalen mittleren Niederschläge von der Beobachtung

Saison	UBA	BfG	W06
MAM	-1.5	5.5	3.7
JJA	22.4	33.1	-3.1
SON	-8.6	-1.3	-2.0
DJF	-3.7	0.5	-3.8

Tabelle 3-12: RMSE der Monatsmitteltemperaturen

TEZG	UBA	BfG	W06
Aller-Leine	0.9	0.6	0.3
Aller	0.9	0.6	0.3
Leine	0.9	0.6	0.2
Obere Leine	1.1	0.7	0.2
Böhme	0.9	0.7	0.3
Nette	1.0	0.6	0.2
Schunter	1.0	0.6	0.3
Sieber	0.9	0.6	0.3
Südaue	0.9	0.6	0.3

Tabelle 3-13: RMSE der mittleren Monatsniederschläge

TEZG	UBA	BfG	W06
Aller-Leine	14.4	15.7	2.8
Aller	14.1	15.9	2.7
Leine	14.6	15.6	3.0
Obere Leine	13.7	14.5	2.5
Böhme	16.8	17.5	4.2
Nette	14.0	12.9	3.6
Schunter	13.7	17.5	4.8
Sieber	23.3	24.7	7.4
Südaue	15.6	18.0	3.0

Die Extremniederschläge werden von allen Modellen mit grundsätzlich ausreichender Qualität wiedergegeben, wobei auch bei diesem Kriterium WETTREG2006 leichte Vorteile gegenüber den REMO-Datensätzen aufweist (vgl. Tabelle 3-14). Allerdings zeigen alle Modelle mit Zunahme der Extremwerte auch meist eine Zunahme der Abweichungen gegenüber der Beobachtung.

Bei der Abbildung der Trockenverhältnisse zeigen die REMO-Daten eine deutlich bessere Modellgüte als WETTREG2006, sowohl bei der Gesamtanzahl der Trockentage pro Jahr (Tabelle 3-16) als auch bei der Dauer der maximalen Trockenperioden (Tabelle 3-15).

Eine qualitative Zusammenfassung der Ergebnisse (vgl. Abbildung 3-19) zeigt, dass jedes Modell die betrachteten hydrologisch relevanten Eigenschaften im C20-Zeitraum (1971 – 2000) mal besser und mal schlechter darstellt bzw. entsprechend Stärken und Schwächen aufweist. So kann WETTREG2006 bei-

spielsweise die beobachteten Jahrestemperaturen bzw. -niederschläge verhältnismäßig gut wiedergeben, unterschätzt dagegen die Trockenphasen erheblich (vgl. Tabelle 3-16). REMO wiederum hat in der Version UBA Schwierigkeiten mit den Mitteltemperaturen (vgl. Tabelle 3-10), in der Version BfG (aber auch bei UBA) fällt vor allem die extreme Überschätzung der saisonalen Niederschlagsmengen auf (vgl. Tabelle 3-11).

Ein räumliches Muster oder ein Bezug zur Topographie bzw. Größe der Teilgebiete ist bei der Bewertung der Modellgüten nicht zu erkennen. Keines der Modelle für sich alleine ist in der Lage, alle geforderten Eigenschaften ausreichend gut wiederzugeben. Unter der Annahme, dass diese Charakteristika auch bei den Klimaszenarien erhalten bleiben, können die Klimamodelldaten nur als Ensemble betrachtet werden, um eine Bandbreite der möglichen Entwicklung sowie ggf. eine Robustheit des Klimasignals in der Zukunft (bei der Modellierung des Wasserhaushalts) zu verdeutlichen.

Tabelle 3-14: RMSE der nach Größe sortierten Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge

TEZG	UBA	BfG	W06
Aller-Leine	3.2	2.2	1.4
Aller	3.4	3.0	1.6
Leine	4.4	3.3	2.0
Obere Leine	4.9	4.9	3.2
Böhme	5.8	7.7	2.7
Nette	3.9	5.1	2.3
Schunter	6.1	6.2	3.3
Sieber	15.3	7.5	2.3
Südaue	4.6	5.5	2.6

Tabelle 3-15: RMSE der nach Größe sortierten max. Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage ($N < 0,1\text{mm}$)

TEZG	UBA	BfG	W06
Aller-Leine	1.3	1.9	3.4
Aller	0.9	1.8	3.4
Leine	1.6	1.7	3.4
obere Leine	1.6	1.5	3.9
Böhme	1.7	2.7	4.7
Nette	1.6	2.4	3.7
Schunter	1.2	2.6	4.1
Sieber	2.7	1.6	2.8
Südaue	1.0	1.8	3.5

Tabelle 3-16: Abweichung (in %) der mittleren Anzahl an Trockentagen ($N < 0,1\text{mm}$) pro Jahr von der Beobachtung

TEZG	UBA	BfG	W06
Aller-Leine	-9.8	-18.9	-44.3
Aller	-9.2	-19.2	-43.1
Leine	-7.1	-15.9	-43.7
Obere Leine	0.0	-9.0	-40.7
Böhme	-5.6	-11.8	-38.9
Nette	-6.8	-15.1	-41.8
Schunter	-9.6	-19.1	-40.8
Sieber	-2.3	-10.9	-46.1
Südaue	-8.2	-16.3	-39.5

	REMO UBA	REMO BfG	WETTREG2006
Temperatur Jahresmittel	+	o	o
Temperatur Monatsmittel	o	o	o
Niederschlag Jahressumme	o	+	o
Niederschlag Monatssumme	o	o	-
Niederschlag Extremwerte	o	o	-
Trockentage	-	-	-
Trockenperioden	o	-	-

gut
 mittel
 schlecht

+ überschätzen
 o nicht eindeutig
 - unterschätzen

Abbildung 3-19: qualitative Bewertung der Modellgüte von WETTREG2006, REMO-UBA und REMO-BfG anhand von Beobachtungsdaten für den C20-Zeitraum (1971 – 2000)

Auf die gleiche Weise wurde zuvor auch der Klimamodell Datensatz WETTREG2010 hinsichtlich seiner Güte untersucht. Da die WETTREG-Modelle aufgrund ihrer statistischen Eigenschaften eine Vielzahl von Realisationen zur Verfügung stellen, konnte aus Gründen der Verarbeitungsdauer lediglich eine Version in KliBiW berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Validierung der beiden WETTREG-Modelle sind in Abbildung 3-20

zu sehen. Aufgrund der etwas besseren Wiedergabe der mittleren Temperaturwerte bei WETTREG2006 sowie vor allem den z.T. extremen Spannweiten zwischen den Realisationen von WETTREG2010 bei den Extremniederschlägen, wurde der Datensatz von WETTREG2006, neben REMO-UBA und REMO-BfG, für das zu betrachtende Modell-Ensemble in KliBiW (Phase 2) ausgewählt.

	WETTREG2006	WETTREG2010
Temperatur Mittelwerte	o	o
Niederschlag Mittelwerte	-	+
Niederschlag Extremwerte	-	-
Trockentage / -perioden	-	--

gut
 mittel
 schlecht

+ überschätzen
 o nicht eindeutig
 - unterschätzen

Abbildung 3-20: qualitative Bewertung der Modellgüte von WETTREG2006 und WETTREG2010 anhand von Beobachtungsdaten für den C20-Zeitraum (1971 – 2000)

3.4 Regionalisierung von Klimadaten

3.4.1 Einleitung und Ziel

Viele an oder nahe an der Erdoberfläche ablaufende Prozesse sind durch Klimagrößen wie Temperatur und Niederschlag beeinflusst. Daher werden Zeitreihen der klimarelevanten Größen als Eingangsdaten für fachspezifische Wirkmodelle benötigt. Für die Simulation des Wasserhaushaltes von Flussgebieten sind dies beispielsweise Zeitreihen täglicher Werte des Niederschlags, der Lufttemperatur (Minimum, Maximum, Mittelwert), der Sonnenscheindauer bzw. der Globalstrahlung, der Luftfeuchte sowie der Windgeschwindigkeit.

Die in Deutschland wichtigste Datenbasis dafür bilden die vom DWD gemessenen Werte an Klima- und Niederschlagsstationen (Punktwerte). Für mittel- und großskalige Betrachtungen (Gebiete von etwa 100 km² bis zu mehreren 10000 km²) werden in der Regel flächenhafte Werte der Eingangsgrößen benötigt, z. B. Teilgebietsmittelwerte der Klimavariablen. Die räumliche Abgrenzung dieser Teilgebiete ergibt sich eher aus der räumlichen Diskretisierung der Modelle als aus der Lage der Klimastationen. Wenn nicht a priori bekannt ist, für welche Flächen Gebietswerte benötigt werden, ist es ein gängiges Verfahren, aus den Stationszeitreihen für jeden Zeitschritt durch Interpolation im Raum ein relativ hoch aufgelöstes Raster der Klimagrößen zu berechnen.

Für Untersuchungen, ob und wie sich der Wasserhaushalt in den kommenden Jahrzehnten ändern wird, sind die bereits angesprochenen Klimafaktoren als Randbedingungen notwendig. Diese werden aus globalen Klimamodellen gewonnen. Deren räumliche Auflösung ist jedoch meist zu grobskalig, sodass für wasserwirtschaftliche Betrachtungen in der Regel ein Herunterskalieren („Downscaling“) der Klimadaten erforderlich ist. Der Ausgangspunkt für die verwendeten Downscaling-Datensätze ist das globale Klimamodell ECHAM5 (Roeckner et al., 2003, Marsland et al., 2003) mit einer Auflösung von ca. 200 km. Die zur Regionalisierung genutzten Downscaling-Datensätze sind REMO und WETTREG 2006. Das regionale Klimamodell REMO (BfG- und UBA-Realisierung, Jacob et al., 2008) liefert ein dynamisches Downscaling. Das Ergebnis sind Daten auf einem 10 x 10 km-Raster in geographischen (krummlinigen) Koordinaten. Der WETTREG-Datensatz (20 Realisierungen, Spekat et al.,

2007) wurde durch ein statistisches Herunterskalieren auf Grundlage eines Resamplings von Beobachtungsdaten in Abhängigkeit von Großwetterlagen erhalten. Diese Werte liegen für Standorte von Beobachtungsdaten vor. Sowohl der REMO- als auch der WETTREG-Datensatz verfügen über einen C20-Kontrolllauf (WETTREG: 1961-2000, REMO: 1951-2000) und einen zukünftigen Zeitraum („A1B-Szenario“, 2001-2100). Für diese Ausgangsdatsätze wurden durch unterschiedliche Interpolationsmethoden kartesische Rasterdatensätze von WETTREG (Tageswerte) und REMO (Stunden- und Tageswerte) sowohl für die Vergangenheit als auch die Zukunft erzeugt.

3.4.2 Methodik

3.4.2.1. Allgemeines

In den folgenden Ausführungen erfolgt eine kurze Beschreibung der verwendeten Verfahren. Für eine ausführliche Erklärung wird an dieser Stelle auf Haberlandt et al. (2011) verwiesen.

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 Windstärke sondern 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 sondern die Globalstrahlung als Eingangsdaten benötigen, 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 Tagestemperatur (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.

3.4.2.2. Interpolation und Validierung

Es gibt mehrere Methoden, welche sich zur Interpolation von Klimagrößen eignen. Ausgangspunkt für die Auswahl der jeweils besten Methode für jede Klimagröße war ein Vergleich verschiedener Verfahren auf Basis von Kreuzvalidierungen für einen fünfjährigen Ausschnitt aus der Gesamtzeitreihe (Jan/1981 – Dez/1986). Folgende Verfahren wurden hierbei verwendet:

- Thiessen-Polygon bzw. Nächster Nachbar (NN),
- Inverse Distanz in Form des Quadrantenverfahrens (INVD),
- Ordinary Kriging (OK) und
- External Drift Kriging (EDK).

Für eine genauere Beschreibung wird an dieser Stelle auf Haberlandt et al. (2011) verwiesen. Die geostatistischen Methoden (OK und EDK) erfordern im Vorfeld der Interpolation eine Variogrammschätzung, d. h. eine Bewertung der räumlichen Variabilität der Messgröße. EDK bietet im Vergleich zu OK den Vorteil, dass Sekundärinformationen, wie z. B. die geodätische Höhe, für die Interpolation mit verwendet werden können. Die Interpolationsgüte der oben beschriebenen Verfahren wird mit Hilfe von Kreuzvalidierungen evaluiert. Hierbei werden sukzessive für jeden Beobachtungspunkt aus den bekannten Nachbarpunkten Schätzwerte interpoliert, ohne dass der Wert am jeweiligen Zielpunkt selbst mit verwendet wird. Anschließend erfolgt ein Vergleich der beobachteten Werte $Z(u)$ mit den interpolierten Werten $Z^*(u)$. Als Gütekriterium finden dabei die nachfolgend aufgeführten Maße Anwendung:

die mittlere Abweichung (Bias)

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(u_i) - Z(u_i)) , \quad [3-6]$$

der mit dem Mittelwert normierte Standardfehler (SE)

$$\text{SE} / \text{AVG} = \frac{1}{\bar{Z}(u_i)} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(u_i) - Z(u_i))^2} , \quad [3-7]$$

das Nash-Sutcliffe Effizienz-Kriterium (NSC)

$$\text{NSC} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z(u_i) - Z^*(u_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z(u_i) - \bar{Z}(u))^2} . \quad [3-8]$$

3.4.3 Interpolation der Beobachtungsdaten

In Abbildung 3-21 wird die Lage der für diese Studie verfügbaren Stationen dargestellt. Insgesamt wurden Zeitreihen von 771 Niederschlagsstationen und 123 Stationen für die anderen Klimagrößen im Zeitraum zwischen Januar 1951 und April 2009 verwendet.

Die Abbildung 3-22 zeigt die Ergebnisse der Kreuzvalidierung für den Zeitraum von 1981 bis 1985. Hierbei werden die vier verschiedenen Interpolationsverfahren und die Variablen Niederschlag (pcp), Min/Max/Mittel der Lufttemperatur (tmi/tma/tav), relative Luftfeuchte (hum), Sonnenscheindauer (sun) sowie Windgeschwindigkeit (win) miteinander verglichen. Es ist hier lediglich das Nash-Sutcliffe Effizienzkriterium dargestellt, die Auswertung der weiteren Gütekriterien ist in Haberlandt et al. (2011) enthalten. Für tmi und tma wurde die Kreuzvalidierung nicht mit der absoluten Temperatur, sondern mit der Differenz zu tav durchgeführt (siehe hierzu auch Kapitel 3.4.2). Unter Berücksichtigung aller drei Validierungskriterien ergibt sich EDK als beste Interpolationsmethode für Temperatur und Luftfeuchte, wobei ein digitales Höhenmodell von Niedersachsen als Zusatzinformation verwendet wurde. Für die Interpolation des Niederschlags liefert die Verwendung des EDK gegenüber dem OK keine Verbesserung, sodass hier das einfachere OK zu bevorzugen ist. Generell ist die Interpolationsgüte der Windgeschwindigkeit deutlich schlechter als für die anderen Variablen. Dies liegt darin begründet, dass Wind in viel stärkerem Maße kleinräumigen Einflüssen unterworfen ist als beispielsweise die Temperatur oder die Sonnenscheindauer.

Für die endgültige Interpolation auf ein 1 x 1 km Raster wurde jeweils das nach Abbildung 3-22 beste Verfahren mit einem mittleren konstanten Variogramm verwendet. Beim OK wurden für die Interpolation 6 bis 12 Nachbarn pro Station berücksichtigt, beim EDK 8 bis 16 Nachbarn. Für die Auswahl der heranzuziehenden Stationen wurde einheitlich ein Radius von 300 km verwendet.

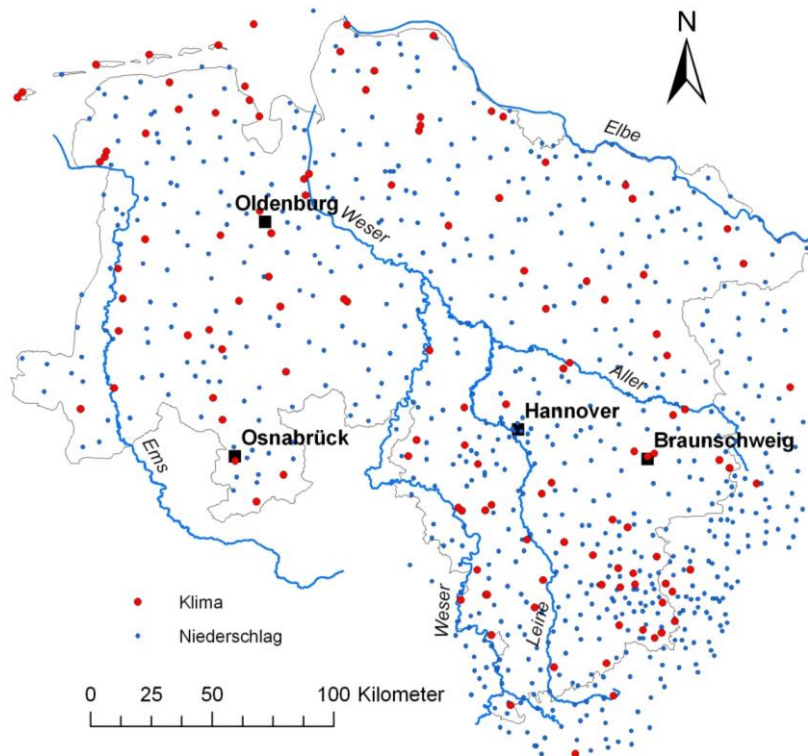


Abbildung 3-21: Für die Interpolation der Beobachtungsdaten verwendete Niederschlags- und Klimastationen in Niedersachsen

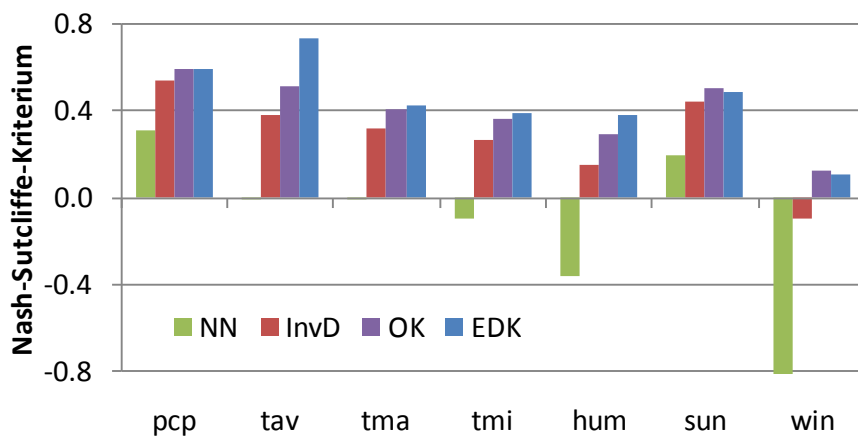


Abbildung 3-22: Kreuzvalidierung der Interpolationsverfahren unter Angabe des Nash-Sutcliffe-Effizienz-Kriteriums für den Zeitraum von 1981 bis 1985

Die für die Interpolation ermittelten Variogramme für Niederschlag und Temperatur sind in Abbildung 3-23 dargestellt. Während das Variogramm für den Niederschlag einen Einflussbereich von 69 km aufweist, besteht für Temperatur in der räumlichen Struktur eine

höhere Persistenz, welches an dem mit 180 km deutlich größeren Einflussbereichen zu erkennen ist. Die Variogramme der weiteren Klimavariablen sind in Haberlandt et al. (2011) aufgeführt enthalten.

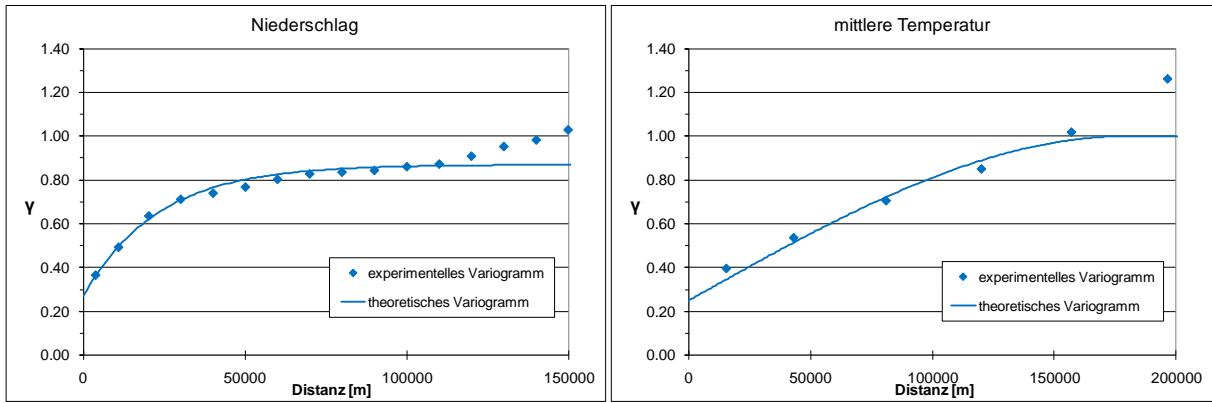
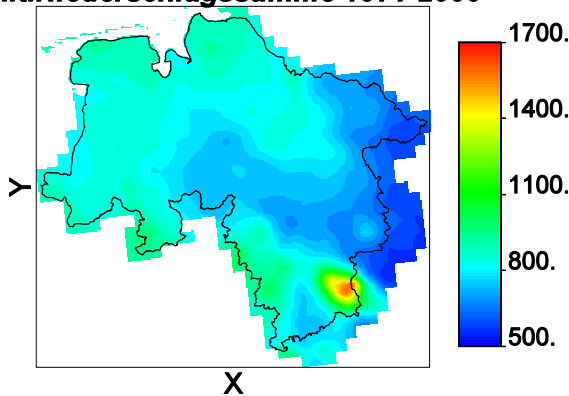


Abbildung 3-23: Mit der Varianz normierte und über den Gesamtzeitraum gemittelte experimentelle und theoretische Variogramme für die Interpolation der Beobachtungsdaten

Mit. Niederschlagssumme 1971-2000



Mit. Temperatur 1971-2000

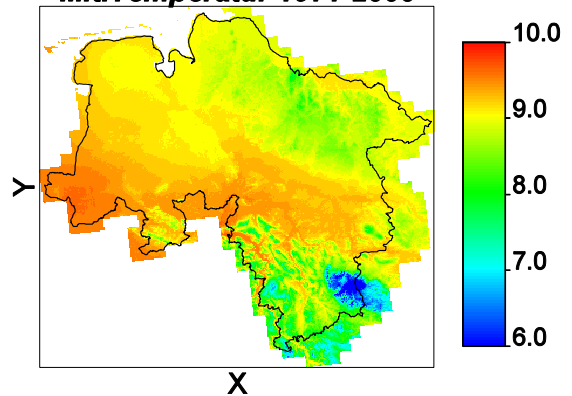


Abbildung 3-24: Räumliche Verteilung der interpolierten Klimavariablen pcp und tav für Niedersachsen, aggregiert aus täglichen Rasterkarten für die Jahre 1971-2000 (pcp in mm/a; tav in °C)

Die Abbildung 3-24 zeigt für den Niederschlag und die mittlere Tagestemperatur aus täglichen interpolierten Werten aggregierte Karten von Mittelwerten über den Zeitraum 1971-2000.

Zur weiteren Überprüfung der Güte der Interpolationsergebnisse wurden für ausgewählte Stationen die interpolierten Zeitreihen des die Station enthaltenden Rasterpixels mit der gemessenen Reihe anhand von Scatterplots verglichen. Abbildung 3-25 zeigt beispielhaft einen solchen Scatterplot für Niederschlag an der Station Göttingen.

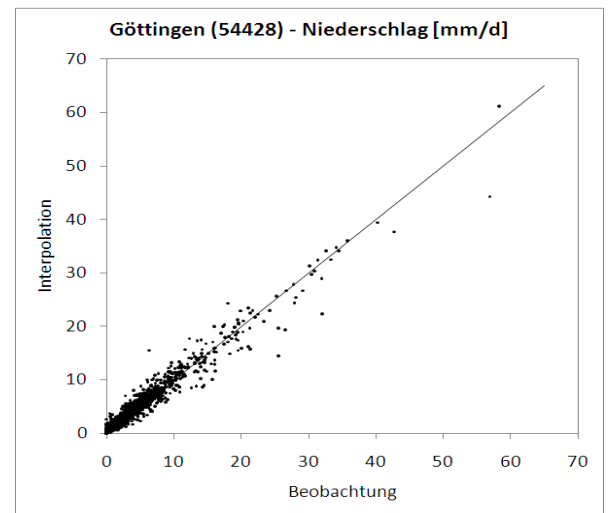


Abbildung 3-25: Scatterplot zum Vergleich von Interpolation und Messung für Niederschlag an der Station Göttingen, im Zeitraum 1951-1960

3.4.4 Interpolation der WETTREG-Szenarien

Interpoliert wurden hier Daten für den Kontrolllauf 20C (1961 - 2000) und das SRES-Szenario A1B (2001 - 2100). Zur Erhöhung der statistischen Sicherheit wurden von WETTREG für jede Dekade zehn Realisationen bereitgestellt, wobei zusätzlich jede Dekade durch eine Zeitreihe von 7300 Tagen (20 Jahre) repräsentiert wird. Für die hier beschriebene Regionalisierung wurde angenommen, dass jeweils 20 Realisierungen zu 10 Jahre für die zwei Perioden vorhanden sind. Insgesamt stehen 297 Niederschlags- und 66 Klimastationen aus dem WETTREG Datensatz für die Interpolation zur Verfügung. Die Abbildung 3-26 und Abbildung 3-27 geben einen Überblick über die geographische Lage der WETTREG-Stationen.

Für die Interpolation der WETTREG Klimadaten wurde mit einer Auflösung von 5 x 5 km eine geringere Rasterauflösung als bei der Interpolation der Beobachtungsdaten gewählt (1 x 1 km). Es wurden im Wesentlichen die gleichen Methoden und Vorgehensweisen

bezüglich der Niederschlagskorrektur, der Umwandlung von Sonnenscheindauer in Globalstrahlung, der Umrechnung der Windstärke in Windgeschwindigkeit und der Temperaturinterpolation wie bei der Regionalisierung der Beobachtungsdaten verwendet. Es wurde für alle Realisationen einer Variablen das gleiche theoretische Variogramm verwendet, da eine nahezu vollkommene Übereinstimmung der experimentellen Variogramme für die unterschiedlichen Realisationen festgestellt wurde. Ebenfalls wurde eine ziemlich genaue Übereinstimmung zu den Variogrammen des Szenarios A1B beobachtet. In Abbildung 3-28 sind die Variogramme für Niederschlag und mittlere Tagestemperatur für den Zeitraum 1961 bis 2000 dargestellt.

Die Überprüfung der Interpolationsgüte erfolgt anhand der in Kapitel 3.4.2.2 beschriebenen Kreuzvalidierung und der entsprechenden Kriterien. Abbildung 3-29 enthält eine Darstellung der Ergebnisse der Kreuzvalidierung (NSC) für die erste Realisation des 20C-Kontroll-laufs. Die Kreuzvalidierung wurde jeweils nur für einen fünfjährigen Ausschnitt aus den Gesamtzeitreihen durchgeführt (20C: 1981 - 1985).

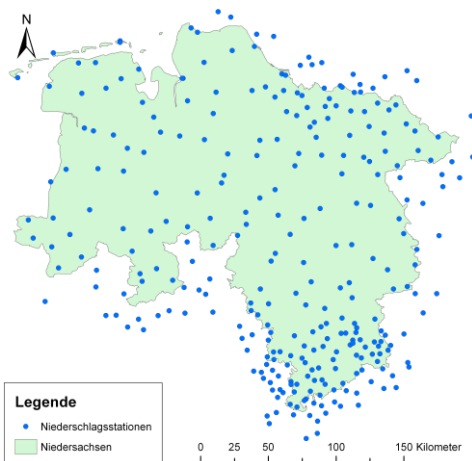


Abbildung 3-26: WETTREG2006-Stationen - Niederschlag

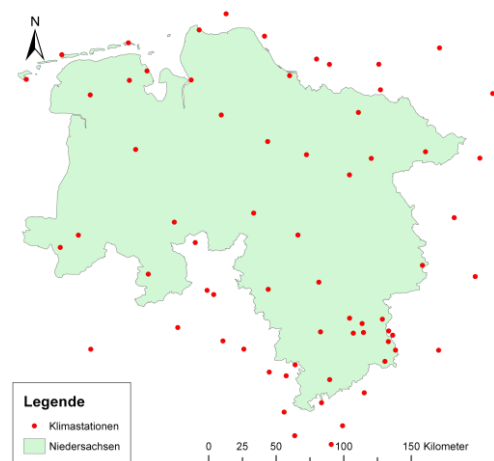


Abbildung 3-27: WETTREG2006-Stationen - weitere Klimavariablen

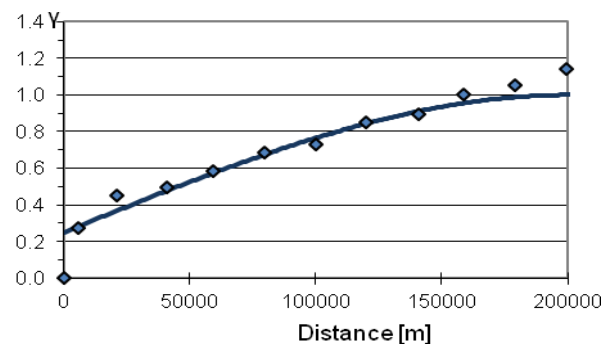
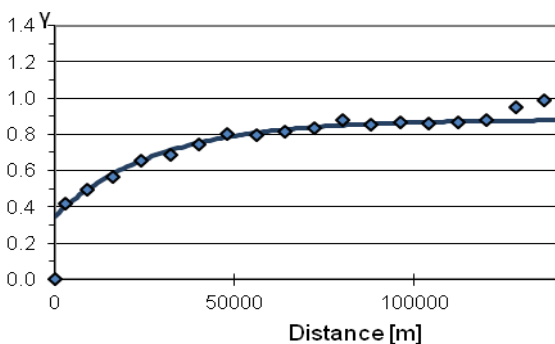


Abbildung 3-28: Mit der Varianz normierte und über den Gesamtzeitraum gemittelte experimentelle und theoretische Variogramme für die Interpolation der WETTREG-Daten (20C); links: Niederschlag, rechts: Temperatur

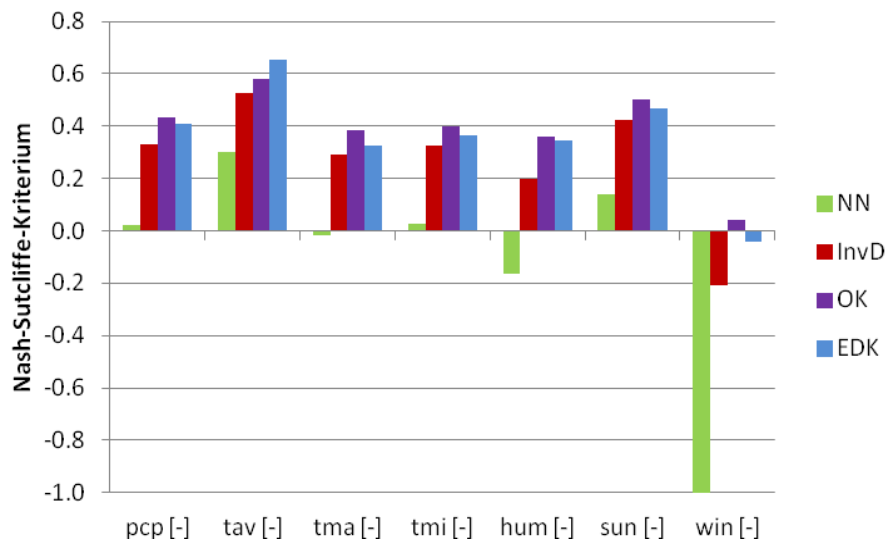


Abbildung 3-29: Ergebnisse der Kreuzvalidierung für WETTREG 2006 für den Zeitraum 1961-2000 (20C, Abkürzungen siehe Kapitel 3.4.3)

Das Verfahren OK liefert bei fast allen Klimavariablen die besten Ergebnisse. Lediglich für die mittlere Tagestemperatur (tav) ist External Drift Kriging (EDK) zu bevorzugen. Es wurde jeweils das Verfahren mit dem besten Ergebnis für die nachfolgende Interpolation der WETTREG-Daten auf das 5 x 5 km Raster verwendet. In Analogie zur Interpolation der Beobachtungsdaten wurde die Interpolation der WETTREG-Daten mit 6 bis 12 Nachbarstationen (OK) bzw. 8 bis 16 Nachbarstationen (EDK) durchgeführt.

Die geringere Interpolationsgüte im Vergleich zur Interpolation der Beobachtungsdaten resultiert hauptsächlich aus einer im Allgemeinen geringeren Stati-

onsdichte (vgl. Haberlandt et al., 2011). Die Interpolationsgüte für die Klimavariablen Windgeschwindigkeit ist mit einem Nash-Sutcliffe Wert von ca. 0.05 sehr schwach.

Die räumliche Verteilung für Niederschlag und mittlere Tagestemperatur, gemittelt über den Zeitraum 1961-2000 (20C) aus der ersten Realisation, ist in Abbildung 3-30 dargestellt.

Die Plausibilität der Interpolationsraster wurde analog zu den Beobachtungsdaten durch Scatterplots an ausgewählten Punkten geprüft (siehe Haberlandt et al., 2011).

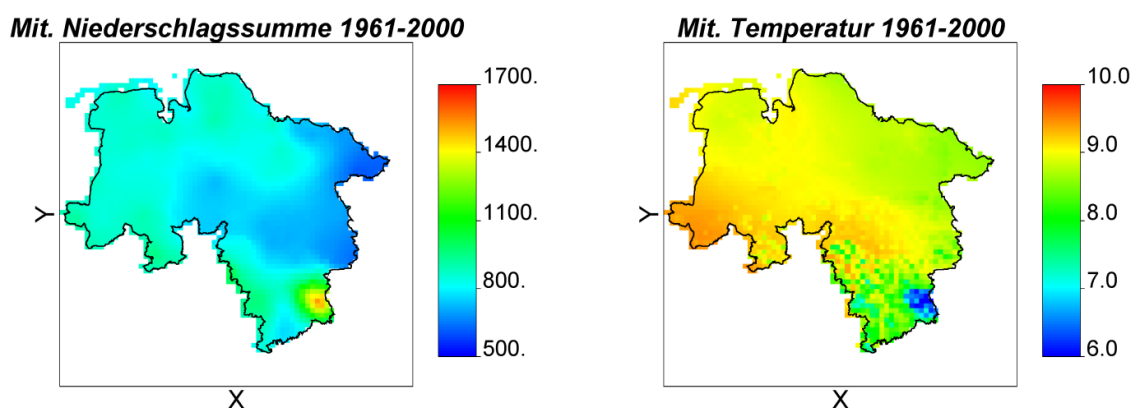


Abbildung 3-30: Räumliche Verteilung der WETTREG 2006 Klimavariablen für die erste Realisation, gemittelt über den Zeitraum 1961-2000 (pcp in mm/a; tav in °C)

3.4.5 Interpolation der REMO-Szenarien

Zum Zeitpunkt dieses Berichtes standen von drei existierenden REMO-Realisationen zwei Datensätze zur Verfügung (Lauf1: REMO-UBA, Lauf2: REMO-BfG). Die drei REMO-Realisationen werden von drei verschiedenen ECHAM5 Läufen angetrieben. Jede Realisation ist in drei Zukunftsszenarien (A1B, A2, B1) für die Jahre 2000 - 2100, sowie einen Kontrolllauf (C20) für die Jahre 1950 - 2000 unterteilt. In jedem dieser Szenarien finden sich die Klimavariablen Niederschlag, Luftfeuchte, Temperatur, Wind, Global- und Nettostrahlung in stündlicher Auflösung wieder. Die Zusammensetzung der einzelnen Realisationen ist in Tabelle 3-17 dargestellt.

REMO berechnet die Klimavariablen auf Gitternetze mit einer Netzweite von 10 x 10 km. Die Klimavariablen wurden in den jeweiligen Mittelpunkten der Rasterzellen angenommen und von diesen Punkten aus mittels Inverse Distanz in Form des Quadrantenverfahrens (INVD) interpoliert. Insgesamt standen somit 1443 „Stationen“ für die Interpolation zur Verfügung. Die räumliche Auflösung des Interpolationsrasters wurde der Auflösung des Originaldatensatzes mit 10km x 10km angepasst. In Abbildung 3-31 sind die REMO-Gitterpunkte und die Ausdehnung des Gesamtinterpolationsrasters dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch die Interpolation eine Drehung des Koordinatensystems geographischen Ursprungs in das kartesische Gauß-Krüger-System vorgenommen wurde

ohne die Auflösung zu ändern. Gleichzeitig erfolgt eine Glättung durch die Interpolation.

Zusätzlich zur Bereitstellung der interpolierten Stundenwerte erfolgte eine Aggregation zu Tageswerten. Hierzu wurde für die Klimavariablen Niederschlag die Summe und für die anderen Klimavariablen der Mittelwert aus den Stundenwerten gebildet. Als Startzeitpunkt der Aggregation wurde jeweils 00:00 Uhr gewählt.

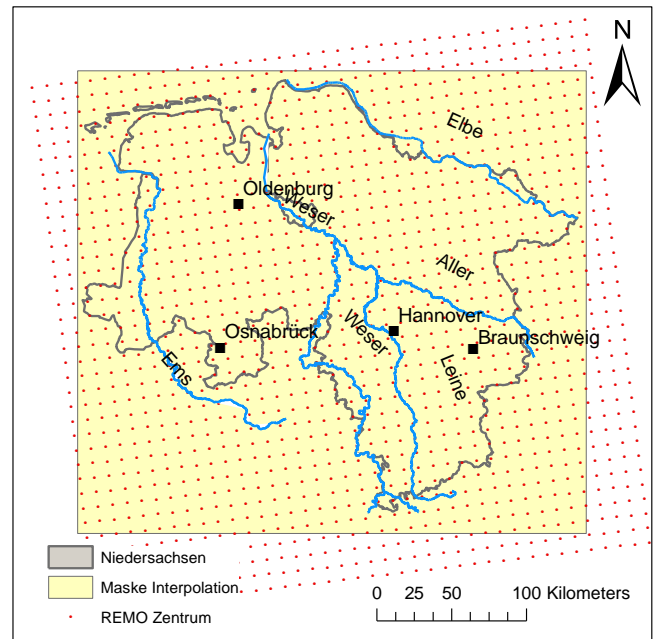


Abbildung 3-31: REMO Raster und Interpolationsraster für Niedersachsen

Tabelle 3-17: REMO Realisationen, Klimaszenarien mit Klimavariablen und deren Verfügbarkeit als regionalisierten Datensatz (G = Globalstrahlung; N = Nettostrahlung; P = Niederschlag; H = Luftfeuchte; T = Temperatur; W = Windgeschwindigkeit)

Realisation 1 (UBA)				Realisation 2 (BFG)				Realisation 3
C20	A1B	A2	B1	C20	A1B	A2	B1	...
G N P H T W	G N P H T W

3.5 Disaggregation von Niederschlägen

3.5.1 Einleitung und Ziel

Eine Betrachtung der zukünftigen Hochwassersituation kann mittels Niederschlags-Abfluss-Modellierung und anschließender Auswertung der simulierten Durchflusszeitreihen erfolgen. Für die Modellierung mesoskaliger Gebiete werden jedoch Niederschlagsdaten im Stundenformat benötigt, so dass ein Downscaling in der Zeitebene (Disaggregation) der täglichen WETTREG-Niederschlagsdaten erforderlich ist. Es werden verschiedene Disaggregierungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Nach der Auswahl eines geeigneten Disaggregierungsverfahrens werden ausgewählte WETTREG-Szenarien disaggregiert und zur weiteren Verwendung zur Verfügung gestellt.

3.5.2 Daten

Als Ausgangspunkt für die Disaggregation wurden Daten aus WETTREG 2006 verwendet. Eine Vorauswahl der Realisierungen wurde durch den NLWKN getroffen (vgl. Kapitel 5.5). Ziel der Vorauswahl war es, jeweils eine „nasse“, „mittlere“ und „trockene“ Realisierung zu identifizieren. Für die Auswahl wurden Modellrechnungen auf Tagesbasis mittels Panta Rhei (Riedel, 2012) durch das Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig durchgeführt. Es wurden die Realisierungen R18 (nass), R03 (mittel) und R13 (trocken) ausgewählt. Für die Disaggregation wurden die nach Richter (1995) korrigierten WETTREG 2006-Stationszeitreihen verwendet (siehe Haberlandt et al., 2011).

Die Disaggregation der Niederschlagsdaten erfolgte für sieben ausgewählte Teilgebiete. Die Teilgebiete sind in Abbildung 3-32 dargestellt. Zusätzlich sind die verwendeten, hochaufgelösten Niederschlagsstationen sowie die zu disaggregierenden WETTREG-Stationen dargestellt. Im Rahmen der Disaggregation wurden WETTREG- und hochaufgelöste Niederschlagsstationen in einem breiten Umfeld der Teilgebiete verwendet.

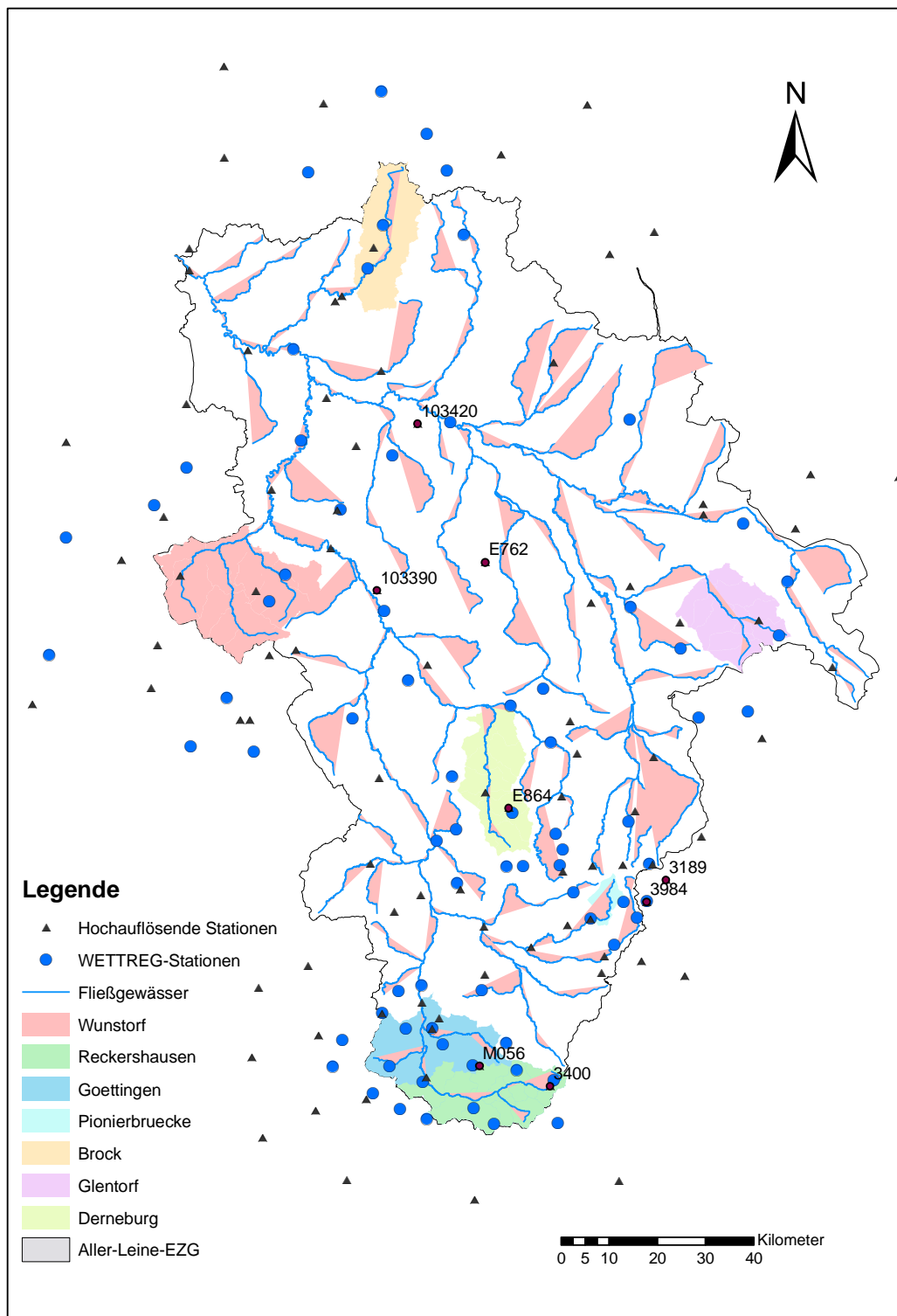


Abbildung 3-32: Untersuchte Teilgebiete und beeinflussende Niederschlagsstationen

3.5.3 Methodik

3.5.3.1. Untersuchte Disaggregierungsvarianten

Zur Auswahl eines geeigneten Disaggregierungsverfahrens wurden Voruntersuchungen an vier Teilgebieten (Pionierbrücke, Derneburg, Reckershausen, Göttingen) durchgeführt. Die Disaggregierungsverfahren im Überblick:

A) Division /24

Die einfachste Disaggregierungsvariante ist die Division der Tageswerte einer Zeitreihe durch 24. Die daraus resultierenden Werte stellen die jeweiligen Stundenwerte der disaggregierten Zeitreihe dar.

B) Tagesgang

Bei der Tagesgang-Disaggregation wird für jede Tageswertstation die nächstgelegene Stundenwertstation identifiziert. Für diese Station wird der durchschnittliche Tagesgang ermittelt. Dieser beinhaltet für jede Stunde das Verhältnis von in dieser Stunde gefallenem Niederschlag zum Gesamtniederschlag des Tages. Die Tagesgänge wurden separat für jedes Quartal ermittelt (November-Januar, Februar-April, Mai-Juli, August-Oktober). Die Verhältnisse eines durchschnittlichen Tagesganges wurden jeweils mit dem Tageswert multipliziert, woraus die Stundenwerte resultieren.

C) Niederschlagsdauer

Wie bei Disaggregierungsvariante B wird für jede Tageswertstation die nächstgelegene Stundenwertstation identifiziert. Für diese Station wird quartalsbezogen die durchschnittliche Anzahl an nassen Stunden innerhalb eines Tages bestimmt. Der Tageswert des Niederschlages wird auf diese Stundenanzahl zusammenhängend umgelegt, wobei drei verschiedene Arten der Umsetzungen (C1, C2 und C3) untersucht wurden. Für C1 und C3 wurde ein konstanter Intensitätsverlauf gewählt („Rechteckform“), während in C2 eine in der ersten Hälfte ansteigende und in der zweiten Hälfte in gleichem Maße absteigende Intensität gewählt wird („Dreiecksform“). Neben dem Intensitätsverlauf unterscheiden sich C1-C3 zusätzlich in ihrer zeitlichen Umsetzung. Sowohl bei C1 als auch bei C2 setzen Nie-

derschläge immer zu Beginn eines Tages ein. Bei C3 wird für jeden Tag und jede Station der Beginn des Niederschlagsintervalls zufällig bestimmt.

D) Kaskadenmodell

Für die Disaggregation der Tageswerte des Niederschlags wurde das Kaskadenmodell nach Olsson (1998) und Güntner et al. (2001) verwendet (D1, D2). Entsprechend der vorgestellten Methodik wurde das Programm RAINcarnation (Müller, 2011) für die Disaggregation entwickelt.

Das Kaskadenmodell zerlegt das Niederschlagsvolumen, welches für eine bestimmte Dauer vorliegt, in zwei Niederschlagsvolumen mit jeweils der Hälfte der Länge des ursprünglichen Zeitraumes. Eine exemplarische Darstellung kann Abbildung 3-33 entnommen werden.

In Abbildung 3-33 ist eine Disaggregation über vier Stufen dargestellt. Die Stufe der jeweiligen Disaggregation ist als Level 0 bis Level 4 gekennzeichnet, wobei Level 0 dem Tageswert des Niederschlages entspricht. In Level 0 ist das Ausgangsniveau der Disaggregation mit einem Niederschlagsvolumen von $V = 100\%$ zu finden. In Level 1 wurde dieses Niederschlagsvolumen in zwei äquidistante Zeitschritte mit Niederschlagsvolumina von 45 % bzw. 55 % disaggregiert.

Beim Übergang von einer Zeitebene zur nächsten existieren drei Möglichkeiten, wie das Niederschlagsvolumen aufgeteilt werden kann. Es kann vollständig in den ersten Zeitschritt (1/0), vollständig in den zweiten Zeitschritt (0/1) oder anteilig in beide Zeitschritte ($x/1-x$) gelegt werden (wie oben beschrieben). Die Parameterschätzung der Wahrscheinlichkeiten P für die jeweilige Art des Überganges erfolgt empirisch. Hierfür werden zeitlich hochaufgelöste Niederschlagszeitreihen aggregiert. Die relativen Häufigkeiten der Übergänge bei der Aggregation stellen die Wahrscheinlichkeiten für die Disaggregation dar.

Des Weiteren muss für einen ($x/1-x$)-Übergang bestimmt werden, welcher Anteil des Niederschlagsvolumens in den ersten Zeitschritt gelegt wird. Hierfür wird eine empirische Verteilungsfunktion ermittelt, welche die relativen Anteile x (Niederschlagsvolumen aus dem ersten Zeitschritt / Gesamtniederschlagsvolumen der beiden Zeitschritte) enthält.

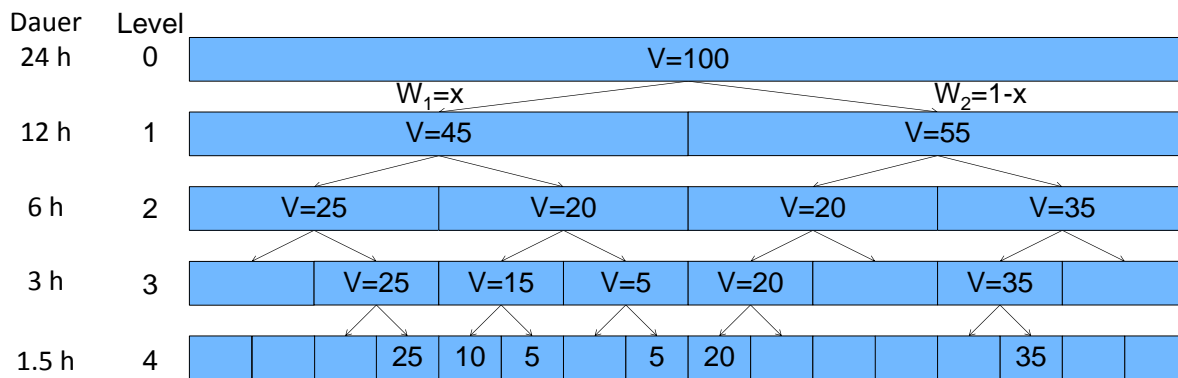


Abbildung 3-33: Kaskadenschema (Olsson, 1998 - verändert) mit V = Volumina [% des Ausgangsvolumens] und W_1 & W_2 als Wichtungsfaktoren

Die Schätzung der Parameter und der Verteilungsfunktion erfolgt nicht für die gesamte Zeitreihe uniform, sondern es wird in vier Positionsklassen (starting, enclosed, ending und isolated boxes) und zwei Volumenklassen differenziert. Für jede Kombination aus Volumenklasse und Position wird eine getrennte Parameterschätzung durchgeführt. Daraus ergeben sich insgesamt acht Datensätze (4 Positionen x 2 Volumenklassen = 8 Datensätze). Für die Disaggregation wurden jeweils die Parameter der am nächsten gelegenen, hoch aufgelösten Station verwendet.

Wird mit der Disaggregation von Zeitreihen bei einer Zeitintervalllänge von $\Delta t = 1$ d begonnen, endet diese nicht bei $\Delta t = 1$ h, sondern bei $\Delta t = 0.75$ h. Das Erreichen des $\Delta t = 1$ h-Zeitintervalls erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die disaggregierte Zeitreihe mittels Division durch drei auf 0.25 h-Basis disaggregiert. Das Aufsummieren von vier aufeinanderfolgenden Zeitschritten führt zu einer Zeitreihe mit der zeitlichen Auflösung von $\Delta t = 1$ h. Dieser Vorgang wird in Güntner et al. (2001) als „Diversion“ bezeichnet. Die durch diese Disaggregation erhaltenen Niederschlagsdatensätze werden als D1 bezeichnet.

Die Disaggregation der Tageswerte der einzelnen Zeitreihen geschieht bei Verwendung des Kaskadenmodells unabhängig voneinander. Dies hat zur Folge, dass ein Niederschlagsereignis an zwei benachbarten Stationen auf unterschiedliche Stunden am Tag verteilt wird. Dies entspricht nicht der Natur des Niederschlages, welcher z.B. bedingt durch Zugrichtung, Großwetterlagen oder orographische Verhältnisse mit einer räumlichen Konsistenz auftritt. Das bedeutet, dass die Niederschlagsverteilung innerhalb eines Tages an einer Station nicht losgelöst von den benachbarten Stationen betrachtet werden kann.

Aufgrund fehlender Alternativen wurde zur Lösung dieses Problems ein pragmatischer Ansatz entwickelt.

Für jeden Tag wurde die Niederschlagsstation mit dem größten Niederschlagsvolumen identifiziert. Der durch Disaggregation mittels des Kaskadenmodells für diese Station erhaltene Tagesgang wurde für alle anderen Stationen zur relativen Umsetzung des Niederschlagstageswertes genutzt. Dadurch findet in einem betrachteten Teilgebiet an jeder Station zeitlich parallel Niederschlag bzw. kein Niederschlag statt. Die aus dieser zeitlichen Parallelisierung erhaltenen Niederschlagsdatensätze werden als D2 bezeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass die beiden Szenarien D1 (räumlich zufällig) und D2 (räumlich gleichzeitig) die beiden möglichen Grenzfälle des Niederschlages darstellen und die Wahrheit dazwischen liegt.

3.5.3.2. Validierung des Kaskadenmodells mittels beobachteter Niederschläge

Die Parameter des Kaskadenmodells wurden exemplarisch für acht Stationen (siehe Tabelle 3-18 und Abbildung 3-32) geschätzt. Die Parameterschätzungen stimmen bezüglich der Größenordnung und der Verhältnisse zueinander mit den Erkenntnissen überein, welche Olsson (1998) und Güntner et al. (2001) gefunden haben.

Für die Validierung des Kaskadenmodells wurden die statistischen Eigenschaften der Originalzeitreihe und die Erwartungswerte der disaggregierten Zeitreihe (jeweils 10 Disaggregationen) miteinander verglichen. In Tabelle 3-18 sind die statistischen Kennwerte Niederschlagsdauer, Niederschlagsmenge, Trockendauer sowie die Anzahl an Nassstunden der einzelnen Zeitreihen dargestellt.

Aus Tabelle 3-18 ist für alle Stationen erkennbar, dass die Anzahl an nassen Stunden bei der disaggregierten Reihe höher ist als bei der Originalreihe. Auch die durchschnittliche Dauer eines Niederschlagsereignis-

nisses ist bei der disaggregierten Zeitreihe in etwa um 1 h größer als bei der Originalzeitreihe. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge hingegen kann durch die Disaggregation sehr gut widerspiegelt werden. Die Kombination zu hoher Niederschlagsdauern und gleicher Niederschlagsmengen führt zu durchschnittlich geringeren Niederschlagsintensitäten innerhalb der disaggregierten Zeitreihen im Vergleich zur Originalzeitreihe. Die durchschnittliche Dauer der Trockenphasen ist bei den disaggregierten Zeitreihen größer als bei den Originalzeitreihen. Diese Abweichung kann jedoch relativ betrachtet als gering angesehen werden.

Die Ursache für diese Abweichungen wird hierfür im letzten Schritt der Disaggregation, der Diversion, gesehen. Die Diversion, welche zur Umwandlung der 0.75 h-Werte zu 1 h-Werten genutzt wird, verursacht

eine Verteilung der Niederschläge auf mehrere Stunden. Dies ist in Abbildung 3-34 illustriert. Beginnend bei einem Niederschlag von 12 mm in 3 Stunden resultieren aus der Kaskade zwei Niederschläge auf der 0.75 h-Ebene. Durch Diversion werden diese zu drei Niederschlägen auf der 1 h-Ebene umgewandelt. Dadurch steigt die Anzahl an „nassen“ Stunden bei gleichbleibender Niederschlagsmenge. Durch das Eliminieren der kurzen Trockenzeitdauern steigt die durchschnittliche Trockenzeitdauer.

Diese Umwandlung verursacht eine „Glättung“ des Niederschlagsverlaufes. Hohe Intensitäten von Einzelereignissen können zu geringeren Intensitäten zusammengefasst werden. Diese Glättung kann bei Niederschlags-Abfluss-Simulationen einen Einfluss auf simulierte Scheitelwerte haben.

Tabelle 3-18: Vergleich von statistischen Eigenschaften der Beobachtungsreihe und deren Erwartungswerte der disaggregierten Reihen (10 Disaggregationen)

	Zeitreihenlänge [a]	Anzahl "nasser" Stunden		Niederschlagsdauer [h]		Niederschlagsmenge [mm]		Trockendauer [h]	
		Original	Disagg.	Original	Disagg.	Original	Disagg.	Original	Disagg.
M056	6.6	5023	6009	2.4	3.3	1.9	2.1	22	24.3
E864	4.8	4833	6482	2.6	3.8	2.1	2.3	20.2	20.9
E672	3.3	2775	3571	2.6	3.4	2.3	2.3	23.9	23.7
3984	17.8	26035	28322	3.7	4.6	3.3	3.6	16.3	17.2
3400	17.7	16812	18450	2.7	3.6	2	2.2	19.7	21.8
3189	17.7	8331	9804	3.3	4.4	3.1	3.5	18.3	19.8
103420	8.1	8090	9595	2.7	3.8	1.9	2.2	18	20.0
103390	8.7	6545	8446	2.5	3.7	1.8	2.1	20.5	23.5

3 h	0			12						0																										
1.5 h	0			0			6			6			0			0																				
0.75	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0																		
0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 h	0			0			2			4			6			0			0			0														

Abbildung 3-34: Exemplarische Darstellung der Diversionsproblematik

3.5.3.3. Validierung anhand von N-A-Modellierung

Mittels der disaggregierten Niederschlagszeitreihen können kontinuierliche Niederschlags-Abfluss-Simulationen (N-A-Simulationen) durchgeführt werden. Die resultierenden simulierten Durchflüsse können für hochwasserstatistische Analysen genutzt werden.

In Abbildung 3-35 ist das Schema zur Eignungsuntersuchung der disaggregierten Niederschlagszeitreihen dargestellt. Die Tageswerte der Niederschlagsstationen werden mittels der sieben vorgestellten Verfahren zu Stundenwerten disaggregiert.

Es wird das hydrologische Modell Pantha Rhei (Riedel, 2012) verwendet. Die disaggregierten Zeitreihen wurden dafür mittels des Inverse-Distanz-Verfahrens auf ein 1 x 1 km-Raster interpoliert.

Die für die Voruntersuchung verwendeten Gebiete Pionierbrücke, Derneburg, Reckershausen und Göttingen wurden mittels eines unabhängigen Niederschlagsdatensatzes kalibriert. Dieser setzt für jede Tageswertstation den Tagesgang der nächsten hochaufgelösten Niederschlagsstation auf Stundenbasis um. Hochaufgelösten Niederschlagszeitreihen liegen nur für einen kurzen Zeitraum an einer Vielzahl an Stationen vor, sodass der resultierende Datensatz („Beobachtungswerte“) lediglich den Zeitraum 01.01.2004 - 01.01.2009 umfasst.

Die Simulationen wurden für längere Zeiträume (> 30 Jahre) durchgeführt, in welchen Tageswerte des

Niederschlags und beobachtete Scheitelwerte des Abflusses vorlagen. Mittels der simulierten Durchflusszeitreihen wurde die Hochwasserstatistik für jedes Gebiet erstellt. Durch den Vergleich von simulierten und beobachteten Hochwasserquantilen des gleichen Zeitraumes können Schlussfolgerungen bzgl. der Eignung des Disaggregierungsverfahrens gezogen werden.

Da für das Kaskadenmodell die Verwendung eines Zufallsgenerators nötig ist, der je nach Initialisierung unterschiedliche Ergebnisse liefert, wäre für die Vergleichsrechnungen die Verwendung mehrerer Initialisierungsvarianten des Kaskadenmodells notwendig. Für den Pegel Reckershausen wurden disaggregierte Niederschläge aus zehn verschiedenen Initialisierungen zur N-A-Simulation genutzt. Die Hochwasserquantile der simulierten Abflüsse unterscheiden sich nur gering. Die maximale Abweichung aller HQ_{20} beträgt $\sim \pm 5\%$ des Mittelwertes der HQ_{20} , für das $HQ_{100} \sim \pm 7\%$. Im Vergleich zu den Hochwasserquantilen, welche aus den N-A-Simulationen mit den anderen Disaggregierungsvarianten resultieren, können diese Abweichungen vernachlässigt werden. Für die weiteren Untersuchungen wird daher nur eine Initialisierung des Kaskadenmodells verwendet.

Die Abbildung 3-36 zeigt die Hochwasserquantile für den Pegel Pionierbrücke. Die Disaggregierungsvarianten A (Division /24) und B (Tagesgang) führen zu den niedrigsten Durchflusswerten ($HQ_{100} \sim 32 \text{ m}^3/\text{s}$). Da bei diesen Varianten der Niederschlag über den gesamten Tag verteilt wird, existieren keine hohen

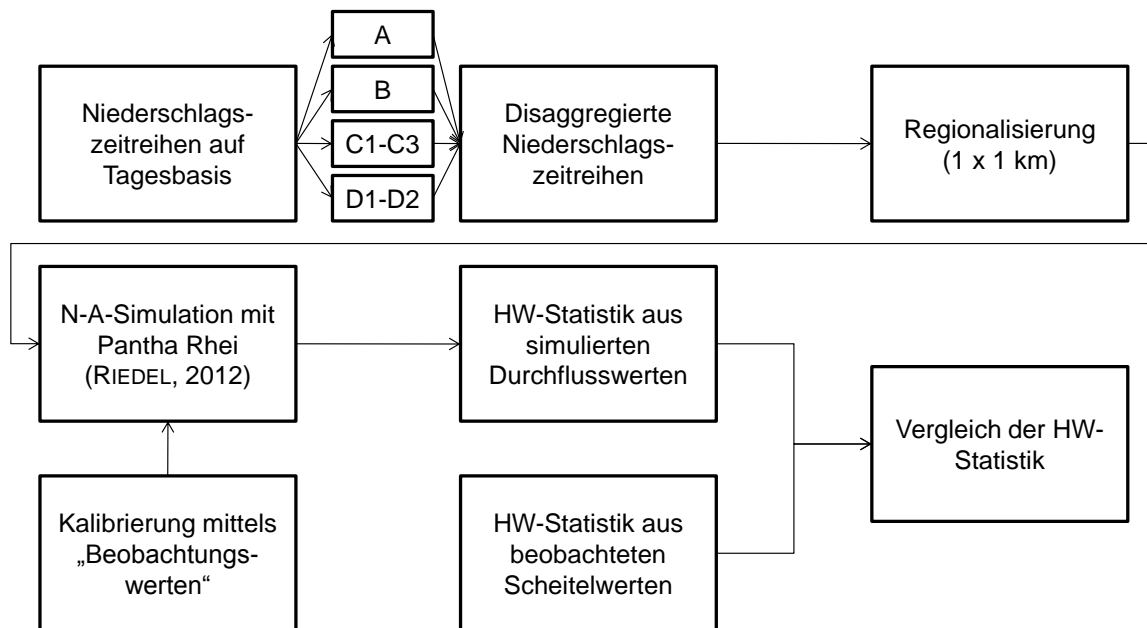


Abbildung 3-35: Schema zur Bewertung der Eignung der untersuchten Disaggregierungsverfahren

Niederschlagsintensitäten. Dadurch entstehen im Verhältnis zu den anderen Varianten nur kleine Hochwasser, welche bei einer statistischen Auswertung zu geringeren Durchflüssen führen.

Aus den Disaggregierungsvarianten C1 und C2 (Niederschlagsdauer in Block- und Dreiecksform) resultieren wesentlich größere Durchflusswerte ($HQ_{100} \sim 46\text{--}49 \text{ m}^3/\text{s}$). Bei diesen Varianten beginnt der gesamte Niederschlag in einem Gebiet zeitgleich und dauert nur wenige Stunden an. Dies führt zu hohen Niederschlagsintensitäten (bei C2 aufgrund der Dreiecksform zu größeren als bei C1), welche sich in hohen Durchflüssen und den daraus resultierenden größeren, statistischen Durchflusswerten widerspiegeln. Das „zufällige“ Einsetzen der Niederschläge gleicher Dauer für jede Station in Variante C3 führt zu geringeren Durchflüssen ($HQ_{100} \sim 39 \text{ m}^3/\text{s}$).

Die größten Durchflusswerte ($HQ_{100} \sim 52 \text{ m}^3/\text{s}$) resultieren aus der Disaggregierungsvariante D2 (Parallelisiertes Kaskadenmodell). Ein Vorteil des Kaskadenmodells ist es, aufgrund der differenzierten Parameterschätzung hohe Niederschlagsintensitäten während der Disaggregation zu erhalten. Wird ein Tagesgang mit einer sehr hohen Intensität einer disaggregierten Zeitreihe auf die anderen Stationen übertragen, „fällt“ ein Großteil des Niederschlages innerhalb einer kurzen Zeitspanne zeitgleich im gesamten Gebiet. Dies kann je nach Form und Größe des Einzugsgebiets zu großen Hochwassern und damit zu großen Hochwasserquantilen führen. Die Disaggregierungsvariante D1 ohne anschließende Parallelisierung führt zu geringeren Hochwasserquantilen ($HQ_{100} \sim 39 \text{ m}^3/\text{s}$).

Die aus den beobachteten Scheitelwerten abgeleitete Hochwasserstatistik wird vergleichsweise durch die Statistik resultierend aus Variante C1 für HQ_{10} und HQ_{20} am besten repräsentiert. Für HQ_{50} und HQ_{100} umschließen die Durchflüsse der aus C1 und C2 resultierenden Statistik die Hochwasserquantile der Beobachtungswerte. Die Hochwasserquantile der Disaggregierungsvarianten D1 und D2 umschließen ebenfalls die Hochwasserquantile der Beobachtungswerte, jedoch mit einer wesentlich größeren Spannweite.

Die Relation der Durchflusswerte aus den für den Pegel Derneburg abgeleiteten Hochwasserstatistiken der untersuchten Disaggregierungsvarianten zueinander ist ähnlich wie für den Pegel Pionierbrücke (siehe Abbildung 3-37). Die niedrigsten Durchflusswerte werden für HQ_{10} und HQ_{20} durch die Varianten A und B erreicht, für HQ_{50} und HQ_{100} werden diese von Variante

C3 unterschritten. Die höchsten Durchflusswerte werden für alle Hochwasserquantile durch die Varianten C1 und C2 erreicht.

Die bisher genannten Varianten spannen einen Bereich auf, dessen „untere Umhüllende“ durch die Varianten A, B und C3 und die „obere Umhüllende“ durch die Varianten C1 und C2 gebildet wird. Innerhalb dieses Bereiches befinden sich sowohl die statistischen Durchflusswerte der Varianten des Kaskadenmodells D1 und D2 als auch die aus den Beobachtungswerten abgeleiteten statistischen Durchflusswerte. Für die Hochwasserquantile HQ_{10} , HQ_{20} und HQ_{50} werden die statistischen Durchflusswerte von D1 und D2 eingeschlossen, bei HQ_{100} wird der Durchflusswert der Beobachtungswerte ($\sim 59 \text{ m}^3/\text{s}$) leicht durch D2 unterschätzt ($\sim 58.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Für die Leine wurden an den Pegeln Reckershausen (Abbildung 3-38) und Göttingen Untersuchungen anhand der Hochwasserstatistik durchgeführt. Am Pegel Reckershausen finden sich ähnliche relative Verhältnisse wie zuvor am Pegel Derneburg. Die „obere Umhüllende“ wird durch die Disaggregierungsvarianten C1 und C2, die „untere Umhüllende“ durch die Varianten A, B und C3 gebildet. Die Varianten D1 und D2 befinden sich innerhalb dieses aufgespannten Bereiches. Der statistische Durchflusswert wird für HQ_{10} von allen Varianten überschätzt, wobei die Abweichungen für die Varianten A ($\sim 3 \text{ m}^3/\text{s}$), B ($\sim 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$), C3 und D1 (beide $\sim 4 \text{ m}^3/\text{s}$) am geringsten sind. Für die Hochwasserquantile HQ_{20} und HQ_{50} wird die Differenz zwischen D1 und Beobachtung geringer ($\sim 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ und $\sim 2 \text{ m}^3/\text{s}$), für HQ_{100} befindet sich der aus den Beobachtungen abgeleitete Wert zwischen den extrapolierten Durchflusswerten von D1 und D2.

Für den flussabwärts gelegenen Pegel Göttingen (siehe Abbildung 3-39) ergibt sich ein ähnliches Verhältnis der Hochwasserstatistiken. Die „oberen Umhüllenden“ werden durch die Disaggregierungsvarianten C1 und C2 gebildet, die „unteren Umhüllenden“ durch die Varianten A, B und C3. Bis auf Variante B wird das HQ_{10} durch alle Disaggregierungsvarianten überschätzt. Der statistische Durchflusswert des HQ_{20} wird durch die Variante A sehr gut repräsentiert (beide $\sim 131 \text{ m}^3/\text{s}$), die Variante D1 führt zu einer geringen Überschätzung ($\sim 135 \text{ m}^3/\text{s}$). Das HQ_{50} wird durch Variante D1 am besten wiedergespiegelt, der Durchflusswert des HQ_{100} wird von den Varianten D1 und D2 eingespannt.

**Pionierbrücke - Abgeleitete Hochwasserstatistiken
(Pearson III, 1953-2004)**

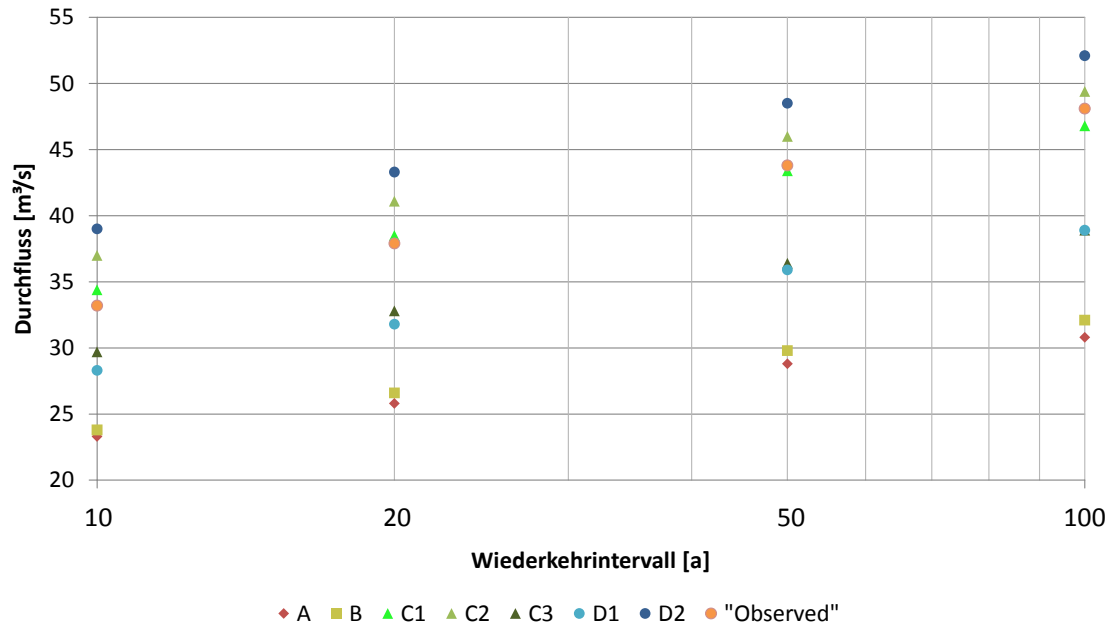


Abbildung 3-36: Hochwasserquantile des Pegels Pionierbrücke/Sieber

**Derneburg - Abgeleitete Hochwasserstatistiken
(Pearson III, 1978-2005)**

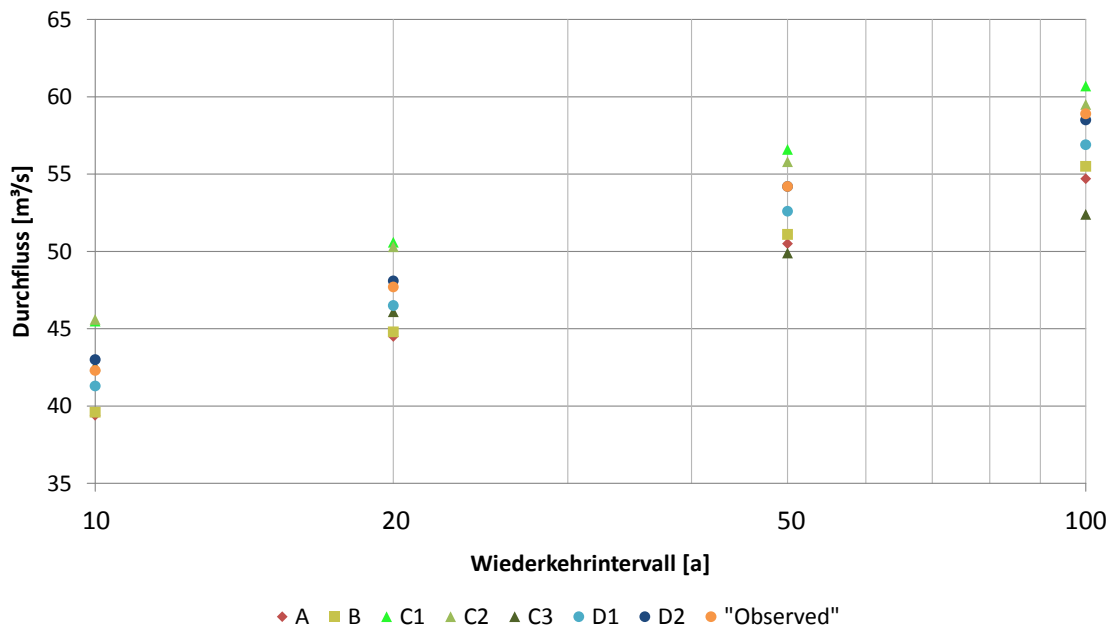


Abbildung 3-37: Hochwasserquantile des Pegels Derneburg/Nette

**Reckershausen - Abgeleitete Hochwasserstatistiken
(Pearson III, 1974-2005)**

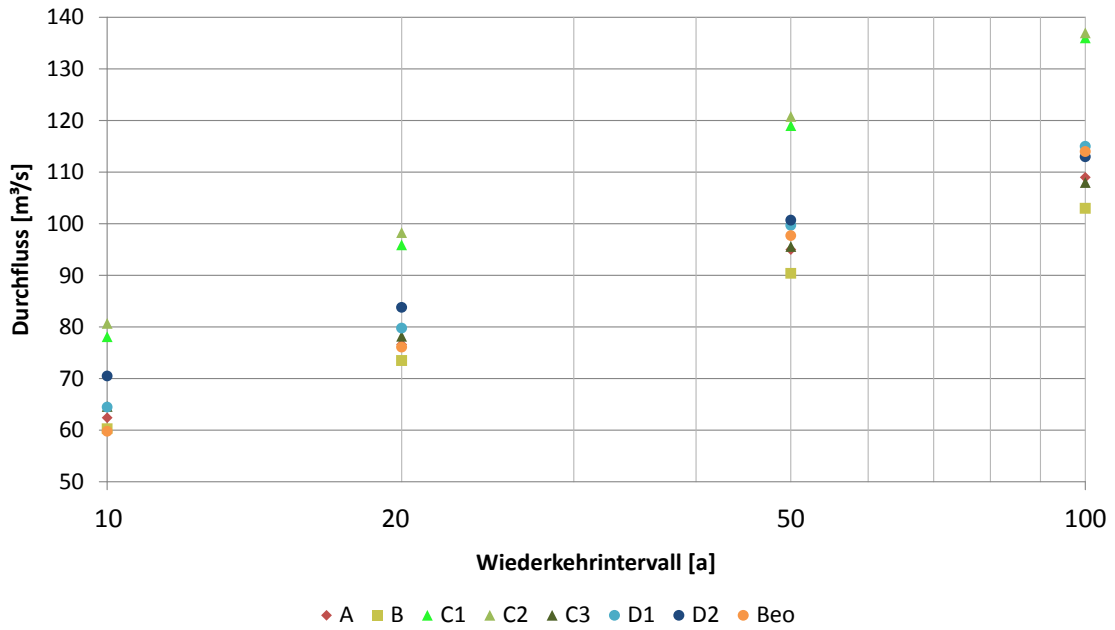


Abbildung 3-38: Hochwasserquantile des Pegels Reckershausen/Leine

**Göttingen - Abgeleitete Hochwasserstatistiken
(Pearson III, 1963-2005)**

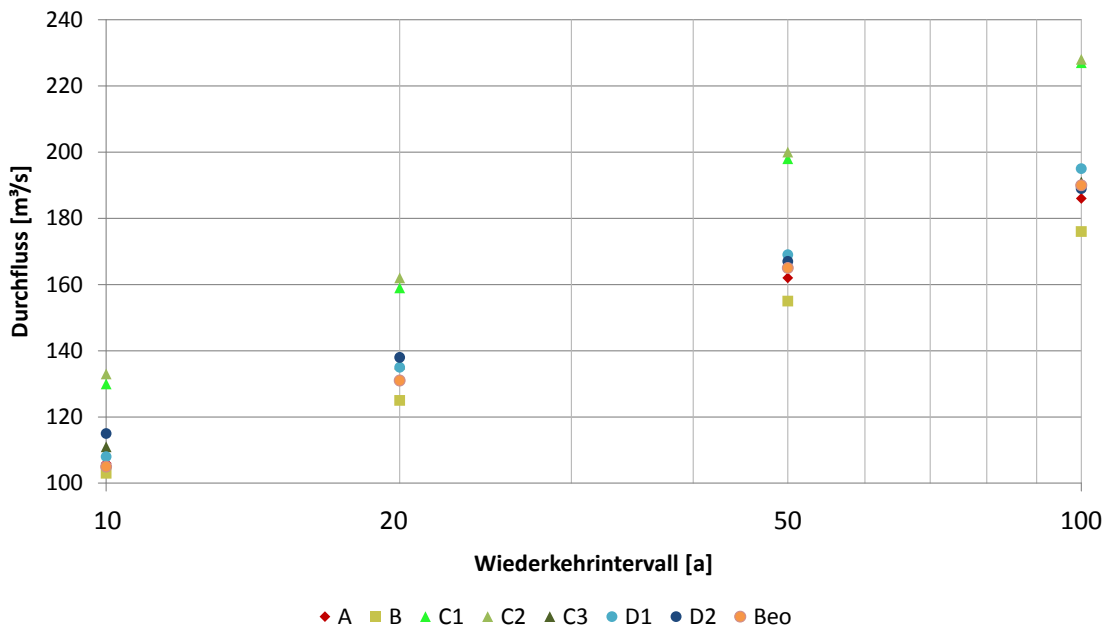


Abbildung 3-39: Hochwasserquantile des Pegels Göttingen/Leine

3.5.4 Schlussfolgerungen und Verfahrensauswahl

Für die Disaggregation der WETTREG 2006-Niederschlagsdaten wurden sieben verschiedene Disaggregierungsvarianten untersucht. Im Vorfeld der Untersuchungen wurde vermutet, dass das Kaskadenmodell gegenüber den anderen Disaggregierungsvarianten die besseren Ergebnisse hinsichtlich der Untersuchungskriterien liefern wird. Diese Vermutung konnte bestätigt werden.

Als entscheidendes Kriterium für die Güte der Disaggregation werden die Hochwasserstatistiken, abgeleitet aus den Durchflüssen der N-A-Simulationen basierend auf den disaggregierten Zeitreihen, angesehen. Aus den Untersuchungen an vier Teilgebieten lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

1. Die Disaggregierungsvariante Division/24 sowie Tagesgang führen in allen Untersuchungsgebieten zu sehr geringen Hochwasserquantilen und unterschätzen die aus der Beobachtung resultierenden Hochwasserquantile („Beobachtungsquantile“).
2. Die aus den Disaggregierungsvarianten C1 und C2 (Niederschlagsdauer) resultierenden Hochwasserquantile überschätzen die Beobachtungsquantile an allen Pegeln, nur für das kleinste Einzugsgebiet (Pegel Pionierbrücke) werden diese für HQ_{50} und HQ_{100} gut wiedergegeben. Die Variante C3 führt zu einer Unterschätzung der Beobachtungsquantile für die Pegel Pionierbrücke, Derneburg und Reckershausen (HQ_{50} , HQ_{100}). Die Hochwasserquantile des Pegels Göttingen weisen nur geringe Abweichungen gegenüber den Beobachtungsquantilen auf.
3. Die Disaggregierungsvariante D1 des Kaskadenmodells führt tendenziell zu einer Unterschätzung der Beobachtungsquantile, die Variante D2 tendenziell zu einer Überschätzung. Der Bereich, der durch beide Verteilungsfunktionen aufgespannt wird, schließt die Beobachtungsquantile für alle Teilgebiete ein bzw. liegt sehr nah an den Beobachtungsquantilen.

Für die weitere Anwendung wird die Verwendung der Disaggregierungsvarianten D1 und D2 des Kaskadenmodells empfohlen, da diese für den Pegel Pionierbrücke in allen Beobachtungsquantilen bzw. für die Pegel Derneburg, Reckershausen und Göttingen in den größeren Beobachtungsquantilen HQ_{50} und HQ_{100} zur besten Übereinstimmung geführt haben.

Es sollten sowohl D1 als auch D2 angewandt werden, da die alleinige Verwendung einer der Disaggregierungsvariante als Basis für N-A-Simulationen nicht ausreichend ist. Der durch die Hochwasserstatistiken aufgespannte Bereich erlaubt Schlussfolgerungen über den „wahren Wert“ der Hochwasserquantile.

Die Anwendung der beiden Disaggregierungsvarianten kann jeweils nur teilgebietsbezogen erfolgen. Die Gleichzeitigkeit des Niederschlages über dem gesamten Aller-Leine-Oker-Gebiet ist unrealistisch. Es existiert zum jetzigen Zeitpunkt keine konsistente makroskalige Möglichkeit, Niederschläge simultan im gesamten Gebiet zu disaggregieren.

Desweiteren muss berücksichtigt werden, dass es sich bei dem Kaskadenmodell um ein zufallsbasiertes Modell handelt, welches je nach Initialisierung des Zufallsgenerators unterschiedliche Ergebnisse liefert. Die Untersuchungen am Pegel Reckershausen haben jedoch gezeigt, dass unterschiedliche Initialisierungen zu sehr ähnlichen Hochwasserquantilen führen, so dass für die Untersuchungen jeweils nur eine Initialisierung des Kaskadenmodells verwendet wurde.

Die weiteren Arbeiten am Kaskadenmodell betreffen eine Verbesserung der Methodik an sich, um die Niederschlagscharakteristik stationsbezogen besser widerspiegeln zu können. Desweiteren wird nach einer Möglichkeit gesucht, die räumliche Konsistenz des Niederschlages besser zu implementieren. Die Entwicklung eines neuen Ansatzes, welcher dem natürlichen Niederschlagscharakter näher kommt, sollte die Anwendung von zwei Disaggregierungsvarianten wie bisher ersetzen. Dies schränkt zusätzlich die Unsicherheit ein, welche durch das Verwenden von zwei Disaggregierungsvarianten entsteht.

3.5.5 Datenbereitstellung

Das vorgestellte Kaskadenmodell (D1) wurde für die Disaggregation der WETTREG 2006-Niederschläge auf Tageswertbasis genutzt. Eine anschließende einzugsgebietsbezogene zeitliche Parallelisierung der Niederschläge (D2) wurde ebenfalls durchgeführt. Es ergeben sich insgesamt 78 Datensätze. Für jedes Teilgebiet existieren je drei D1- und D2-Datensätze für den 20C- und den A1B-Zeitraum. Nur für das Teilgebiet Reckershausen existieren keine separaten Datensätze für die Disaggregierungsmethode D1, da die disaggregierten Stationszeitreihen bereits in den Datensätzen des Teilgebietes Göttingen enthalten sind. Für die Parallelisierung in D2 wurden für das Teilgebiet Reckershausen jedoch ausschließlich Niederschlagsstationen verwendet, welche einen Einfluss auf das Abflussge-

schehen in Reckershausen haben, nicht jedoch auf das Unterliegergebiet bis zum Pegel Göttingen. Daher existiert für Disaggregierungsmethode D2 separate Datensätze für Reckershausen.

Die Ergebnisse stehen im Rasterformat für den Zeitraum 20C (01:00 03.01.1961 – 23:00 29.12.2000) und A1B (01:00 03.01.2001 – 23:00 29.12.2100) zur Verfügung.

Für die Dateninterpolation wurde ein orthogonales 5 x 5 km-Raster verwendet. In Tabelle 3-19 sind die Datenfenster der einzelnen Teilgebiete beschrieben. Für weitere Angaben hinsichtlich der Datennutzung wird auf Haberlandt et al. (2011) verwiesen.

Tabelle 3-19: Datenfenster der einzelnen Teilgebiete

Teilgebiet	min x	max x	min y	max y	Spalten	Zeilen
Brock	3540000	3575000	5850000	5895000	7	9
Derneburg	3560000	3600000	5735000	5785000	8	10
Glentorf	3610000	3645000	5775000	5810000	7	7
Goettingen	3545000	3605000	5680000	5720000	12	8
Pionierbruecke	3595000	3610000	5725000	5745000	3	4
Reckershausen	3550000	3605000	5680000	5710000	11	6
Wunstorf	3500000	3560000	5775000	5820000	12	9

4 Analyse der gegenwärtigen Hochwasserverhältnisse

4.1 Trends in beobachteten Abflusszeitreihen in Niedersachsen

Analysen zu in der Vergangenheit aufgetretenen längerfristigen Veränderungen des Abflusses erlauben eine Einschätzung bisheriger Bemessungsmethoden und einen Hinweis darüber inwiefern zukünftig Anpassungen erfolgen müssen.

4.1.1 Datenbasis

Insgesamt waren im Untersuchungsgebiet Daten von 329 Abflusspegeln verfügbar. Im Verlauf der Arbeiten wurde ein einheitlicher Untersuchungszeitraum von 1966 bis 2005 festgelegt. Für diesen Zeitraum standen nach der Plausibilitätsanalyse noch 88 Abflusspegel zur Untersuchung der Scheitelwerte und 84 Abflusspegel zur Betrachtung der Tagesmittelwerte zur Verfügung (siehe Abbildung 4-1).

Die Abweichung der Untersuchungszeiträume von Klima- und Abflussdaten liegt an der verhältnismäßig niedrigen Anzahl Pegel mit langer Beobachtungsdauer. Die Untersuchungsdauer der Klimadaten wurde beibehalten, um für alle Datentypen den maximal möglichen Informationsgehalt zu berücksichtigen.

4.1.2 Methodik

Zur Analyse von Veränderungen im Abflussregime wurden Indizes verwendet, die neben dem mittleren Verhalten speziell die wasserwirtschaftlich relevanten Extremwerte charakterisieren. Die hier ausgewählten Indizes sind in der Tabelle 4-1 aufgelistet. Im Folgenden werden Tagesmittelwerte als Tageswerte bezeichnet.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde dieselbe saisonale Einteilung wie bei der Klimauntersuchung übernommen (vgl. Kapitel 3.1). Zusätzlich wurde für die Scheitelwerte das hydrologische Jahr (NtO, November bis Oktober) und das Kalenderjahr (JtD) in den Untersuchungen berücksichtigt. Bei den weiteren Abflussindizes wurde auf das hydrologische Jahr verzichtet, das qualitativ dieselben Ergebnisse wie das Kalenderjahr lieferte.

Auch bei der Analyse der Abflüsse kam wieder der in Kapitel 3.1.2 beschriebene Mann-Kendall-Test zum Einsatz.

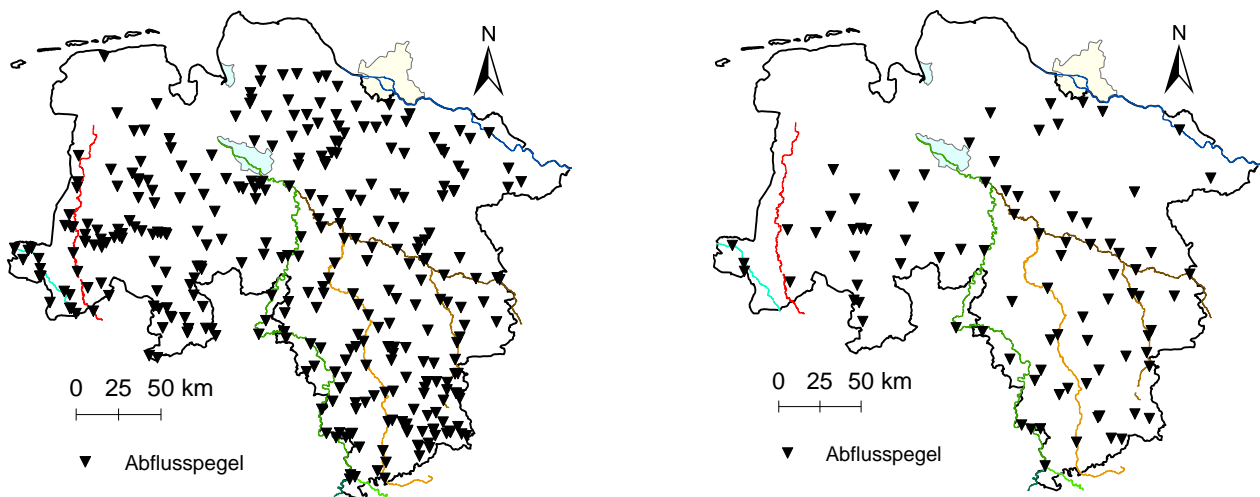


Abbildung 4-1: Untersuchungsgebiet mit allen Abflusspegeln (links) und mit den verwendeten Abflusspegeln (rechts)

Tabelle 4-1: Abfluss-Indizes

Abkürzung	Beschreibung
HQS	Jährlich und saisonale Scheitel [m^3/s]
POT90	Anzahl der Ereignisse mit einem max. Tageswert größer dem 90%-Quantil der Jahresmaxima [-]
POT75	Anzahl der Ereignisse mit einem max. Tageswert größer dem 75%-Quantil der Jahresmaxima [-]
D90	Mittlere Dauer der Ereignisse mit einem Tageswert größer dem 90%-Quantil der Jahresmaxima [d]
D75	Mittlere Dauer der Ereignisse mit einem Tageswert größer dem 75%-Quantil der Jahresmaxima [d]
NM7Q	Niedrigstes arithmetisches Mittel von 7 aufeinander folgenden Tageswerten des Abflusses innerhalb eines Jahres / einer Saison [m^3/s]
MQ	Jahres-/Saisonmittel der Tageswerte [m^3/s]

4.1.3 Datenprüfung

Das Abflussgeschehen ist stärker und unmittelbarer von Veränderungen wie anthropogenen Eingriffen (z.B. Regulierungen) im betreffenden hydrologischen Einzugsgebiet des Beobachtungspegels beeinflusst als das Klima. Die Datenprüfung der Abflüsse stellte sich daher komplexer dar als bei den meteorologischen Daten. Zusätzlich zu den in Kapitel 3.1.2 genannten Methoden erfolgte daher auch eine umfangreiche Analyse der Informationen aus den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern. Ziel hierbei war es, möglichst genaue Kenntnis über jedwede anthropogene Beeinflussung der Daten zu erhalten. Diese Erkenntnisse wurden zusammen mit den Ergebnissen der Doppelsummenanalyse und der statistischen Kennwerte betrachtet.

Als Resultat der Prüfung wurden von den Pegeln mit langen Zeitreihen 37 von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

4.1.4 Ergebnisse der Trenduntersuchung

Die Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests für die Abflussscheitel sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Es ist zu bemerken, dass insgesamt sehr wenig signifikante Trends vorhanden sind. Lediglich die abnehmende Tendenz der Hochwasserscheitel im Sommer zeigt einen klar erkennbar signifikanten Trend.

Die Abflussscheitel im Herbst zeigen keine Veränderungen über die letzten Jahrzehnte, während für den

Winter und Frühling ein großer Anteil positiver Trends festgestellt wurde. Allerdings ist der Anteil signifikanter Trends besonders im Frühling sehr gering.

Der Winter und das Jahr zeigen in den Analysen der Abflussscheitel ähnliche Ergebnisse. Es herrscht eine zunehmende Tendenz vor, allerdings mit wenig signifikanten Trends. Die starke Ähnlichkeit der Ergebnisse der Jahrestrends zu den Wintertrends und der große Unterschied zu den Sommertrends ist ein Hinweis hierfür, dass die Jahresmaxima vorwiegend im Winter liegen.

Bei der räumlichen Betrachtung der Trends (siehe Abbildung 4-3) konnte für keine Jahreszeit eine deutliche räumliche Struktur erkannt werden. Es scheint jedoch eine Tendenz zu positiven Trends im Süden des Aller-Leine-Gebietes und zu negativen Trends für direkte Zuflüsse der Aller zu geben. Eine Ausnahme bildet der Sommer, in dem für ganz Niedersachsen vorwiegend negative Trends zu beobachten sind.

Ein ähnliches Trendverhalten zeigten auch die Quantile der extremen Tageswerte. Bei beiden Kennwerten (75%- und 90%-Quantilen) konnte wie bei den Scheiteln ein negativer Trend im Sommer festgestellt werden. Die anderen Jahreszeiten sind indifferenter als bei den Scheitabflüssen. Lediglich im Herbst ist eine hohe Anzahl positiver Trends festzustellen, die allerdings kaum Signifikanz aufweisen (siehe Abbildung 4-4).

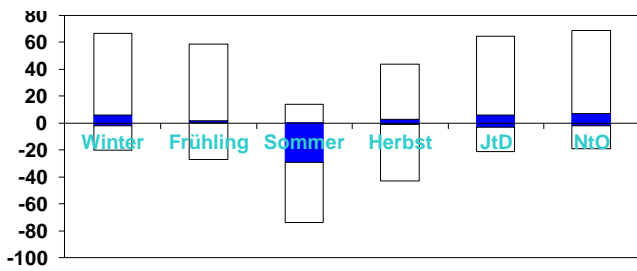


Abbildung 4-2: Ergebnisse der Trendanalyse der Abflussscheitel

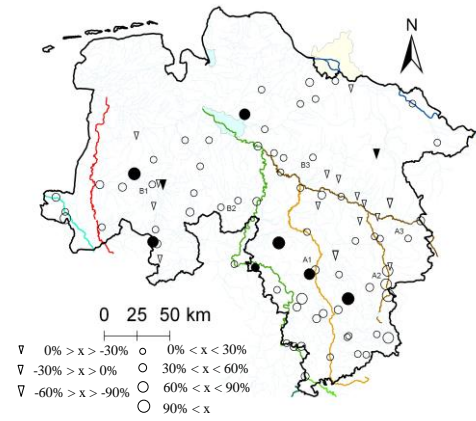


Abbildung 4-3: Trends jährliche Scheitelabflüsse (hydrologisches Jahr), leere Symbole: nicht signifikante Trends, ausgefüllte Symbole: signifikante Trends

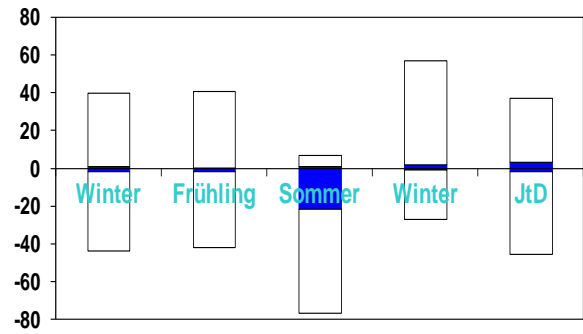
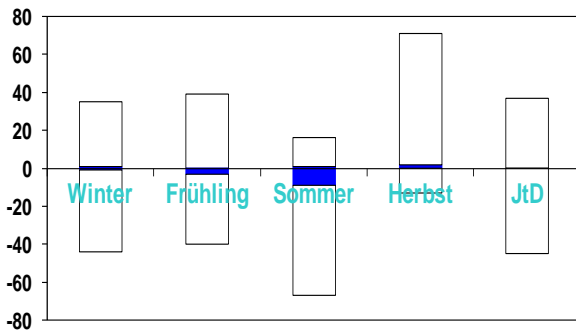


Abbildung 4-4: Ergebnisse der Trendanalyse der POT90 (links) und der POT75 (rechts)

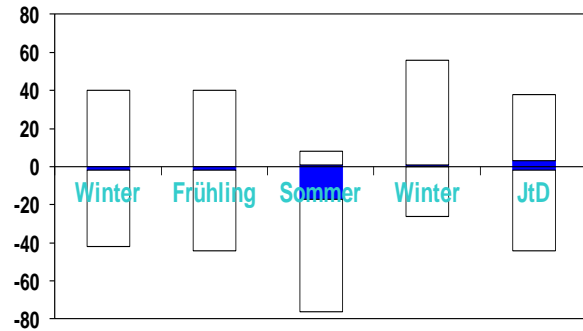
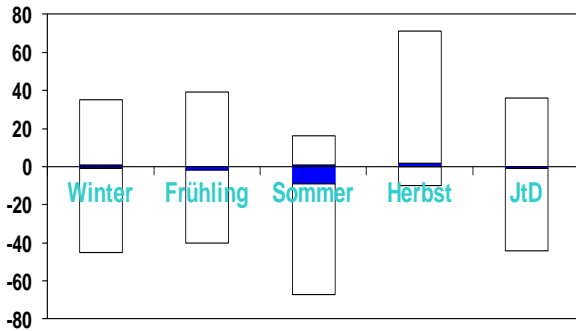


Abbildung 4-5: Ergebnisse der Trendanalyse der D90 (links) und der D75 (rechts)

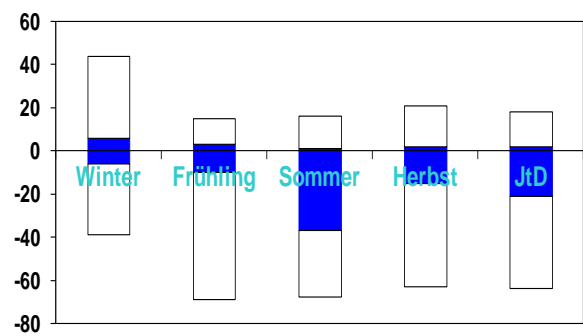
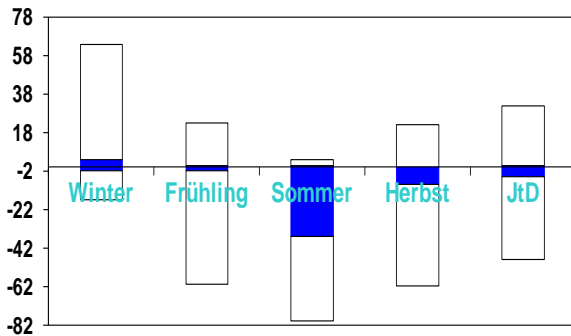


Abbildung 4-6: Ergebnisse der Trendanalyse der mittleren Tageswerte (links) und der NM7Q (rechts)

Das gleiche Bild zeigten auch die Ereignisdauern (siehe Abbildung 4-5). Der einzige nennenswerte Unterschied ist, dass die Anzahl der signifikanten Trends leicht geringer ist.

Bei den mittleren Abflüssen zeigen die Trends in dieselbe Richtung, haben aber eine etwas stärker ausgeprägte Signifikanz (siehe Abbildung 4-6).

Höhere Signifikanzen weisen hingegen die Trends im Niedrigwasser auf. Aufgrund der Natur dieses Kennwertes ergibt sich, dass ein negativer Trend eine Verschärfung der Situation bedeutet. In Abbildung 4-6 (rechts) ist zu erkennen, dass alle Jahreszeiten mit Ausnahme des Winters negative Trends aufweisen und auch eine relativ hohe Anzahl signifikanter Testergebnisse zeigen. Besonders der Sommer zeigt ein deutliches Ergebnis. Dieses Ergebnis ist konsistent mit den Resultaten der Klimaanalyse, dass sich die Trockenperioden in den Sommermonaten verschärfen. Der Winter hingegen zeigt in etwa gleich viele positive und negative Trends. Dieser Effekt ist für alle Flussgebiete zu erkennen. Nur in der Ems- und Vechteregion weisen einige Zuflüsse ein unterschiedliches Verhalten auf.

4.1.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Ergebnisse für die Abflussindizes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Es wurden negative Trends an den Allerzuflüssen in allen Jahreszeiten (mit Ausnahme des Winters) festgestellt. Jedoch weisen die Trends lediglich im Sommer eine nachweisbare Signifikanz auf. Dieser Effekt ist allerdings nicht bei allen Indizes gleich stark ausgeprägt.

Die Analysen in allen anderen Einzugsgebieten ergaben vorwiegend positive Trends im Winter, Frühling und Herbst. Jedoch ist der Anteil signifikanter Trends gering.

Für die Niedrigwasserabflüsse konnten viele signifikante negative Trends in fast allen Saisons nachgewiesen werden. Ausnahmen sind der Winter und etwas schwächer der Frühling.

Es konnten keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen der räumlichen Struktur der Trends im Niederschlag und der Trends im Abfluss erkannt werden. Als nächste Schritte wären besonders das Verwenden von längeren Untersuchungszeiträumen für ausgewählte Pegel, die Berücksichtigen der räumlichen Korrelationen und eine detailliertere Niedrigwasseranalyse zu nennen.

4.2 Westharz

Im Rahmen von KLiBiW wurden von der Harzwasserwerke GmbH umfangreiche Mengen an hydrologischen Daten aus dem Harzgebiet geliefert sowie zwei Berichte erstellt. Zum einen war dies die Dokumentation „Wasserwirtschaft im Westharz - Hydrologische Untersuchungen mit Blick auf ein sich veränderndes Klima“ (Harzwasserwerke, 2009), zum anderen war es die Ausarbeitung „Analyse von Hochwasserereignissen in Einzugsgebieten des Westharzes“ (Harzwasserwerke, 2011).

In der ersten Dokumentation wurde untersucht, ob die in den letzten Jahren aufgetretenen Wechsel im Wasserdargebot - wie zuletzt beobachtet bei der Aufeinanderfolge des extrem nassen Jahres 2002 und des „Jahrhundertsommers“ 2003 – im Bereich der natürlichen Schwankungen liegen oder ob sie bereits als erste Auswirkungen eines sich verändernden Klimas gesehen werden können. Unter dem gleichen Aspekt wurden auch die langjährigen Daten der Hochwasserabflüsse einiger Harzgewässer analysiert.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Die Auswertung der Zeitreihe der mittleren jährlichen Abflüsse von 1941 bis 2008 ergibt für die Harzgewässer ein zweigeteiltes Bild. Die im südlichen bzw. westlichen Harz gelegenen Flussgebiete von Oder, Sieber, Söse und Innerste weisen einen leicht ansteigenden Trend auf. Dagegen ist der Jahresabfluss im Nordharz bei Grane, Oker und Radau leicht rückläufig bis unverändert. Eine Ausnahme stellt hier das Flussgebiet der Ecker dar. Aufgrund der herausragenden Gebirgshöhe des Brockens befindet sich das obere Eckergebiet in der Hauptanströmung bei Westwetterlagen, so dass der Jahresabfluss wie in den Südharzgebieten tendenziell zunimmt.

Den vom Trend her kaum veränderten Jahresabflüssen stehen deutliche Veränderungen der Werte für das Winter- bzw. für das Sommerhalbjahr gegenüber. Korrespondierend zu den Prognosen der Klimaforscher sind die beobachteten Niederschläge und Abflussmengen im Winter ansteigend, wobei der positive Trend im Südharz und an der Ecker statistisch signifikant ist. Dagegen sind die Abflussmengen im Sommerhalbjahr in allen Flussgebieten rückläufig.

Die Analyse des Langzeitverhaltens der Jahreshöchstabflüsse ergibt bei fünf von sechs untersuchten Pegeln einen leicht positiven Trend, der jedoch nicht signifikant ist und im Rahmen der natürlichen Variabilität liegt. Bei diesen fünf Gewässern (Oder, Sieber,

Söse, Oker und Radau) ist festzustellen, dass die Scheitelwerte der Winterhochwasser tendenziell zunehmen, im Sommerhalbjahr dagegen abnehmen.

Eine signifikante Zunahme der Jahreshöchstabflüsse liegt beim Pegel Hüttschenthal im Zustrom zur Innerstetalsperre vor. Denn anders als bei den übrigen Pegeln ist hier der Trend der Hochwasserabflüsse auch im Sommer positiv. Beim Pegel Hüttschenthal hat das Trendverhalten der Hochwasserabflüsse weniger mit dem Klimawandel als mit der Tatsache zu tun, dass zu Beginn der 1980er Jahre die intensive Nutzung der Oberharzer Teiche seitens des Bergbaus eingestellt wurde. Dadurch werden die Hochwasserscheitel im oberen Innerstegebiet heute nicht mehr in dem Maße gedämpft wie das in früheren Zeiten noch der Fall war.

Die Untersuchungsergebnisse machen deutlich, dass die Talsperren - als Multifunktionsspeicher, welche dem Hochwasserschutz, der Trinkwassergewinnung, der Energieerzeugung und der Niedrigwasseraufhöhung dienen – in Zukunft noch weitaus stärker als bisher für einen Ausgleich zwischen sehr nassen und sehr trockenen Perioden sorgen müssen.

Der Bericht zur Analyse von Hochwasserereignissen fasst die Ergebnisse einer Extremwertanalyse von Hochwasserscheitelwerten langjährig beobachteter Pegel zusammen. Er ergänzt die Auswertungen, die in der o.g. Dokumentation bereits vorhanden ist. Insgesamt wurden die beobachteten Hochwasserscheitelwerte von 19 Messstellen im Westharz untersucht. Dabei handelt es sich um die Hochwasserdaten der Talsperrenzuflusspegel sowie einiger Pegel, die von Speicherbewirtschaftung und Bei- bzw. Ableitungen weitgehend unbeeinflusst sind.

Die extremwertstatistische Analyse der Jahreshochwasserscheitelwerte wurde mit dem Programm EXTREM der Universität Karlsruhe durchgeführt. Das Programm bietet eine Anpassung von insgesamt 15 verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Die Schätzung der statistischen Parameter erfolgte mit der Momenten-Methode (MM) und mit der Wakeby-Likelihood-Methode (MLH). Die Güte der Anpassung wurde mit dem $n\omega^2$ -Test bestimmt. In einer Übersicht wird das Ergebnis der Extremwertstatistik dargestellt. Hier sind für die 19 untersuchten Pegel die ermittelten HQ_2 , HQ_5 , HQ_{10} , HQ_{20} , HQ_{50} und HQ_{100} aufgeführt. Da die dreiparametrische Log-Normalverteilung in fast allen Fällen eine sehr gute Anpassungsgüte lieferte, wurde diese Verteilungsfunktion durchgängig für alle Pegel ausgewählt.

5 Zukünftige Entwicklung von Wasserhaushalt und Hochwasser

5.1 Überblick

Um mögliche Einflüsse des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und Hochwasserereignisse abbilden zu können, ist neben den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Klimadaten und Klimamodellläufen eine detaillierte hydrologische Modellierung des Einzugsgebietes erforderlich. Bevor auf die hydrologische Modellierung einschließlich Modellsystem sowie den Aufbau des Einzugsgebietes im Modellsystem eingegangen wird, soll hier die prinzipielle Vorgehensweise zur Modellierung der zukünftigen Entwicklung erläutert werden.

Anhand der Abbildung 5-1 lassen sich die im Folgenden beschriebenen Schritte der Bearbeitung kurz skizzieren. Zunächst wird das hydrologische Modell des Einzugsgebietes mit „echten“, historischen Klimadaten angetrieben, welche an Niederschlags- und Klimastationen aufgezeichnet worden sind. Diese retrospektive Nachrechnung erlaubt einen Vergleich der simulierten Abflüsse mit Beobachtungen. Das Modell wird durch Variation von Parametern so angepasst, dass

die Beobachtungen durch das Modell gut nachgebildet werden können. Dieser Bearbeitungsschritt wird Kalibrierung genannt. Um die Güte der Modellanpassung zu prüfen, erfolgt idealerweise ein Testlauf für einen Zeitraum, der nicht im Zuge der Kalibrierung untersucht wurde (Validierung). Liefert dieser Validierungslauf ebenfalls gute Ergebnisse, kann man von einem belastbaren Modell ausgehen, welches auch für Untersuchungen von Szenarien (z.B. Änderung der klimatologischen Randbedingungen) geeignet ist.

Globale Zirkulationsmodelle (GCM) enthalten Parametrisierungen, welche die durch den dynamischen Modellkern nicht erfassbaren Prozesse berücksichtigen. Ein wesentlicher Baustein in diesem Gesamtansatz sind Strahlungsparametrisierungen, die die Wirkung von Konzentrationsänderungen von Treibhausgasen sowie Rückkoppelungen von Aerosolen auf das Klima simulieren. Diese Parametrisierung ist die Schnittstelle zu den SRES-Szenarien (siehe z.B. IPCC, 2007), die die wirtschaftliche Entwicklung und die damit verbundene Entwicklung von Treibhausgasemissionen vorgeben.

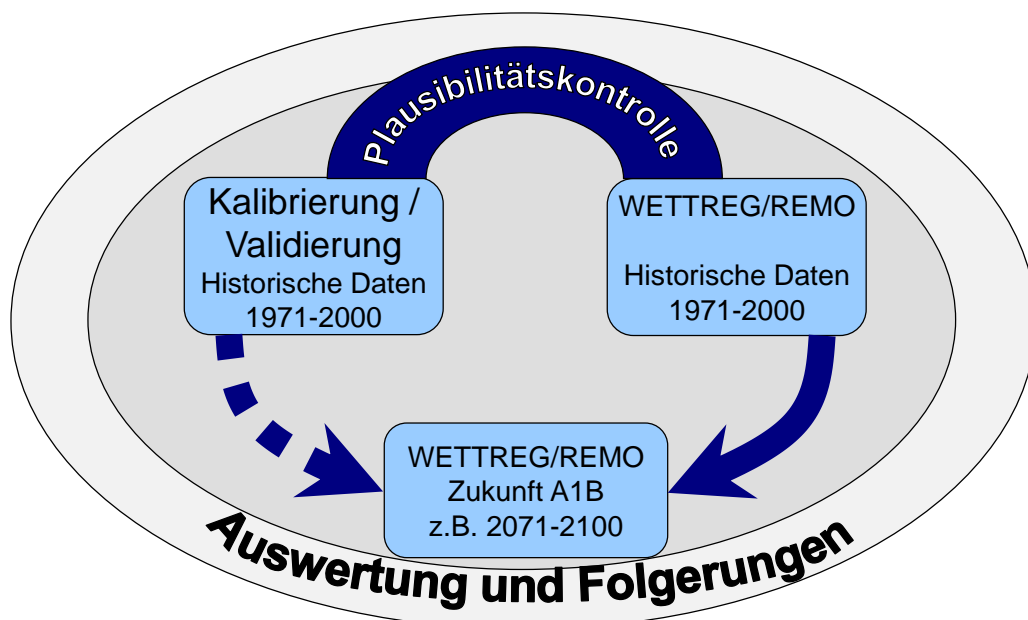


Abbildung 5-1: Vorgehensweise bei der Untersuchung von möglichen Einflüssen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft mit Hilfe eines hydrologischen Modells.

Die Parametrisierung wird so gewählt, dass das Klima des 20. Jahrhunderts im sog. Kontrolllauf (20C) korrekt wiedergegeben wird. Die Ergebnisse aus der Modellkette Globales Klimamodell → regionales Klimamodell → hydrologisches Modell werden daher mit den Ergebnissen des Simulationslaufes auf Grundlage historischer Beobachtungsdaten verglichen (Plausibilitätskontrolle). Ist diese Plausibilitätskontrolle erfolgreich, können die Szenarien mit möglichen zukünftigen Entwicklungen simuliert und ausgewertet werden. Häufig wird eine Vielzahl von Modellläufen ausgewertet. Man spricht dann von einem Ensemble.

In diesem Kapitel wird zunächst das für das Untersuchungsgebiet der Aller eingesetzte hydrologische Modell PANTA RHEI beschrieben. Nach der Beschreibung des Modellaufbaus orientiert sich die Gliederung dieses Kapitels an der Abbildung 5-1. Es werden die Kalibrierung und Validierung sowie die Szenarienläufe methodisch beschrieben, und es werden ausgewählte Ergebnisse im Text dargelegt. Weitere Ergebnisse sind im Anhang zusammengestellt.

5.2 Hydrologische Modellierung mit dem Modell PANTA RHEI

5.2.1 Allgemeine Beschreibung

Für die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft wurde ein hydrologisches Flussgebietsmodell für das Einzugsgebiet der Aller mit Leine und Oker (im Folgenden: Aller) erstellt. Als Modellsystem wurde die Software PANTA RHEI verwendet, die im Zuge einer Kooperation der TU Braunschweig, Leichtweiß-Institut (Abt. Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz) und der Prof. Hartung und Partner Ingenieurgesellschaft für Wasser- und Abfallwirtschaft 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 Klimawandel bezogene Untersuchungen in nationalen wie internationalen Projekten eingesetzt (Riedel et al., 2011).

5.2.2 Bausteine des Modells

Für die hydrologische Modellierung mit dem Programm PANTA RHEI wird ein Flussgebiet räumlich in System-

elemente untergliedert. Systemelemente sind Flächen (Teileinzugsgebiete und deren Unterelemente: Hydrotope) und Bauwerke. Ein Hydrotop fasst Flächen mit ähnlichem hydrologischem Verhalten zusammen. Sie dienen der Beschreibung der (primär nichtaufgelösten) 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 Programm als Stationen, also nur mit punktueller Ausdehnung verwaltet. Die tatsächliche räumliche Ausdehnung und ihre hydrologische Wirkung (z.B. Talsperre und ihre Oberfläche) muss über Eigenschaften und Parameter des Bauwerks definiert werden. Folgende Bauwerke können berücksichtigt werden:

- Düker
- Hochwasserrückhaltebecken
- Talsperre
- Retentionsraum
- Verzweigung

Für jedes Systemelement stellt PANTA RHEI ein oder mehrere elementspezifische Rechenverfahren (Prozeduren) zur Verfügung, die der Anwender auswählen kann, z.B. verschiedene Verfahren zur Berechnung der aktuellen Verdunstung.

5.2.3 Hydrologische Teilprozesse

In Abbildung 5-2 ist gezeigt, wie verschiedene hydrologische Prozesse in einer Teilfläche (einige Prozesse werden auf Hydrotopebene abgearbeitet) durchlaufen werden und in welche Komponenten der Wasserfluss unterteilt wird. Für das Systemelement Teilfläche und seine darin enthaltenen konzeptionellen Speicher wie z.B. Schneespeicher oder Grundwasserspeicher werden in jedem Zeitschritt die Zu- und Abströme sowie die Wasserbilanz berechnet. Für jeden Teilprozess stehen dem Anwender verschiedene Prozeduren zur Verfügung. Die Auswahl der Prozeduren orientiert sich in der Praxis an der Aufgabenstellung (Ereignis- oder Kontinuumsimulation) und den Eingangsdaten (zeitliche bzw. räumliche Auflösung).

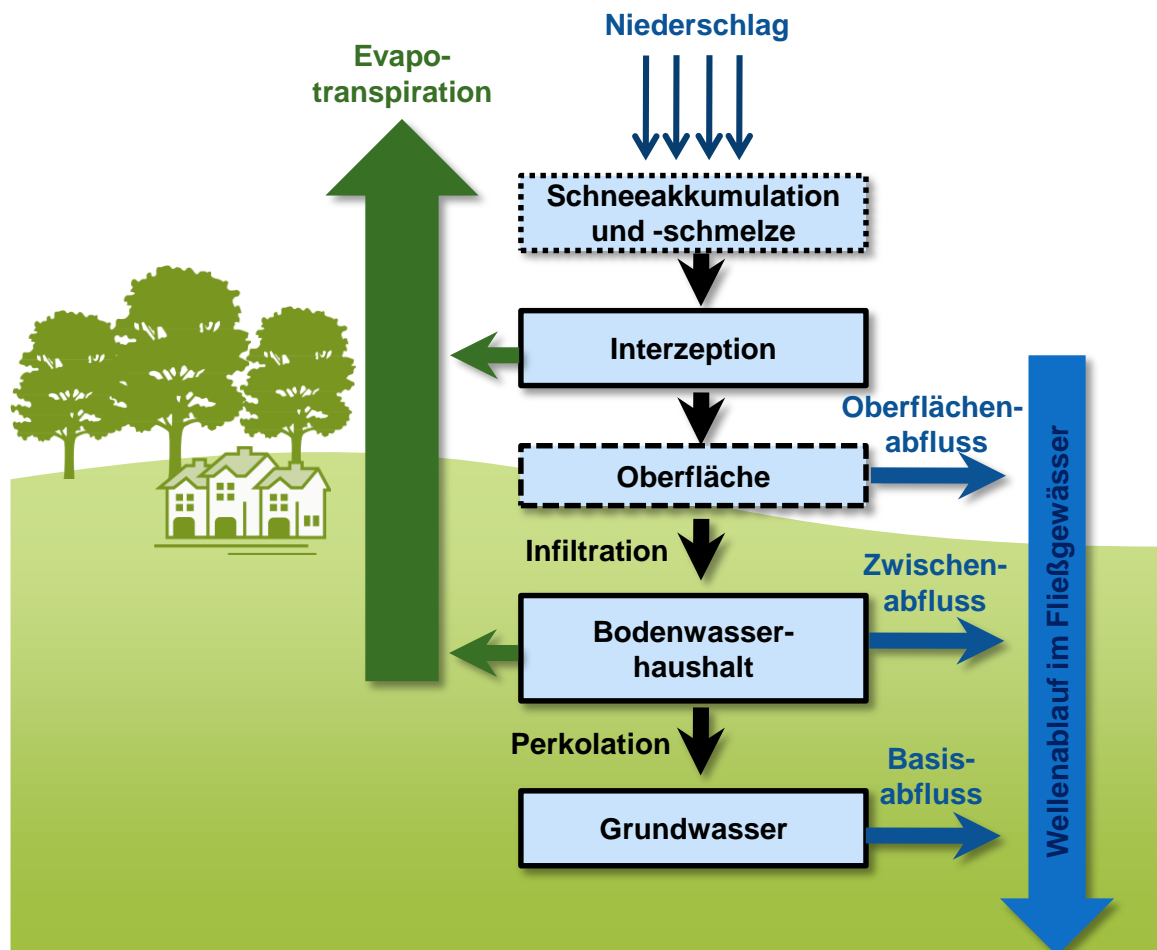


Abbildung 5-2: Prinzipskizze der hydrologischen Prozesse auf Teilflächenbasis im hydrologischen Modell PANTA RHEI

Die Teilprozesse, die für die Wasserhaushaltssimulation für jede Teilfläche und für jeden einzelnen Zeitschritt geplant und durchgeführt werden, lassen sich im Wesentlichen für folgende hydrologische Teilprozesse unterscheiden:

1. Für alle benötigten Größen wurden interpolierte meteorologische Rasterdateien von Teilprojekt 1 (TP1), vgl. Kapitel 3.4, zur Verfügung gestellt. Für jede Teilfläche, für jeden Zeitschritt und für jede meteorologische Größe erfolgt bei der Simulation eine räumliche und zeitliche Interpolation der Eingangsgrößen. Durch den Raumbezug der Eingangsdaten werden jeder Teilfläche räumlich differenzierte Zeitreihen zugeordnet.
2. Schneemodell: In Abhängigkeit von der Temperatur erfolgt eine Bilanzierung der Schneedeckenhöhe (als Schnee-Wasser-Äquivalent) mit Auf- oder Abbau. Die Berechnung der potentiellen Schmelzrate erfolgt mit dem Temperatur-Index-Verfahren (siehe Maniak, 1997).
3. Verdunstung: Die potentielle Verdunstung wird nach dem Penman-Monteith-Ansatz (Monteith, 1965) berechnet. Die potentielle Verdunstung wirkt zuerst auf den Interzeptionsspeicher, anschließend auf den Bodenspeicher. Die Interzeption wird dabei modelltechnisch durch einen einfachen Speicher abgebildet (Rutter et al., 1971). Bei Kontinuumsimulationen stellt die Verdunstung neben Niederschlag und Abfluss eine Hauptkomponente des Gebietswasserhaushaltes dar. Es wird davon ausgegangen, dass die Verdunstung aus dem Boden der Transpiration entspricht und die Evaporation der Interzeptionsverdunstung gleichzusetzen ist.
4. Die Abflussbildung ist die Aufteilung des Niederschlags auf die Teilströme Infiltration und Direktabfluss. Die Eigenschaften von Landnutzung und Boden dominieren in diesem Prozess. In PANTA RHEI werden die Speicher- und Abflusskomponenten durch

4 Bodenspeicher simuliert. Abhängig von der Niederschlagsintensität und der Bodenfeuchte wird der Direktabfluss (Komponenten Oberflächenabfluss und Interflow) mit Hilfe des von Riedel (2004) erweiterten SCS-Verfahrens ermittelt. Direktabfluss und Grundwasserabfluss (Komponenten Grundwasserabfluss und Basisabfluss) bilden den abflusswirksamen Niederschlag, der verbleibende Anteil wird im Boden zwischengespeichert oder der Verdunstung zugeführt.

5. Die vier Abflusskomponenten bzw. Bodenspeicher werden durch die Prozesse der Abflusskonzentration, welche mit Hilfe von Einzellinearspeichern (Übertragungsfunktionen) abgebildet werden, überlagert und in den Teilflächenabfluss umgewandelt.
6. Der Wellenablauf der Abflussganglinien im Gewässerbett kann mit verschiedenen Verfahren simuliert werden. Der Wellenablauf setzt sich aus den Teilkomponenten Translation (Fließzeit) und Retention zusammen. Die Fließgeschwindigkeit wird zunächst anhand der Fließformeln nach Rother ermittelt. Für Fließgewässer ohne Kenntnis der präzisen Gewässergeometrie wird in der Regel der Einzellinearspeicher für die Berechnung der Retention verwendet. Ist das Retentionsverhalten infolge Ausuferung deutlich nichtlinear, kann auch ein Ansatz mit 2 verschiedenen Linearspeichern für Hauptstrom und Vorland gewählt werden. Bei größeren Still- oder Fließgewässern (bzw. Retention in der Talaue) können flussabschnittsweise Speicherkennlinien aufgestellt und die Abflüsse mit der „Modified Puls“ Methode (Maniak, 1997) berechnet werden.

Neben den genannten Methoden stehen für die einzelnen Prozesse noch weitere Berechnungsmethoden zur Auswahl. Die kurze Beschreibung enthält hier nur die im Projekt KliBiW verwendeten Ansätze.

Neben den hydrologischen Prozessen auf Teilflächenebene müssen auch abflussrelevante Bauwerke im Modell abgebildet werden können. Das Einzugsgebiet der Aller ist durch zahlreiche Hochwasserrückhaltebecken, Düker, Retentionsräume und Verzweigungen geprägt, deren Wirkung auf das Hochwassergesche-

hen mit PANTA RHEI ebenfalls simuliert wird. Für die großen Talsperren im Harz sind Betriebspläne (sog. Lamellenpläne) implementiert, um eine jahreszeitlich abhängige Steuerung der Betriebsauslässe zu simulieren.

5.3 Modellerstellung

5.3.1 Aufbau des Gesamtmodells

Im Zuge der Modellerstellung wurde das Einzugsgebiet der Aller bis zur Mündung in die Weser im Modell PANTA RHEI abgebildet (siehe Abbildung 5-3). Als Grundlagen wurden die Hydrographische Karte Niedersachsens, digitale Geländemodelle sowie Boden- und Landnutzungskarten herangezogen. In den außer-niedersächsischen Gebieten der Aller wurden entsprechende Daten der Nachbarbundesländer bzw. kleinmaßstäbige, bundesweit verfügbare Datensätze herangezogen. Die Tabelle 5-1 fasst die im Projekt KliBiW bereitgestellten und verwendeten digitalen Eingangsdaten zusammen.

Für die Parametrisierung des Flussgebietsmodells wurden die digitalen Geodaten in mehreren Arbeitsschritten aufbereitet. Für die Erstellung der Hydrotope wurden Landnutzungsdaten und Bodendaten verschnitten, um Flächen gleicher hydrologischer Eigenschaften hinsichtlich der zu beschreibenden Prozesse zu ermitteln. Die anstehenden Bodenarten aus den Bodenkartenerwerken konnten als ESRI Shapefile von PANTA RHEI direkt verarbeitet werden. Bei der Landnutzung wurde eine Aggregation durchgeführt. Die Original-ATKIS-Daten enthalten sehr viele Klassen, welche zusammengefasst werden konnten. Durch die Verschmelzung zu hydrologisch gleichartig wirkenden Klassen reduzierte sich die Anzahl redundanter Hydrotope und damit auch die Rechenzeit. Die vorhandene Variabilität der Eingangsdaten sollte dabei erhalten bleiben und zugleich keine doppelten Parameterbelegungen enthalten. Zudem wurden die Original-ATKIS-Klassen der Wälder noch in Laub-, Nadel- und Mischwald disaggregiert, da unterschiedliche Wälder durch ein differenziertes hydrologisches Verhalten charakterisiert sind. Die Unterteilung war durch die Auswertung von Zusatzattributen im Original-ATKIS-Datensatz möglich. Die geschilderte Aufbereitung der Landnutzungsdaten ist tabellarisch in Anhang 10 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Verwendete digitale Eingangsdaten für die Modellerstellung

Datensatz / Karte	Beschreibung
ATKIS	Amtlichen Topografisch-Kartografischen Informationssystem (Landnutzungsdaten)
BÜK50 Niedersachsen	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50.000
BÜK1000	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 für Gebiete in Sachsen-Anhalt und Thüringen
DGM5	Digitales Geländemodell mit 10 m Gitterweite
Hydrographische Karte von Niedersachsen	Digitale Ausgabe; enthält das Gewässernetz und die Abgrenzung von (Teil-)Einzugsgebieten
Topographische Karten	TK25, TK50, TK100

Die Einteilung des Gesamteinzugsgebietes der Aller in Teilflächen ist in Anhang 11 gezeigt. Der daraus ermittelte Systemplan, welcher die Abarbeitung der Systemelemente schematisch darstellt, kann dem Anhang 12 entnommen werden.

Da wasserwirtschaftliche Eingriffe in die Gewässer erhebliche Einflüsse auf den Wasserhaushalt und den Wellenablauf bei Hochwasser haben können, musste eine umfangreiche Parametrisierung der vorhandenen Bauwerke durchgeführt werden. So unterqueren beispielsweise viele Fließgewässer den Mittellandkanal durch Düker, welche die maximale Durchflussleistung bei Hochwasser begrenzen. Im Raum Wolfsburg werden 16 Hochwasserrückhaltebecken im Modell berücksichtigt. Die modelltechnische Abbildung dieser Bauwerke erfolgte bereits in früheren Untersuchungen für Teileinzugsgebiete des Allergebietes zur Berechnung von Bemessungsabflüssen. Die hydraulischen Kennda-

ten konnten in das für KliBiW zu erstellende Modell übernommen werden. Eine Zusammenstellung der im Modell berücksichtigten Bauwerke kann dem Anhang 13 entnommen werden.

Die Talsperren im Harz unterliegen im Detail komplexen Steuerungen. Für Kontinuumsimulationen können die Steuerungen nur vereinfacht durch Lamellenpläne mit Monatsbezug berücksichtigt werden, weil manuelle Eingriffe in Hochwasserzeiten nicht a priori bekannt sind. Hierzu gab es eine intensive Abstimmung mit dem Projektpartner Harzwasserwerke GmbH, Hildesheim.

Die in diesem Bericht im Speziellen ausgewerteten Pegel (nachfolgend Referenzpegel genannt) sind als rote Punkte in Abbildung 5-3 eingezeichnet. Die zugehörigen Einzugsgebietsflächen können der Tabelle 5-2 entnommen werden.

Tabelle 5-2: Referenzpegel für die Auswertung in KliBiW

Pegel	Fließgewässer	Fläche [km ²]
Rethem	Aller	14.730
Marklendorf	Aller	7.209
Herrenhausen	Leine	5.304
Poppenburg	Leine	3.463
Groß-Schwülper	Oker	1.734
Northeim	Rhume	1.176
Heinde	Innerste	897
Ohrum	Oker	813

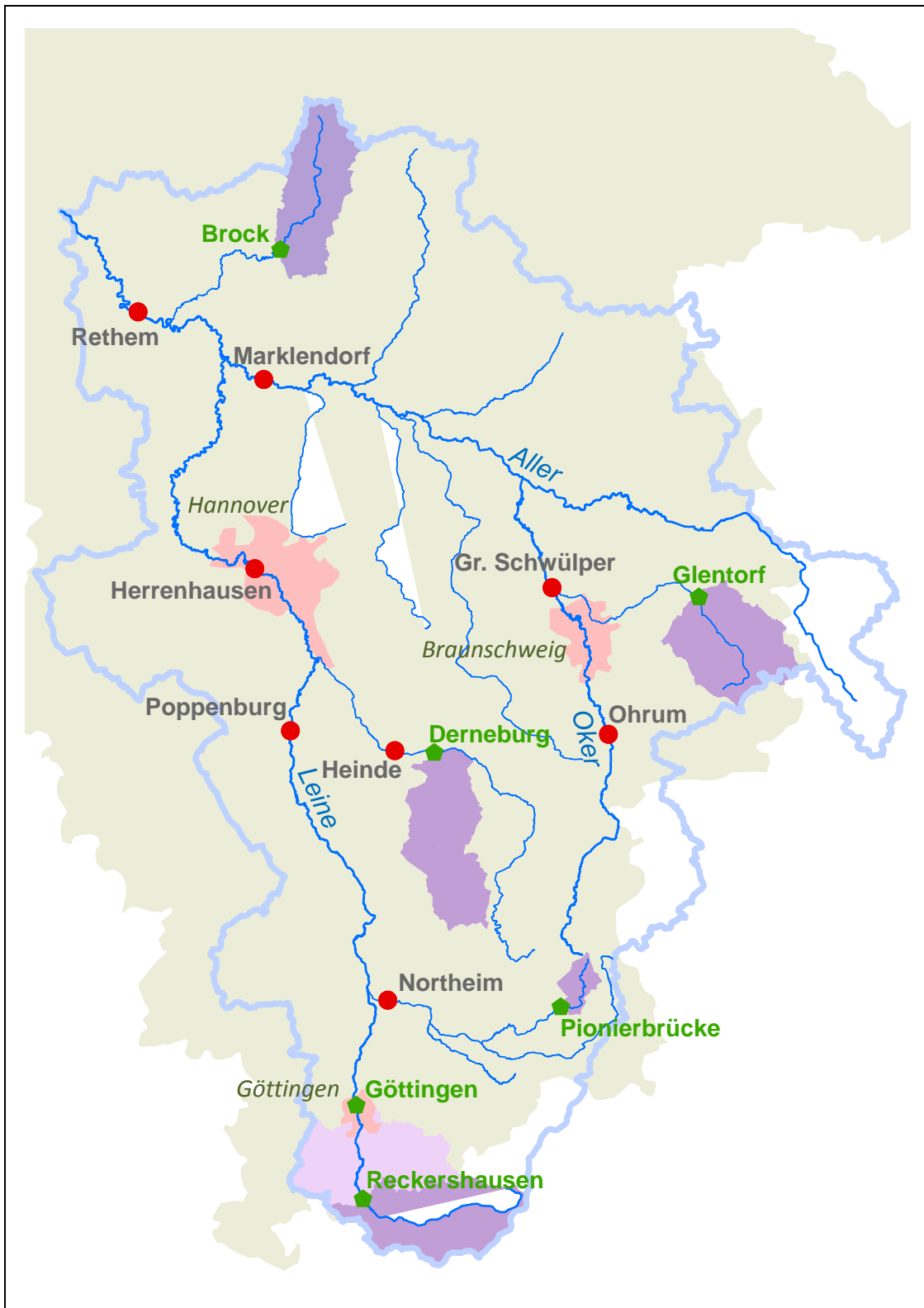


Abbildung 5-3: Das Einzugsgebiet der Aller im südöstlichen Teil Niedersachsens mit Referenzpegeln (rot) an den Flüssen Aller, Leine, Oker, Innerste und Rhume sowie die Detailgebiete mit Pegeln (grün).

5.3.2 Aufbau der Detailgebiete

Für den Aufbau der Detailgebiete wurde analog zur Vorgehensweise des vorigen Abschnitts verfahren. Um Aussagen zum Hochwassergeschehen von deutlich kleineren Gebieten treffen zu können, erfolgte hier eine feinere räumliche Untergliederung der Einzugsgebiete. Die Flächen der Hydrographischen Karte von Niedersachsen wurden sukzessive weiter unterteilt. Dazu wurden die hochaufgelösten digitalen Geländedaten verwendet. Wie aus Tabelle 5-3 ersichtlich, wurden bis auf die Schunter alle Gebiete hinsichtlich der räumlichen Auflösung verfeinert. Die relativ grobe räumliche Auflösung an der oberen Leine bis zum Pegel Reckershausen im Originaldatensatz der Hydrographischen Karte liegt in der generalisierten Erhebung der Flächen in Thüringen begründet. Die mittlere Teilflächengröße konnte durch die Nachbearbeitung von $A_{TFL} = 16,1 \text{ km}^2$ auf $A_{TFL} = 4,5 \text{ km}^2$ reduziert werden. Im Einzugsgebiet

der Sieber wurden neben einer Erhöhung der räumlichen Auflösung zudem die Überleitungen aus Nachbargebieten durch Verzweigungen berücksichtigt.

Das verglichen mit den übrigen Einzugsgebieten kleine Einzugsgebiet der Sieber bis zum Pegel Pionierbrücke weist aufgrund des relativ hohen Geländegefälles die kleinsten Konzentrationszeiten mit ca. 5 Stunden auf. Zudem wird der Oberlauf durch ein Grabensystem beeinflusst, welches Teil des Oberharzer Wasserregals ist. Daher wurde in diesem Gebiet eine besonders kleinere mittlere Teilflächengröße angestrebt. Die Nachbearbeitung veranschaulicht Abbildung 5-4. Neben der Verfeinerung der Teilflächen wurden auch künstliche Gräben, wie z.B. der Sonnenberger Graben in das Modell integriert. Hingegen wurde beim Einzugsgebiet der Schunter bis Pegel Glentorf keine weitere Verfeinerung vorgenommen, da die Hydrographische Karte in diesem Bereich bereits eine geeignete Auflösung für die Aufgabenstellung aufweist.

Tabelle 5-3: Verfeinerung der räumlichen Auflösung der Detailgebiete mit Angabe einer mittleren Teilflächengröße

Pegel	Fließgewässer	Fläche [km ²]	Hydrographische Karte		nach Bearbeitung	
			Anzahl TFL	A_{TFL} [km ²]	Anzahl TFL	A_{TFL} [km ²]
Göttingen	Leine	633	118	5,4	148	4,3
Reckershausen	Leine	321	20	16,1	71	4,5
Derneburg	Nette	309	97	3,2	171	1,8
Glentorf	Schunter	296	134	2,2	134	2,2
Brock	Böhme	285	20	14,3	106	2,7
Pionierbrücke	Sieber	45	12	3,8	73	0,6

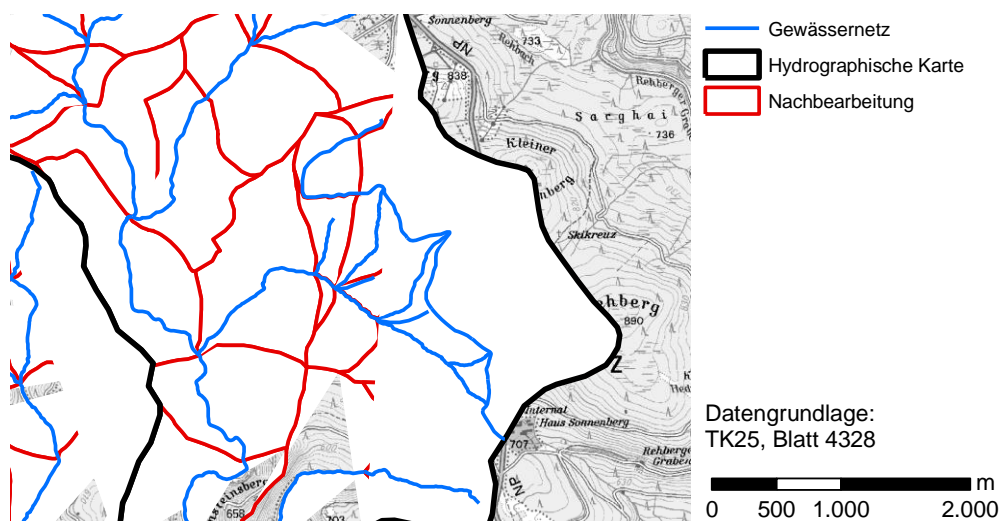


Abbildung 5-4: Gebietsverfeinerung am Beispiel des Siebereinzugsgebietes mit Teilflächenunterteilung nach Hydrographischer Karte und Nachbearbeitung einschließlich Gewässernetz mit künstlichen Gräben.

5.4 Kalibrierung und Validierung

Die hydrologischen Teilprozesse in PANTA RHEI erfordern die Anpassung von Parametern. Da diese Parameter zur Beschreibung der vom Modell nicht aufgelösten Variabilität und Prozessen dienen, müssen diese durch Optimierung angepasst werden. Dafür wird eine Zielfunktion gewählt, welche die Simulationsgüte mit Bezug auf vorliegende Beobachtungen bewertet. 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, welche vom NLWKN bereits aus den Wasserstandsbeobachtungen mit Hilfe von Schlüsselkurven ermittelt worden sind.

Als Zielfunktion wurde die Modelleffizienz (E) nach Nash und Sutcliffe (1970) verwendet. Darüber hinaus wurden Korrelationskoeffizienten (r) sowie der Root Mean Square Error (RMSE) ausgewertet, und es erfolgte ein Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen von Simulation und Beobachtung. Die genannten statistischen Kenngrößen sind z.B. in Hall (2001) zusammengestellt. Die Modelleffizienz reicht von $-\infty$ bis +1. Negative Werte weisen auf schlechte Anpassungen hin. Ein Wert von Null bedeutet, dass die Anpassung gerade so gut ist, wie ein einfacher Vergleich der Mittelwerte. Gute Anpassungen liegen je nach Aufgabenstellung und zeitlicher Auflösung der Datenkollektive im Bereich jenseits von 0,5 bzw. 0,8.

Alle Analysen bzgl. Extremabflüsse basieren hierbei auf der Simulation von Abflüssen für einen ausgewählten Zeitraum (i.d.R. 1971 – 2000) unter Verwendung der Gumbel-Verteilung und können daher von den vom GLD festgelegten HQ-Werten abweichen.

5.4.1 Kalibrierung des Gesamtmodells der Aller bis zum Pegel Rethem

Bei der Kalibrierung wurde das Einzugsgebiet pegelweise sukzessive von den Quellgebieten bis zum Unterlauf bearbeitet. Dazu wurde der Zeitraum November 1971 bis Oktober 1991 pegelweise simuliert und mit den Beobachtungen am Pegel verglichen. Die Optimierung der Parameter, im Wesentlichen der Teilmodule Abflussbildung und Abflusskonzentration, wurde so durchgeführt, dass die langjährigen Wasserhaushaltskomponenten gut wiedergegeben werden. Dazu wurden Parameter angepasst, die die aktuelle Verdunstung in Abhängigkeit vom Bodenwasservorrat und von

der potentiellen Verdunstung beeinflussen. Die Wellenform von nassen Witterungsabschnitten im Allgemeinen und Hochwasserwellen im Speziellen wurde so optimiert, dass das Leerlaufen der vier Speicher (Oberflächen-, Zwischen-, Basis- und Grundwasserabfluss) realitätsgetreu vom Modell nachvollzogen werden kann. Ist die Anpassung eines Pegels zufriedenstellend oder gut, wird die Bearbeitung am nächstfolgenden Pegel fortgesetzt.

Nicht alle Pegel ließen sich gut an die Beobachtungen anpassen. Dies kann in mehreren möglichen Ursachen begründet liegen. Wasserstand-Abfluss-Beziehungen sind im Hochwasserbereich häufig mit großen Unsicherheiten behaftet. Manche Prozesse können im Modell nicht berücksichtigt werden, da zum einen die genauen Gegebenheiten, insbesondere in sehr kleinen Gebieten, nicht immer bekannt sind. Diese Aussage trifft auch auf Bauwerke oder andere wasserwirtschaftliche Maßnahmen zu. Grundwasserentnahmen oder die Bewirtschaftung von Teichen, um zwei Beispiele zu nennen, konnten in KliBiW nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde im Laufe der Projektbearbeitung entschieden, wesentliche Aussagen auf Pegel mit besonderem regionalem Bezug zu beschränken. Dabei handelt es sich zum Beispiel um Pegel, welche von übergeordneter Bedeutung für größere Städte sind oder deren oberhalb liegendes Einzugsgebiet repräsentativ für eine bestimmte Region oder Landschaft ist. Die ausgewählten Pegel sind in der Karte in Abbildung 5-3 eingezeichnet. Bei den roten Punkten handelt es sich um die Referenzpegel im Gesamtgebiet. Hingegen kennzeichnen die grünen Fünfecke die Detailgebiete aus Kapitel 5.3.2. Tabelle 5-4 fasst die Anpassungsgüte der Simulation anhand der zuvor genannten Kenngrößen zusammen.

Tabelle 5-4: Gütekriterien der Simulation nach Kalibrierung (1971-1991)

Pegel	E [-]	r [-]	RMSE [m ³ s ⁻¹]
Groß-Schwülper / Oker	0,85	0,93	3,54
Heinde / Innerste	0,80	0,93	3,11
Herrenhausen / Leine	0,84	0,93	16,30
Marklendorf / Aller	0,84	0,93	12,08
Northeim / Rhume	0,77	0,88	5,95
Ohrum / Oker	0,78	0,90	2,05
Poppenburg / Leine	0,74	0,89	14,32
Rethem / Aller	0,87	0,95	28,44

Sowohl die Modelleffizienz mit Werten von teils über 0,8 als auch die Korrelationskoeffizienten von über 0,9 weisen auf eine gute Anpassung des Modells hin. Um die Belastbarkeit des Modells zu überprüfen, wurden weitere Simulationsläufe für einen im Zuge der Kalibrierung nicht berücksichtigten Zeitraum (November 1991 bis Oktober 2001) bei sonst gleichen Einstellungen durchgeführt. Analog zur Aufbereitung der Kalibrierungsangaben enthält Tabelle 5-5 die entsprechenden Angaben für den Validierungslauf.

Tabelle 5-5: Gütekriterien der Simulation nach Validierung (1991-2001)

Pegel	E [-]	r [-]	RMSE [m³ s⁻¹]
Groß-Schwülper / Oker	0,88	0,94	3,98
Heinde / Innerste	0,79	0,93	3,93
Herrenhausen / Leine	0,85	0,94	18,50
Marklendorf / Aller	0,77	0,96	16,09
Northeim / Rhume	0,76	0,91	6,45
Ohrum / Oker	0,84	0,92	2,50
Poppenburg / Leine	0,78	0,92	16,25
Rethem / Aller	0,84	0,96	38,12

Verglichen mit den Gütekriterien, welche bei der Kalibrierung erzielt wurden, konnten die simulierten Abflüsse im Validierungszeitraum zum Teil besser wiedergegeben werden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass das vorliegende, angepasste Modell der Aller ein prognosefähiges Modell ist. Die Abbildung 5-5 zeigt exemplarisch für den Pegel Rethem / Aller die bei der Kalibrierung und Validierung simulierten Zeitreihen des Tagesmittelwertes des Abflusses. Der Vergleich mit der Beobachtungsreihe erlaubt eine visuelle Kontrolle der statistischen Aussagen zur Simulationsgüte.

Im Rahmen der Kalibrierung wurden auch die Jahreshöchstwerte der Tagesmittelwerte des Abflusses als Jahres-HQ untersucht. Dies ist zulässig, da die Einzugsgebiete relativ große Flächen aufweisen und Tageswerte eine brauchbare Aussage zum Hochwasser liefern können und ohnehin nur Tagesniederschläge zu Grunde gelegt wurden. Abbildung 5-6 stellt simulierte beobachtete Jahreshöchstwerte des Tagesmittelwertes des Abflusses (hier im folgenden HQ genannt) für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum gegenüber. Für den hier gezeigten Pegel Rethem / Aller konnten die beobachteten HQ-Werte gut wiedergegeben werden, obwohl der mittlere Hochwasserabfluss (MHQ) in der Simulation leicht überschätzt wird (Tabelle 5-6). Die übrigen Pegel weisen eine bessere Übereinstimmung der simulierten mit den beobachteten mittleren Hochwasserabflüssen auf. Das Modell zeigt damit auch hier eine insgesamt gute Anpassung, sowohl hinsichtlich des Wasserhaushalts als auch in Bezug auf Hochwasser. Zu beachten ist, dass bei der Auswertung der Hochwasserereignisse der gesamte Zeitraum einschließlich Kalibrierungs- und Validierungsphase untersucht wurde, um einen ausreichend großen Stichprobenumfang für die Statistik zu erhalten.

Anhand des Vergleichs der mittleren Hochwasserabflüsse für das Winter- und Sommerhalbjahr wird deutlich, dass die Hochwasserereignisse im Winterhalbjahr im Mittel deutlich über den mittleren Sommerereignissen liegen (vgl. auch Abbildung 5-7).

Am Beispiel des Pegels Herrenhausen / Leine sind abschließend die Ergebnisse einer saisonalen, nach Gesamt-, Winter- und Sommerhalbjahr differenzierten Hochwasserstatistik zusammengefasst (Tabelle 5-7). Demnach zeigen die mit PANTA RHEI simulierten Hochwasserereignisse eine gute Übereinstimmung mit der aus Beobachtungsdaten ermittelten Statistik.

Tabelle 5-6: Beobachtete und simulierte Höchstwerte des Tagesmittelwertes des Abflusses (MHQ), 1971-2001.

Pegel	MHQ Jahr [m³ s⁻¹]		MHQ Winter [m³ s⁻¹]		MHQ Sommer [m³ s⁻¹]	
	Beob.	Sim.	Beob.	Sim.	Beob.	Sim.
Gr. Schwülper	57	57	56	54	28	28
Heinde	51	51	48	49	22	22
Herrenhausen	221	230	221	228	103	96
Marklendorf	152	175	150	173	70	75
Northeim	90	77	87	78	40	34
Ohrum	29	33	28	30	15	18
Poppenburg	169	176	170	175	77	70
Rethem	396	463	394	460	180	188

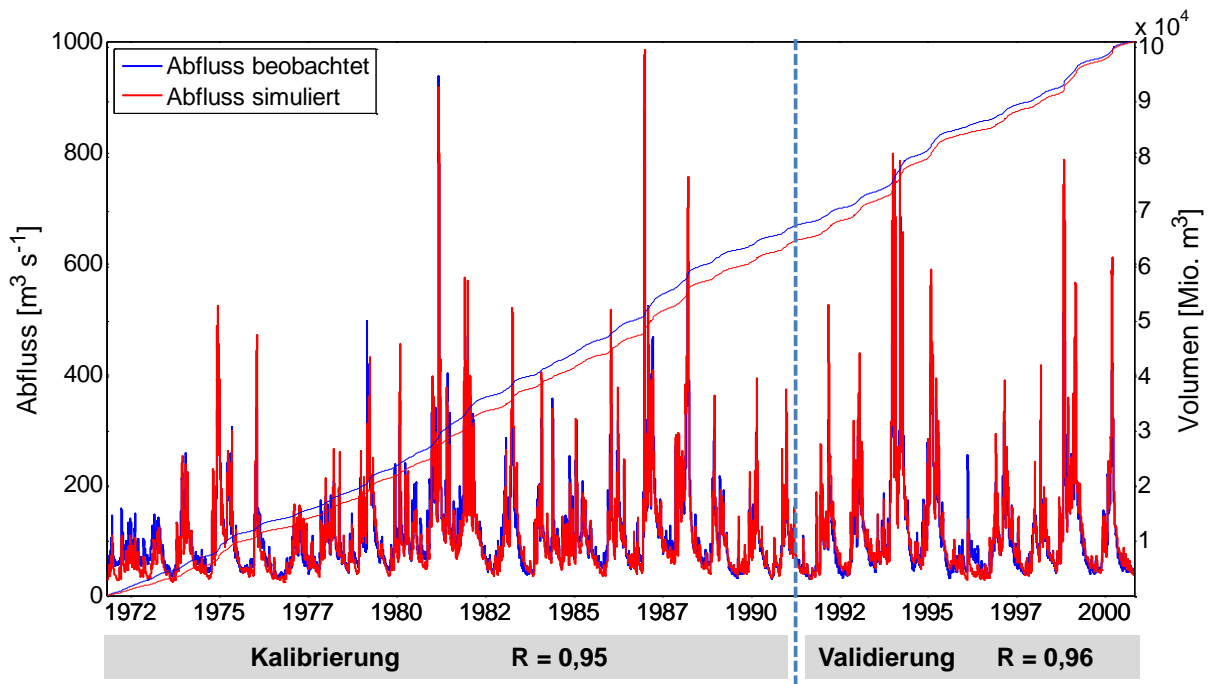


Abbildung 5-5: Kalibrierung und Validierung des Modells am Beispiel des Pegels Rethem / Aller.

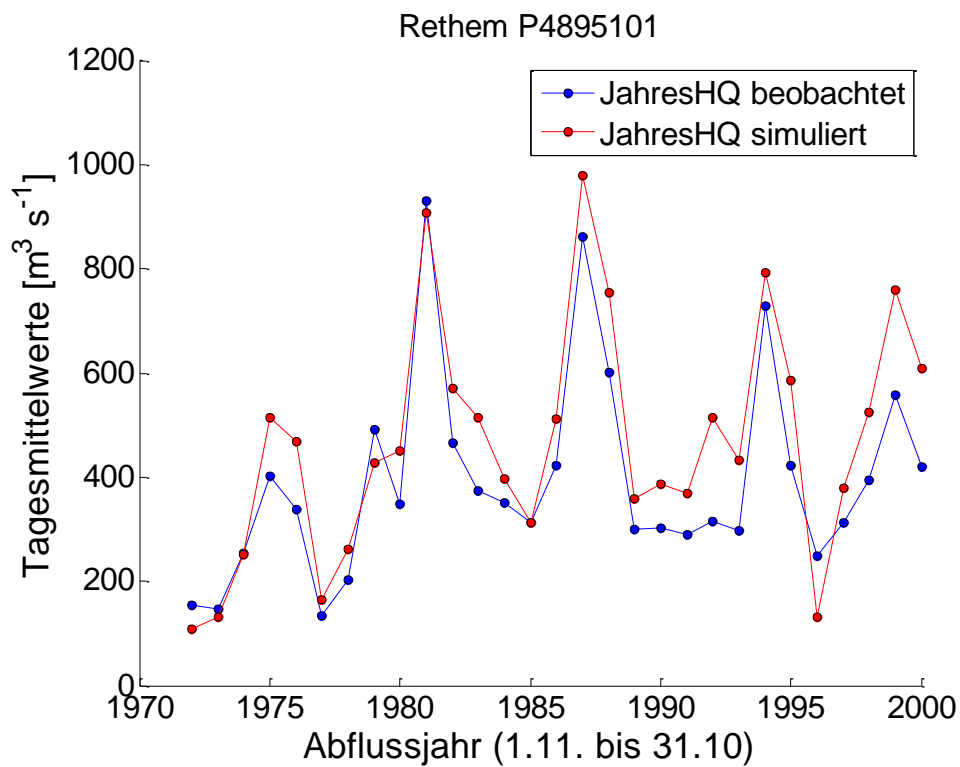


Abbildung 5-6: Kalibrierung und Validierung des Modells hinsichtlich Jahres-HQ am Beispiel des Pegels Rethem / Aller.

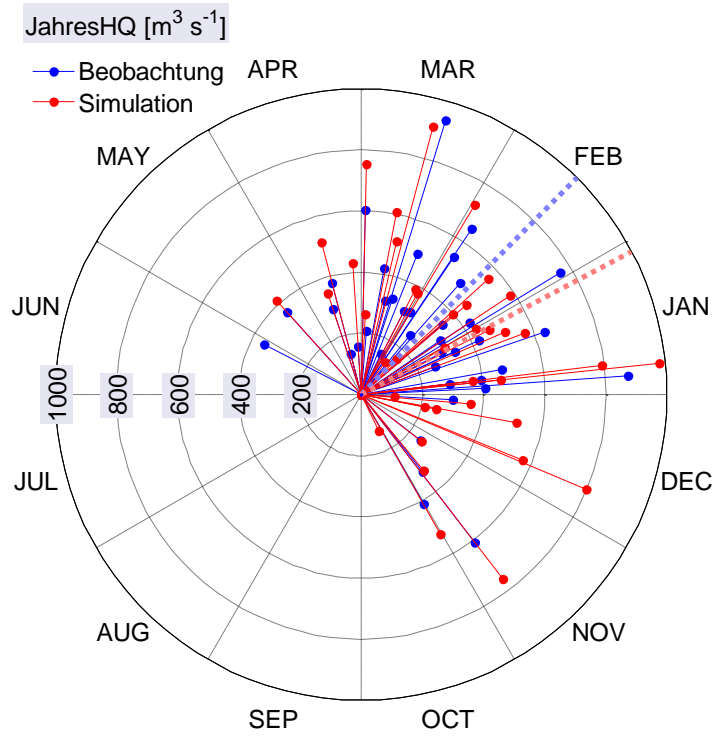


Abbildung 5-7: Vergleich der simulierten und beobachteten Hochwasserereignisse am Pegel Rethem / Aller unter Berücksichtigung der Absolutwerte und des Zeitraums des Auftretens innerhalb eines Jahres.

Tabelle 5-7: Saisonale Hochwasserstatistik für den Pegel Herrenhausen / Leine.

Q [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	Gesamtjahr		Winter		Sommer	
	Beob.	Sim.	Beob.	Sim.	Beob.	Sim.
MHQ	221	230	221	228	103	96
HQ2	205	214	203	211	94	86
HQ3	246	257	248	255	118	112
HQ5	291	305	299	303	144	140
HQ10	348	365	362	364	177	176
HQ20	402	422	423	422	208	210
HQ30	434	456	458	455	226	229
HQ50	473	497	501	497	249	254
HQ100	526	553	560	554	279	287

5.4.2 Kalibrierung der Detailgebiete

Die Pegel der Detailgebiete wurden mit dem Fokus auf Hochwasserereignisse kalibriert, wobei viele Parameter bereits aus der Kalibrierung des Gesamtgebietes vorlagen. Wegen der kürzeren Konzentrationszeiten kleinerer Gebiete sind zeitlich höher aufgelöste Niederschlagsdaten für die Modellierung unerlässlich. Für die Referenzpegel mit ihren Einzugsgebietsflächen von zum Teil mehreren tausend Quadratkilometern sind hingegen Tageswerte des Niederschlags ausreichend.

Niederschlagsdaten mit Stundenauflösung weisen weder die Messnetzdichte noch die klimatologisch relevante Zeitreihenlänge für Langzeitkontinuumsimulationen auf. Dies liegt darin begründet, dass mechanische, registrierende Niederschlagsmesser sehr aufwendig digitalisiert werden müssen und neuere Systeme mit Kippwaage oder wägendem Messprinzip noch nicht so lange im operativen Einsatz sind. Aus diesem Grund wurde in TP1 eine Disaggregation von Tagesniederschlägen für die Detailgebiete erarbeitet, welche für hochwasserstatistische Auswertungen ausreichend lange Stundenwertzeitreihen erzeugt (vgl. Kapitel 0).

Für die Kalibrierung der Teilgebiete wurde ein Datensatz mit Stundenniederschlägen für das Allergebiet für die Jahre 2002 bis einschließlich 2008 aus TP1 bereitgestellt. Die aus dem kalibrierten und validierten Gesamtmodell ermittelten Parameter wurden hinsichtlich der Belastung mit höheraufgelösten Niederschlagsdaten optimiert. Wegen der kurzen Zeitreihen, verbunden mit der zuvor erläuterten Problematik, wurde entschieden, auf eine separate Validierungsphase zu verzichten, was als zulässig angesehen wurde, da die Kalibrierung von dem validierten Gesamtmodell ausging. Abschließend konnten im Zuge der Kalibrierung die folgenden Werte der Simulationsgüte erzielt werden (Tabelle 5-8):

Tabelle 5-8: Gütekriterien für die Pegel der Detailgebiete nach Kalibrierung (2002-2008)

Pegel	E [-]	r [-]	RMSE [m ³ s ⁻¹]
Göttingen / Leine	0.80	0.90	2.19
Reckershausen / Leine	0.65	0.87	1.35
Derneburg / Nette	0.69	0.84	2.05
Glentorf / Schunter	0.65	0.81	1.26
Brock / Böhme	0.76	0.91	1.06
Pionierbrücke / Sieber	0.71	0.86	1.20

Die erreichten Modelleffizienzwerte und Korrelationskoeffizienten sind kleiner als bei den Tagesmittelwertauswertungen der Referenzpegel. Eine Abhängigkeit der Ergebnisse zu der Einzugsgebietsgröße der Teilgebiete ist nicht erkennbar. Abgesehen von Brock und Göttingen konnte auch am Pegel des relativ kleinen Siebereinzugsgebiets bei der Kalibrierung eine bessere Modelleffizienz erzielt werden als bei den verbleibenden größeren Gebieten.

Abbildung 5-8 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung für den Pegel Brock/Böhme. Sowohl die simulierten Stundenwerte des Abflusses als auch die simulierten Jahreshöchstwerte (HQ) des Abflusses stimmen gut mit den Beobachtungen ein. Kritisch anzumerken ist, dass nicht an allen Pegel größere Hochwasserereignisse in der kurzen Kalibrierungszeitreihe auftraten. Daher sind die Anpassungen als weniger sicher einzustufen als die deutlich längeren Kalibrierungsläufe der Referenzpegel. Wegen des geringen Stichprobenumfangs des Kalibrierungszeitraums wurde keine Hochwasserstatistik für Pegel der Detailgebiete aufgestellt.

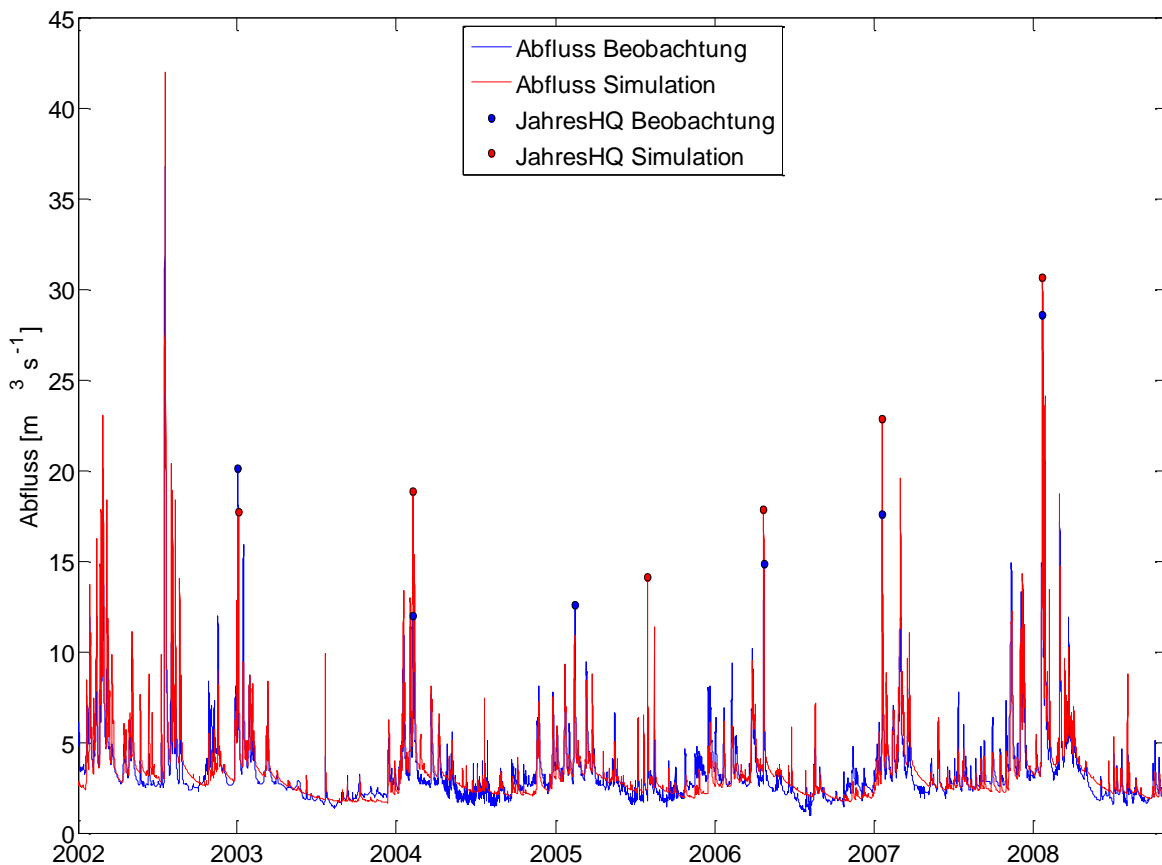


Abbildung 5-8: Kalibrierung der Detailgebiete mit Stundenwerten des Niederschlags am Beispiel des Pegels Brock / Böhme.

5.5 Simulationen mit Klimamodelldaten

Mit dem kalibrierten und validierten Flussgebietsmodell der Aller wurden zur Beurteilung der zukünftigen Entwicklung des Wasserhaushaltes Kontinuumssimulationen mit dem folgenden Ensemble des Klimaszenarios A1B durchgeführt:

- A1B, WETTREG2006 (20 Realisationen im Gesamtgebiet, 3 Realisationen in den Detailgebieten)
- A1B, REMO UBA sowie REMO BfG

Alle meteorologischen Felder wurden im TP1 aufbereitet und konnten - wie auch die Beobachtungsdaten - direkt vom Modell PANTA RHEI verarbeitet werden. Bei WETTREG2006 wurden für das Gesamtmodell alle 20 Realisationen, für die Detailgebiete wegen des hohen Disaggregierungsaufwandes nur 3 Realisationen berücksichtigt. Im Laufe der Projektbearbeitung verständigten sich die Projektbeteiligten auf die folgende Vorgehensweise bei der Auswahl der 3 zu disaggregierenden Realisationen. Ziel war es, mit möglichst weni-

gen Läufen eine „repräsentative Bandbreite“ für WETTREG2006 hinsichtlich „nasser“, „mittlerer“ und „trockener“ Tendenzen zu erhalten. Als Auswahlkriterien für diese Eigenschaften wurden die resultierenden Mittelwasserabflüsse und Hochwasserquantile aus den Tageswertsimulationen aller 20 Realisationen des Szenarios A1B (2001 – 2100) am Pegel Rethem herangezogen. Die jeweiligen Werte wurden für jede Realisation berechnet und mit dem Mittel über alle 20 Realisationen in Beziehung gesetzt (prozentuale Abweichung), bei den Extremwerten erfolgte dies anhand ausgewählter Jährlichkeiten (HQ2 bis HQ100). Durch ein qualitatives Ranking wurde je eine Realisation aus der Gruppe der tendenziell eher „nassen“, „mittleren“ bzw. „trockenen“ Läufe identifiziert und ausgewählt. Die Wahl fiel auf die Realisationen 3 (mittel), 13 (trocken) und 18 (nass), vgl. auch Anhang 14.

Wie obig erläutert, werden zunächst die Kontrollläufe (20C), also die Vergleichsläufe, welche das Klima des 20. Jahrhunderts im Zeitraum 1961 bis 2000 widerspiegeln, simuliert und ausgewertet. Anhand der Übereinstimmung bzw. Abweichungen zu den Beobachtungen in diesem Zeitraum können erste Aussagen zur Belastbarkeit der Simulationen erfolgen. Für

die Rechenläufe mit REMO waren keine zusätzlichen Disaggregationen notwendig, da Eingangsdaten in REMO bereits in Stundenauflösung vorliegen.

Es wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die statistisch berechneten Extremwerte der Beobachtung aufgrund des eingegrenzten Betrachtungszeitraumes, z.T. durch die Betrachtung von Tageswerten und der Verwendung der Gumbelverteilung von den festgelegten HQ-Werten abweichen können.

5.5.1 Auswertung der Kontrollläufe in Hinblick auf den Wasserhaushalt

Die berechneten Wasserhaushaltsgrößen der Kontrollläufe der WETTREG2006-Realisationen und der beiden REMO-Läufe wurden zunächst hinsichtlich Ihrer Übereinstimmung mit dem Beobachtungszeitraum untersucht. Verglichen wurden der Gebietsniederschlag und der Abfluss an den untersuchten Pegeln. Der Übersicht halber wurden beide Größen in einer Abbildung als Niederschlagshöhe und Abflusshöhe in Milli-

metern pro Monat zusammengestellt. Andere Klimavariablen wie z.B. die Temperatur wurden hier nicht weiter untersucht. Der Gebietsniederschlag aus den WETTREG2006-Realisationen wurde aus der Auswertung der Eingangsdaten ermittelt und dem beobachteten Gebietsniederschlag gegenübergestellt. Die Abflusshöhen wurden durch Simulation mit PANTA RHEI ermittelt und dem Lauf mit den historischen Daten gegenübergestellt sowie zur besseren Vergleichbarkeit auch mit den Beobachtungen verglichen.

Für die WETTREG2006-Läufe wurden an einigen Pegeln erhebliche Abweichungen gegenüber der Beobachtung festgestellt. Abbildung 5-9 zeigt Niederschlags- und Abflusshöhen aus 20 WETTREG2006-Realisationen für den Pegel Ohrum / Oker. Die aus den WETTREG2006-Realisationen gewonnenen Gebietsniederschläge liegen deutlich über den entsprechenden Werten der Beobachtung. Infolge dessen liegen die mit PANTA RHEI ermittelten Abflusshöhen ebenfalls über den Beobachtungen.

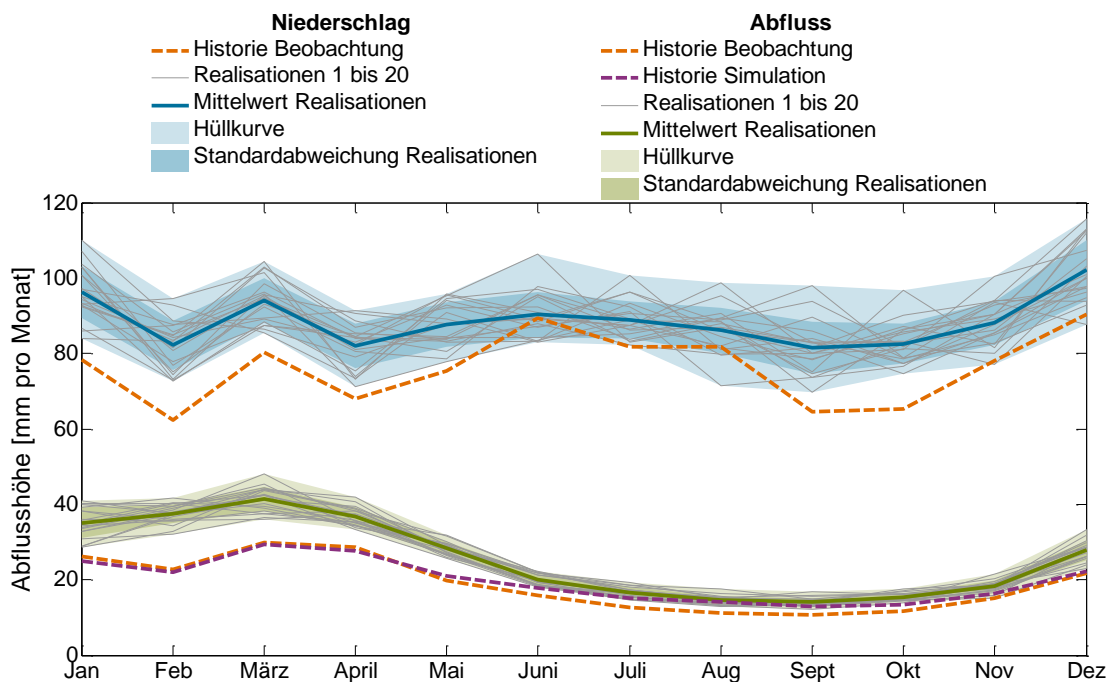


Abbildung 5-9: Monatsmittel von Niederschlags- und Abflusshöhe aus 20 WETTREG2006-Realisationen am Pegel Ohrum / Oker (Original-WETTREG2006-Datensatz).

Ausgehend von diesen Ergebnissen, wurde der interpolierte WETTREG2006-Datensatz auf systematische Abweichungen gegenüber beobachteten mittleren jährlichen Niederschlagssummen hin untersucht. Dazu wurden Karten erstellt, welche den Quotienten der Niederschlagssummen aus den WETTREG-Rastern dividiert durch die entsprechenden Niederschlagssummen aus dem Beobachtungsdatensatz enthalten. Dieser Quotient ergibt ein räumliches Muster, wie es in Abbildung 5-10 dargestellt ist. Blaue Bereiche (> 1) weisen auf eine Überschätzung des WETTREG2006-Datensatzes gegenüber der Beobachtung hin, wohingegen rote Bereiche auf eine Unterschätzung zurückzuführen sind. Für den Pegel Rethem am Unterlauf der Aller beträgt das Gebietsmittel des Quotienten ca. 1.0.

Es wurde im Laufe der Projektbearbeitung entschieden, die stets ähnlichen auftretenden räumlichen Abweichungen in den WETTREG-Realisationen auszugleichen. Komplexe Verfahren, welche jahreszeitliche Abhängigkeiten berücksichtigt, konnten aus Zeitgründen nicht erbracht werden. Daher wurden die Niederschlagszeitreihen des interpolierten WETTREG2006-Datensatzes linear korrigiert, sodass die Jahresniederschlagssummen des Kontrolllaufes aus den WETTREG 2006-Realisationen mit der Beobachtung übereinstimmen. Ferner wurde angenommen, dass diese Korrektur ihre Gültigkeit bei der Verwendung mit Zukunftsszenarien nicht verliert. Für den Pegel Ohrum / Oker konnten mit dieser einfachen Korrektur deutlich bessere Übereinstimmungen mit den Beobachtungen erzielt werden (Abbildung 5-11).

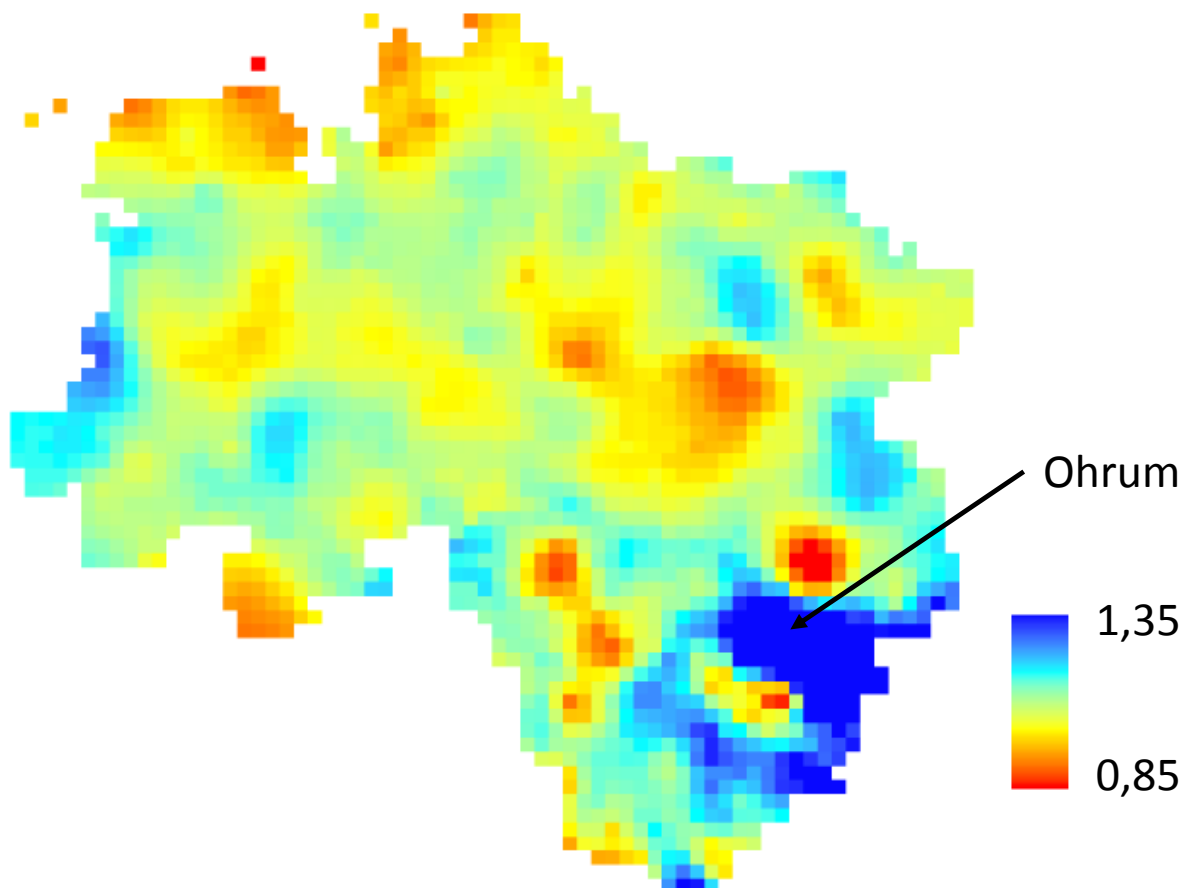


Abbildung 5-10: Quotientenkarte der Jahresniederschlagssummen aus der WETTREG2006-20C-Interpolation und der Beobachtung. Werte größer 1 weisen auf höhere Niederschlagssummen im interpolierten WETTREG2006-Datensatz hin, Werte kleiner 1 bedeuten, dass im interpolierten WETTREG2006-Datensatz für das entsprechende Rasterfeld eine geringere Niederschlagssumme enthalten ist als in der Beobachtung.

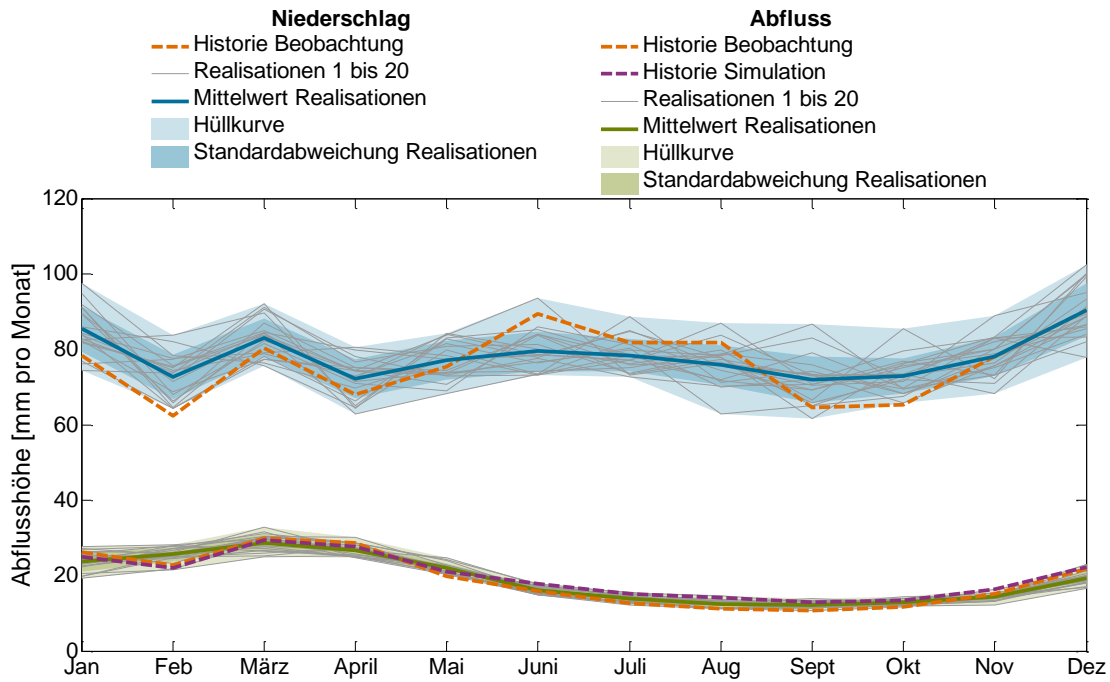


Abbildung 5-11: Monatsmittel von Niederschlag- und Abflusshöhe aus 20 WETTREG-Realisationen am Pegel Ohrum / Oker (modifizierter WETTREG-Datensatz).

Für den untersten Pegel im Gebiet, Rethem / Aller, sind die korrigierten 20C-Läufe von WETTREG2006 in Abbildung 5-12 enthalten. Die Abbildungen für die übrigen Referenzpegel sind in Anhang 15 zu finden. In allen Fällen konnte eine zum Teil wesentliche Verbesserung der Anpassung sowohl der monatsgemittelten Niederschläge als auch der resultierenden Abflüsse auf diese Weise erreicht werden

Bei den Kontrollläufen des dynamischen regionalen Klimamodells REMO ergaben sich ebenfalls Abweichungen zu den Beobachtungen. Hier zeigten sich zum Teil erhebliche Abweichungen, insbesondere im Sommer (Abbildung 5-13, Anhang 16). Da wegen der star-

ken saisonalen Unterschiede in den Abweichungen keine pauschale, auf Jahresmitteln beruhende Anpassung wie bei WETTREG2006 möglich war, wurde hier auf eine Korrektur verzichtet. Bei der späteren Bewertung und Interpretation der simulierten Abflussszenarien wurde aber versucht, diese Tendenzen von REMO mit zu berücksichtigen.

Die Wasserhaushaltssimulationen auf Grundlage der Kontrollläufe spiegeln den Wasserhaushalt der Einzugsgebiete an den Referenzpegeln gut wider. Die besten Übereinstimmungen konnten mit den modifizierten WETTREG2006-Läufen erzielt werden.

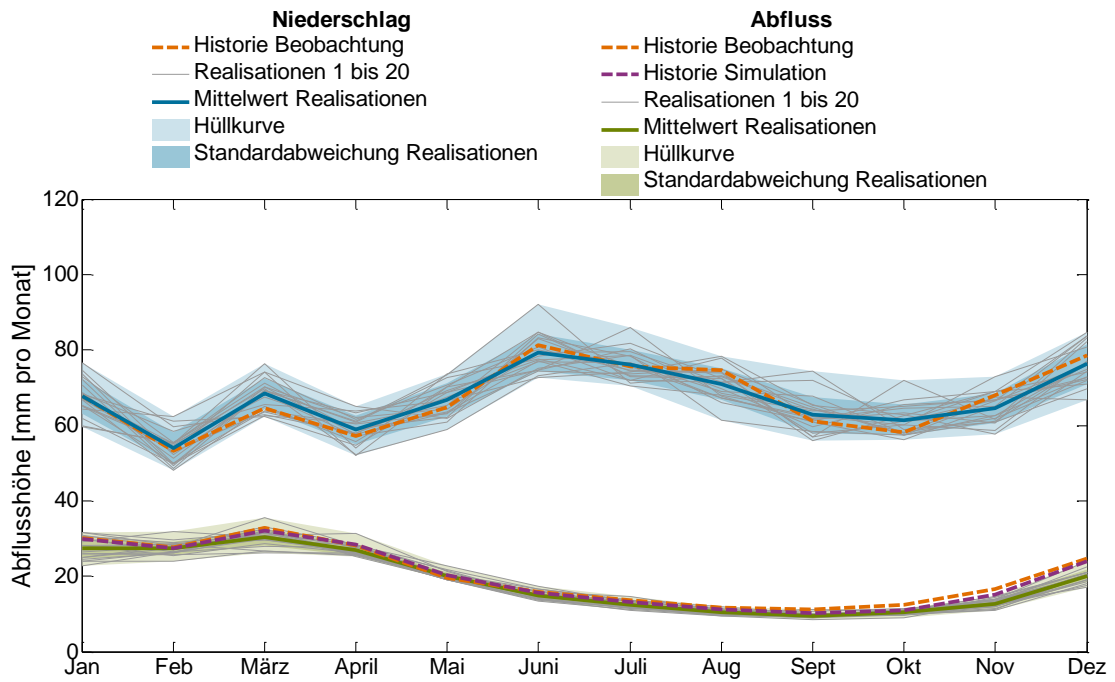


Abbildung 5-12: Monatsmittel von Niederschlag- und Abflusshöhe aus 20 WETTREG-Realisationen am Pegel Rethem / Aller.

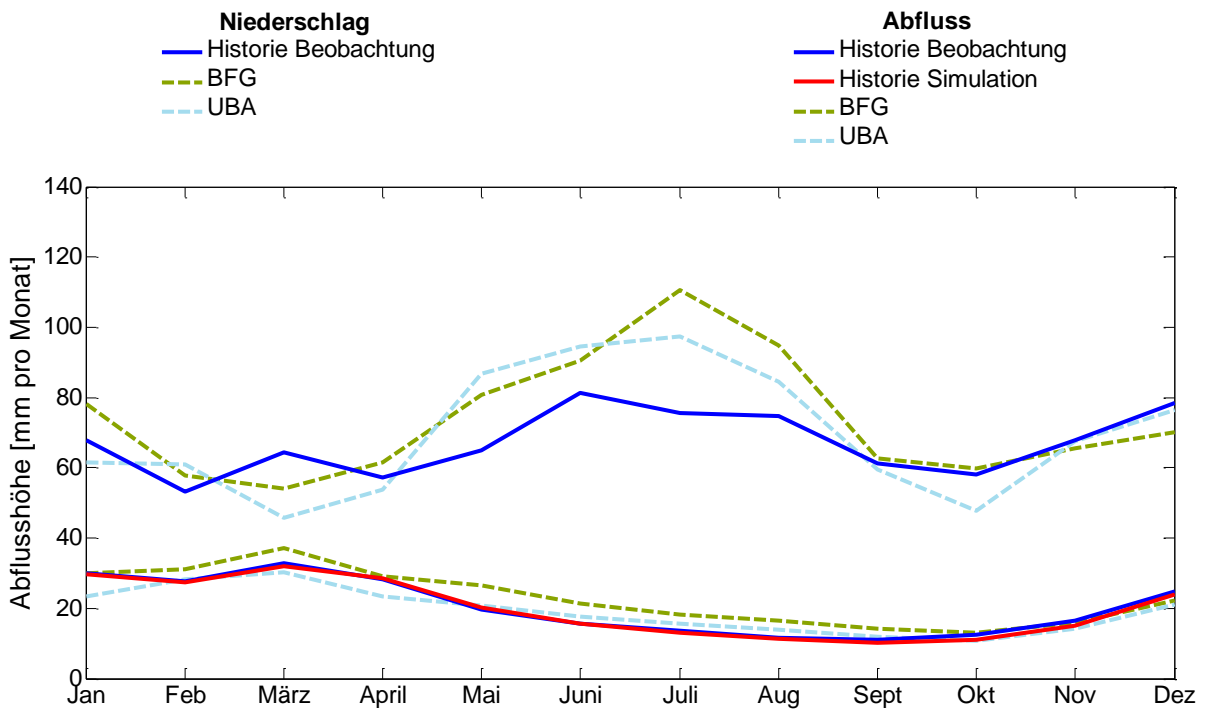


Abbildung 5-13: Monatsmittel von Niederschlag und Abfluss aus 2 REMO-Läufen am Pegel Rethem / Aller.

5.5.2 Auswertung der Kontrollläufe unter Berücksichtigung von Hochwasserkenngößen

Neben der Auswertung der Wasserhaushaltskomponenten (hier: Niederschlag und Abfluss) sollen im Projekt KliBiW insbesondere auch Aussagen zu möglichen Hochwasserkenngößen erarbeitet werden. Daher werden die aus den Kontrollläufen ermittelten Ergebnisse auch hinsichtlich Hochwasser ausgewertet. Neben der Darstellung von Verteilungsfunktionen und der Auswertung bestimmter Jährlichkeiten werden zunächst die MHQ-Werte für die Pegel unter Berücksichtigung aller vorliegenden Szenarien in Anhang 17 aufgelistet. Für WETTREG2006 wurden jeweils die MHQ-Werte aller 20 Realisationen gemittelt. WETTREG2006 zeigt im Kontrolllauf gute Übereinstimmungen mit den Beobachtungen (die Simulation mit historischen Daten ist hier der Übersicht halber nicht erneut aufgeführt

worden). Bei REMO zeigen sich an einigen Pegeln größere Abweichungen (z.B. Ohrum / Oker). Für die Beobachtung, die Simulation mit historischen Klimadaten sowie die Kontrollläufe wurden Hochwasserstatistiken erstellt. In Abbildung 5-14 sind die mit Hilfe der Momentenmethode angepassten Gumbel-Verteilungen für alle Simulationsläufe im 20C-Zeitraum eingetragen (Pegel Rethem / Aller). Für WETTREG 2006 wurde eine Mittelung der Jährlichkeiten aus den Ergebnissen der 20 Realisationen ergänzt. Die Verteilungsfunktionen der übrigen Pegel können Anhang 18 entnommen werden. Das Hochwassergeschehen wird auf Grundlage von WETTREG und REMO gut wiedergegeben. Innerhalb des Gebietes konnten darüber hinaus auch bessere Simulationen mit den historischen Daten erzielt werden als für Rethem / Aller, den untersten Pegel. Die größten im Vergleichszeitraum beobachteten Hochwasserereignisse konnten jedoch auch am Pegel Rethem / Aller gut wiedergegeben werden.

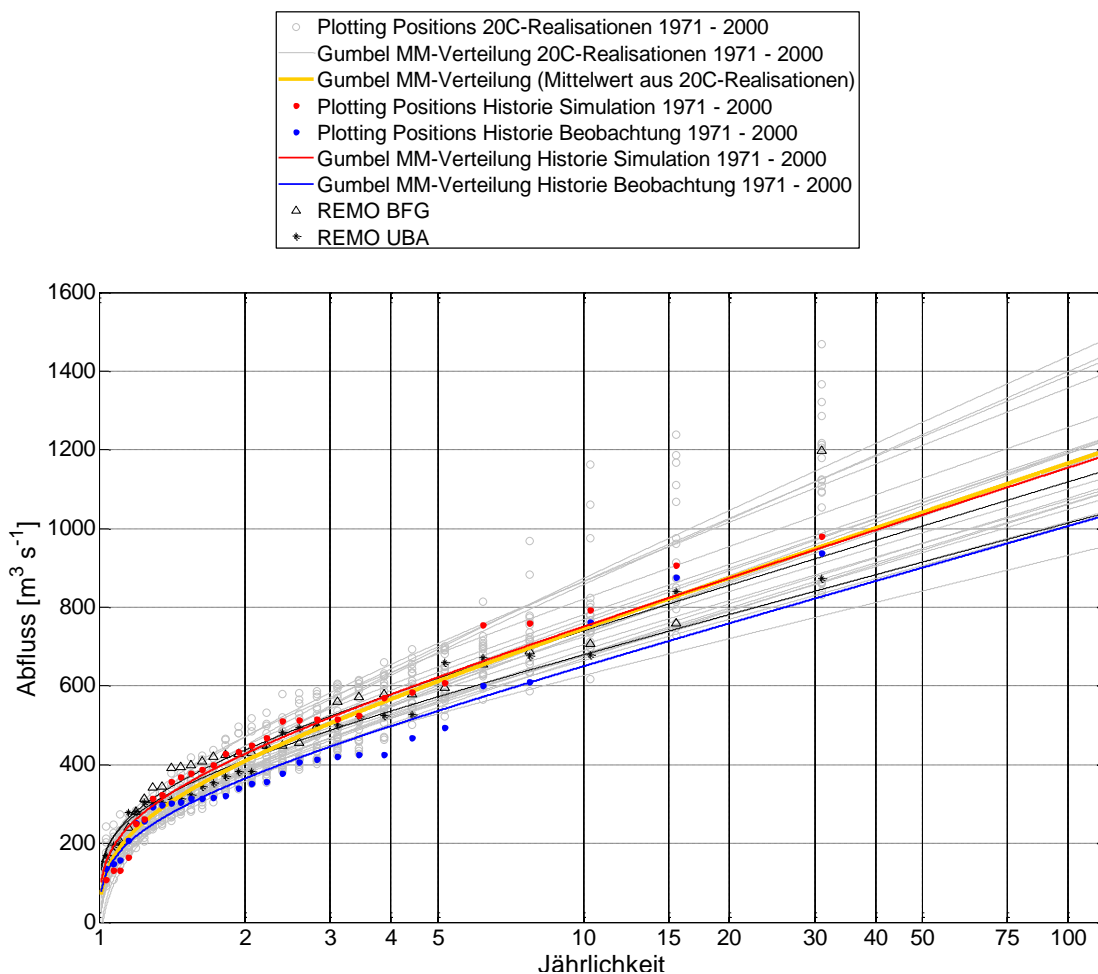


Abbildung 5-14: Hochwasserstatistik Pegel Rethem / Aller (Beobachtung, WETTREG2006 und REMO), Tageswertbasis. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilung.

5.5.3 Auswertung der Kontrollläufe für die Detailgebiete

Für die Pegel der Detailgebiete wurden Auswertungen hinsichtlich der Hochwasserscheitel auf Basis von Stundenwerten durchgeführt. Die Kalibrierung der Detailgebiete wurden über den Zeitraum 2002 bis 2008 im Hinblick auf das Abflussverhalten bei Hochwasser optimiert. Im Gegensatz zu den Kalibrierungsläufen konnten die mit 30 Jahren Dauer deutlich längeren Zeitreihen der Szenarien mit den Methoden der Hochwasserstatistik untersucht werden. Die WETTREG2006-Läufe, welche originär nur als Tageswerte vorliegen, wurden in TP1 mit einem Kaskadenmodell auf Stundenschnittweite disaggregiert. Dabei wurden die Intensitätsverläufe innerhalb eines Tages in je einem zusätzlichen Lauf noch parallelisiert (vgl. Kapitel 3.5.3.1). Daher existieren für die drei disaggregierten WETTREG-Realisationen jeweils zwei Läufe für den Kontrollzeitraum und das Zukunftsszenario A1B.

Für den Pegel Brock / Böhme sind in Abbildung 5-15 die Plotting Positions (beobachtete Jahreshöchstwerte) und die ermittelten Gumbel-Verteilungen für den 20C-Zeitraum eingetragen. Die ermittelten Verteilungsfunktionen aus den WETTREG2006-Läufen

geben die Statistik, die aus Beobachtungsdaten ermittelt wurde, gut wieder. Beide REMO-Läufe überschätzen die Hochwasserereignisse im Zeitraum 1971-2000 ab einer Jährlichkeit von 5 bis 10 Jahren.

Die übrigen Pegel der Detailgebiete wurden nach der gleichen Vorgehensweise ausgewertet (siehe Anhang 19). Für Derneburg / Nette, Glentorf /Schunter sowie Pionierbrücke / Sieber konnten mit den Modell-daten gute Ergebnisse in Bezug auf die vorliegenden Beobachtungen erhalten werden. An der Leine ist der höchste Wert in der Beobachtung für die Pegel Reckershausen und Göttingen das Hochwasser im Jahr 1981, welches deutlich über den übrigen Ereignissen liegt und damit – statistisch gesehen – nicht aus der gleichen Grundgesamtheit stammt. Diesem Hochwasser müsste daher eine deutlich geringere Unterschreitungswahrscheinlichkeit (=eine deutlich höhere Jährlichkeit) zugeordnet werden, als es aus der Lage der Plotting Positions ersichtlich ist. Diese Problematik wirkt sich natürlich auch auf die aus den Beobachtungsdaten erstellte Verteilungsfunktion aus. Sieht man von diesem einen, für diese Reihe außergewöhnlichen Hochwasserereignis ab, passen die aus den WETTREG2006- und REMO-Daten abgeleiteten Verteilungen relativ gut zu den Ereignissen.

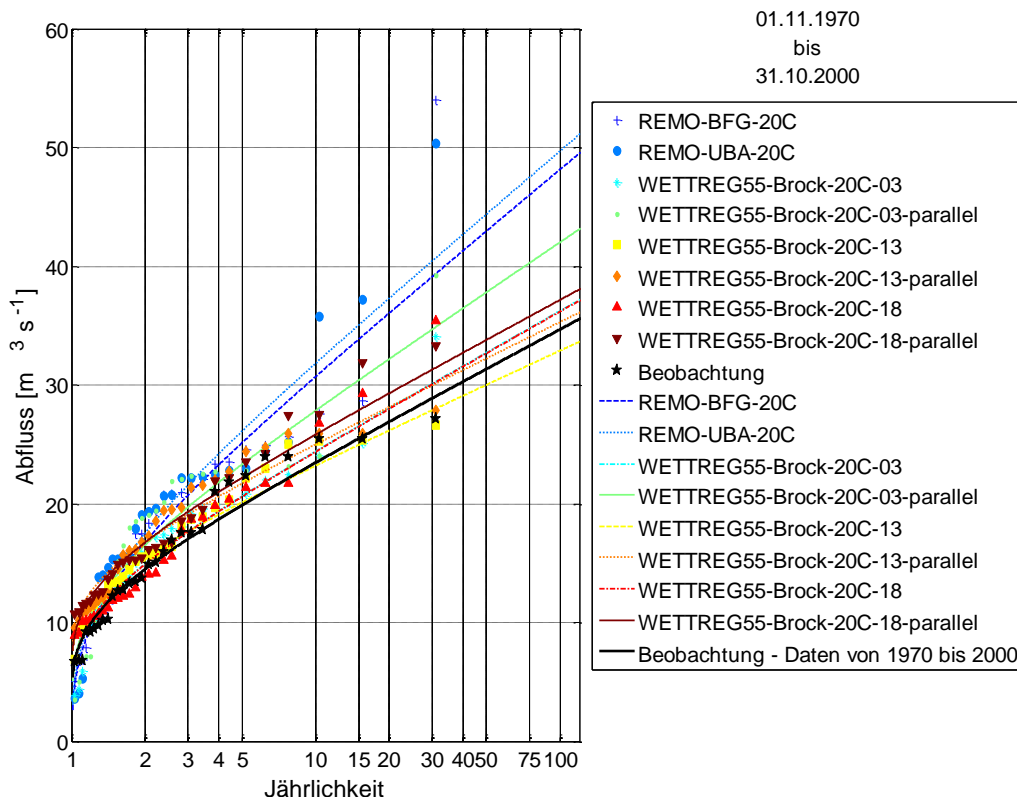


Abbildung 5-15: Hochwasserstatistik Pegel Brock / Böhme (1971 – 2000, Anpassungen mit Gumbel-Verteilung), Stundenwertbasis.

5.5.4 Auswertung der Zukunftsszenarien in Hinblick auf den Wasserhaushalt

Die Auswertung der Zukunftsszenarien erfolgte anhand der gleichen Vorgehensweise wie bei der Auswertung der Kontrollläufe (20C). Neben mittleren Abflusshöhen wurden auch Hochwasserkenngrößen ermittelt. Letzgenannte sind Gegenstand des nächsten Abschnittes. Die Veränderungen dieser Kenngrößen beziehen sich stets auf die entsprechenden Kontrollläufe.

Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17 stellen die mittleren monatlichen Abflusshöhen für den Pegel Rethem / Aller für die Zeiträume 1971-2000 (20C, Kontrolllauf), 2021-2050 (A1B-Szenario, „nahe Zukunft“) sowie 2071-2100 (A1B-Szenario, „ferne Zukunft“) für WETTREG2006 bzw. REMO gegenüber. Zusätzlich sind die beobachteten (blau) sowie aus den historischen Klimadaten ermittelten mittleren monatlichen Abflusshöhen in den Darstellungen enthalten, um einen Vergleich der Klimamodelldaten mit Beobachtungsdaten einerseits und um die Güte der Anpassung andererseits einschätzen zu können. Wie zuvor beschrieben, gibt das mit WETTREG2006 angetriebene hydrologische Modell die Vergangenheit statistisch gut wieder (unter Berücksichtigung der systematischen Abweichungen). Mit REMO-BfG (Abbildung 5-17, Anhang 21) und

REMO-UBA (Anhang 20) konnten nur weniger gute Anpassungen erzielt werden. Zum Beispiel überschätzt REMO-BfG die mittlere monatliche Abflusshöhe in den Frühjahrsmonaten, während REMO-UBA Winterabflüsse unterschätzt.

Im Falle der WETTREG2006-Läufe ist eine deutliche Zunahme der mittleren Abflusshöhe im Winter den Auswertungen aus Abbildung 5-16 zu entnehmen. Für den Monat Februar nimmt die mittlere monatliche Abflusshöhe nach den Simulationsergebnissen von ca. 27 mm (20C) über 34 mm (2021-2050) auf 43 mm (2071-2100) zu. In den Sommermonaten weisen die Simulationen eher auf unveränderte mittlere Abflusshöhen hin. Bei WETTREG2006 wurden die mittleren Monatswerte aller 20 Realisationen gemittelt und es wurden Standardabweichungen berechnet (Fehlerbalken). Diese weisen auf größere Unsicherheiten im Winter hin. Die Gesamtspannweite (+/- Standardabweichung) liegt in etwa in der Größenordnung der mittleren (absoluten) Veränderung. Bei REMO (siehe Abbildung 5-17) ist eine Aussage hinsichtlich möglicher Veränderungen nur bedingt möglich, da zum Teil die Vergangenheit weniger genau als bei WETTREG2006 wiedergegeben wird. Es scheint sich hier jedoch wieder eine Abnahme der mittleren Abflusshöhe in der fernen gegenüber der nahen Zukunft abzuzeichnen.

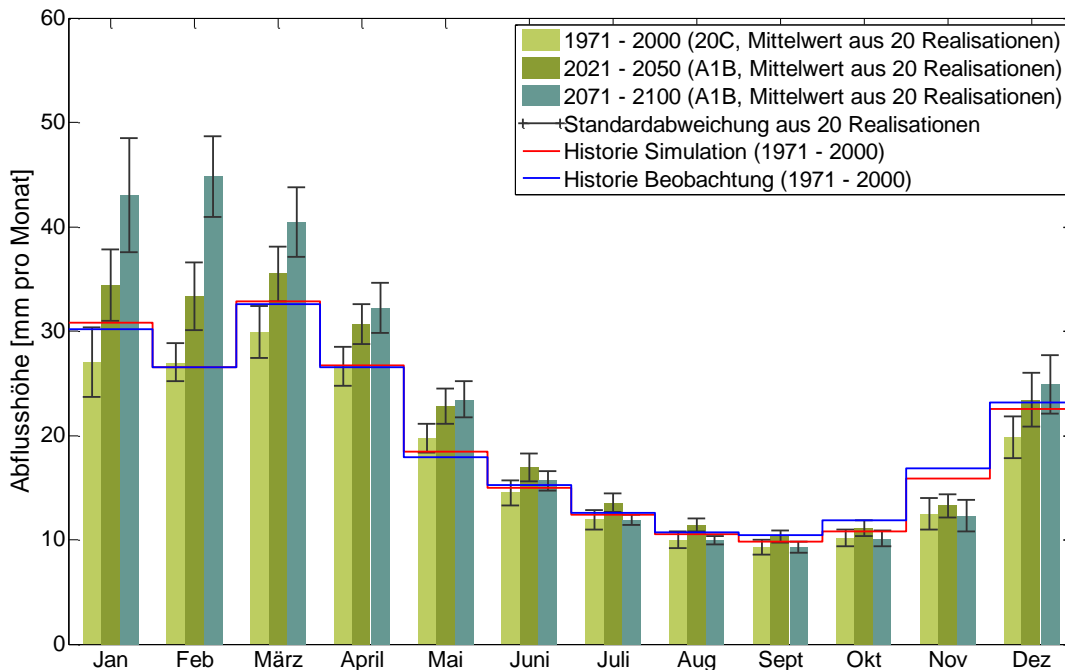


Abbildung 5-16: Mittlere monatliche Abflusshöhen aus WETTREG2006-Läufen für drei Zeiträume für den Pegel Rethem / Aller.

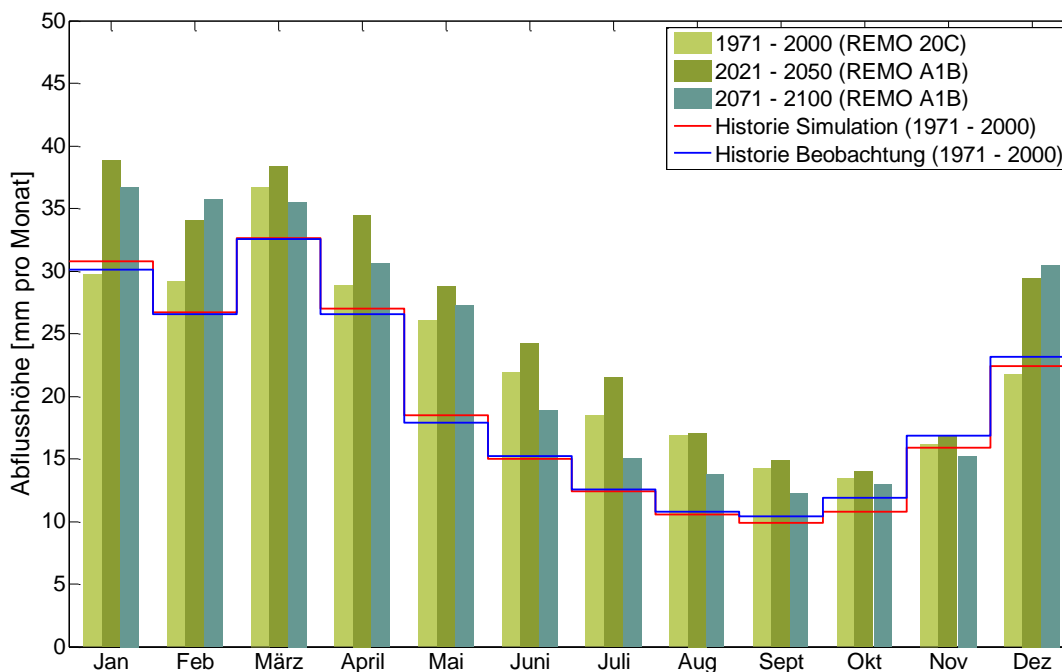


Abbildung 5-17: Mittlere monatliche Abflusshöhen aus REMO-BfG für drei Zeiträume für den Pegel Rethem / Aller.

Abbildung 5-18 fasst die Ergebnisse von 20 WETT-REG2006-Realisationen (Abbildung 5-16) sowie der 2 REMO-Läufe für den Pegel Rethem / Aller zusammen, wobei zugleich die mittleren monatlichen Abflussspenden quartalsweise gemittelt wurden. Im Jahresmittel betragen die Abweichungen +18% (nahe Zukunft) bzw. +26% (ferne Zukunft) am Pegel Rethem / Aller. Anzumerken ist, dass in dieser Darstellung eine WETT-REG2006-Realisation gleichwertig wie ein REMO-Lauf verwertet wurde. Auf diese Vorgehensweise der Gewichtung einigten sich die Projektbeteiligten. Auch wenn damit die REMO-Läufe wegen der geringeren Anzahl unterschätzt werden, stellt diese Art der Aufbereitung einen geeigneten Kompromiss aus dem Umfang der Simulationsläufe einerseits und der zusammenfassenden Darstellung andererseits dar. Die beiden REMO-Läufe sind daher für alle Pegel im Anhang enthalten (Anhang 20 und Anhang 21). Die aggregierten, quartalsweisen Ergebnisse aus allen Läufen sind für die Referenzpegel im Anhang 22 enthalten. Die Simulationsläufe lassen übereinstimmend im Winter / Frühling eine deutliche Zunahme des mittleren Abflusses erwarten, wohingegen im Sommer / Herbst im Mittel nur geringfügige Änderungen auftreten. Längere Trockenphasen wurden allerdings in der vorliegenden Auswertung nicht untersucht. Die gezeigten Änderungen zeigen ein insgesamt recht einheitliches Bild.

Die für die 8 Referenzpegel gemittelte Veränderung des mittleren Abflusses fasst Abbildung 5-19 zusammen. Dieser Abbildung liegt der Übersicht halber eine Mittelung der Änderungssignale aller 8 Referenzpegel zu Grunde. Die zuvor erläuterten Abbildungen werden zusammenfassend aggregiert. Der Kontrolllauf (20C) wurde als Referenz angenommen. Die Balken für die nahe und ferne Zukunft kennzeichnen die Änderungen bezogen auf den Kontrolllauf (dessen Änderung entspricht hier daher jeweils 0%). So zeigt sich gemittelt über alle Pegelauswertungen eine Zunahme des mittleren Abflusses im Winter um ca. 20% in der nahen und um 40-50% in der fernen Zukunft. Hingegen ist im Sommer den Simulationen zu Folge von einem Anstieg um etwa 10% in der nahen Zukunft und einem Rückgang (bezogen auf den 20C-Zeitraum) um ca. 5% in der fernen Zukunft auszugehen. Die zuvor beschriebene, wesentliche Zunahme des mittleren Abflusses im Winter und Frühjahr sowie die eher gleichbleibenden mittleren Abflüsse im Sommer und Herbst spiegeln sich auch in dieser zusammenfassenden Darstellung wider. Zu beachten ist, dass es sich bei den Angaben um relative Änderungen handelt und die absoluten Änderungen im Sommer auch absolut deutlich kleiner sind als im Winter.

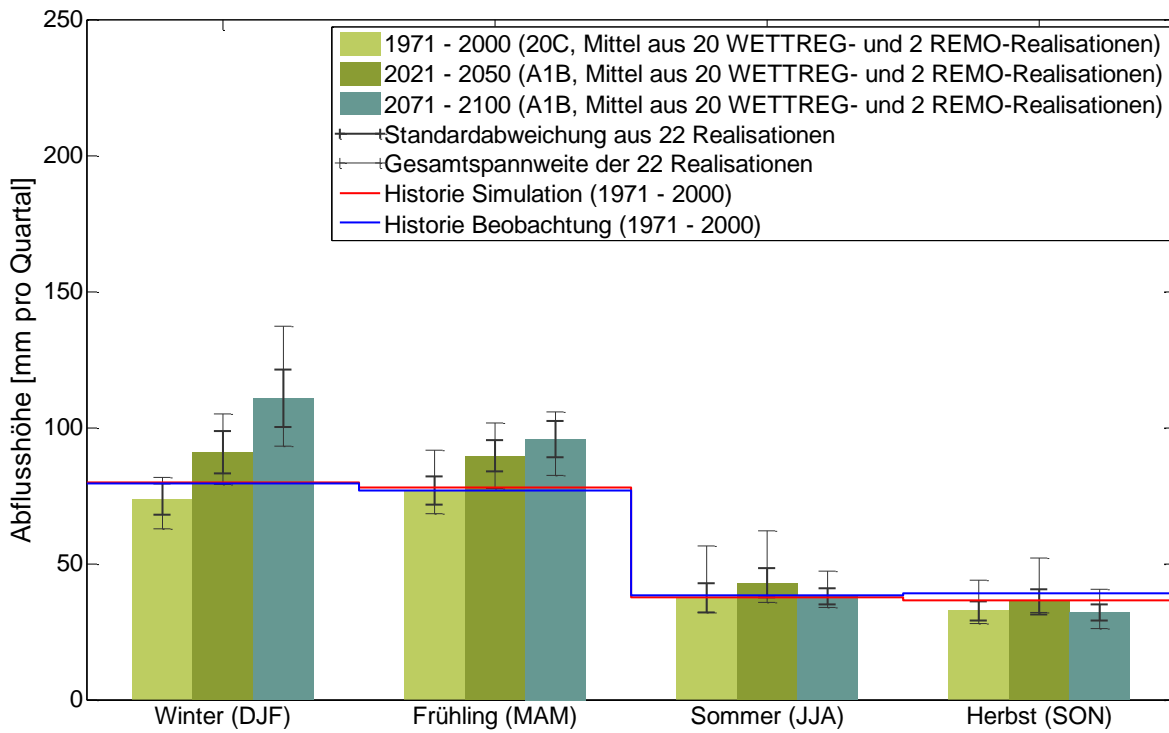


Abbildung 5-18: Mittlere Abflusshöhen pro Quartal aus 20 WETTREG2006-Realisationen und 2 REMO-Läufen (UBA und BfG) für drei Zeiträume für den Pegel Rethem / Aller.

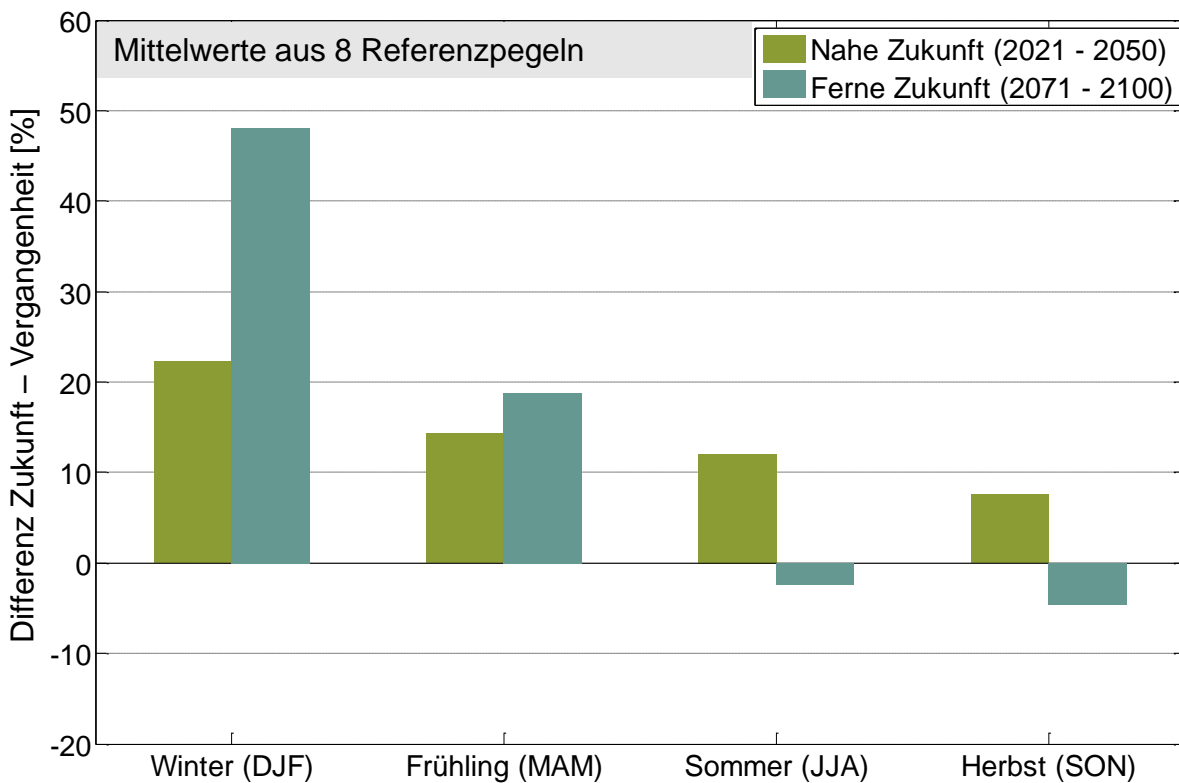


Abbildung 5-19: Mittlere prozentuale Veränderung des mittleren Abfluss für 8 Referenzpegel, quartalsweise differenziert.

Dass eine signifikante Änderung des Abflussregimes im Einzugsgebiet der Aller möglich ist, zeigt auch die Auswertung der langjährigen Tagesmittel des Abflusses in Abbildung 5-20. Als Überleitung zur nachfolgenden Hochwasserauswertung sind in dieser Abbildung beobachtete, anhand von Beobachtungsdaten simulierte sowie die aus den WETTREG2006-Realisationen ermittelten Tagesmittelwerte des Abflusses eingetragen. Die 20 Realisationen wurden jeweils wieder gemittelt. Deutlich erkennbar ist die Zunahme des Abflusses im Winter. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Zeitraum 2071-2100. Das Szenario weist z.B. für den Monat März einen starken Übergang von der typischen Charakteristik der Winterverhältnisse zu Mo-

natsbeginn zu den rückgehenden Abflüssen im Frühjahr gegen Ende des Monats hin. Diese innermonatliche Variabilität kann aus den Monats- und Quartalsmitteln nicht ermittelt werden.

Die Tagesmittelwerte geben erste Hinweise auf typische Hochwasserzeiträume. So zeigen sich in den Beobachtungen sowie der Simulation mit den historischen Daten typische Singularitäten, wie z.B. das Weihnachtstauwetter, welches der Fließzeit entsprechend erst Anfang Januar am Pegel Rethem / Aller auftritt. Die auf Grundlage der WETTREG2006-Daten durchgeführten Läufe zeigen diese Singularitäten im Kontrollzeitraum allerdings nicht.

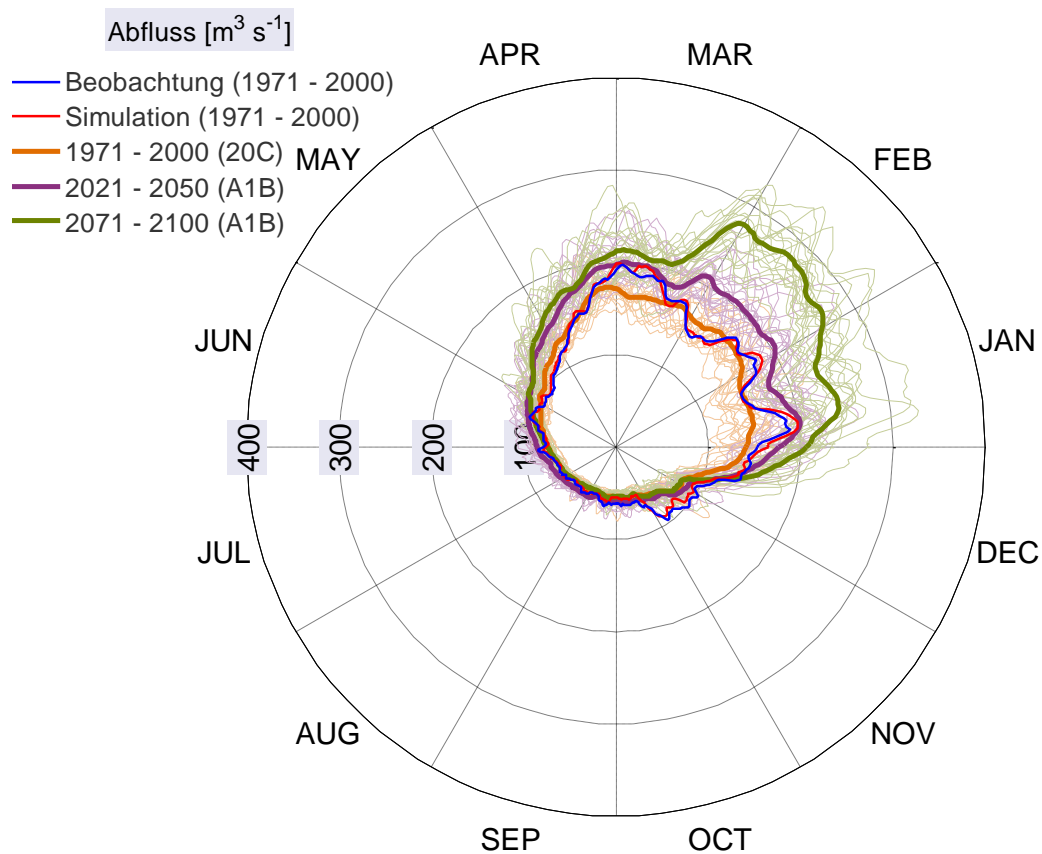


Abbildung 5-20: Veränderung der langjährigen mittleren Tageswerte des Abflusses für den Pegel Rethem / Aller.

5.5.5 Hochwasserstatistische Auswertungen der Zukunftsszenarien

In diesem Abschnitt werden die Auswertungen von Simulationen auf Grundlage der Szenarien im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen des Hochwassergeschehens für alle untersuchten Pegel erläutert. Die mittleren Hochwasserabflüsse auf Jahresbasis (ermittelt als Tagesmittel) sind im Anhang 17 für die Referenzpegel und die vorliegenden WETTREG2006- und REMO-Simulationen aufgeführt, wobei es sich bei den Angaben für WETTREG2006 um Mittelwerte aus 20 Realisationen handelt. Ergänzend zu Anhang 17 enthält Anhang 23 zusätzlich die MHQ-Werte nach Winter- und Sommerhalbjahr differenziert. An den untersuchten Pegeln sind die mittleren Hochwasserabflüsse im Winterhalbjahr größer als im Sommer. Um einen einfacheren Vergleich zu ermöglichen, enthält Anhang 24 die relativen Abflussänderungen innerhalb der zukünftigen Szenarienzeiträume bezogen auf den jeweiligen 20C-Zeitraum (Kontrolllauf). Der MHQ ändert sich demnach um bis zu 20% in der fernen Zukunft verglichen mit den Werten des 20C-Zeitraums. Dies trifft für beide Halbjahre zu, wobei die Änderung im Sommer sogar prozentual größer ausfällt. Für die Sommermonate ergeben die Auswertungen sogar eine Rücknahme des mittleren Hochwasserabflusses in der fernen Zukunft. Dieser Rückgang geht mit dem Rückgang der mittleren

monatlichen Abflusshöhen im Sommer einher. Für das Gesamtjahr ist jedoch die prinzipielle Zunahme während der Wintermonate maßgebend.

Neben der reinen Mittelung der Stichproben für die Ableitung von MHQ-Werten wurden auch für alle Pegel, Zeiträume und Läufe Hochwasserstatistiken erstellt, die auf der Gumbel-Verteilung basieren. Am Beispiel des Pegels Herrenhausen ist diese Vorgehensweise zur Ermittlung der Zwischenergebnisse in Abbildung 5-21 veranschaulicht. Gezeigt sind die Statistiken aus der Beobachtung, der Simulation mit beobachteten Klimadaten und der WETTREG2006-Realisationen für den Kontrolllauf sowie das Szenario A1B mit zwei Zeiträumen.

Die Jährlichkeiten für jeden Rechenzeitraum sind jeweils für alle Realisationen gemittelt worden. Darauf aufbauend wurden - analog zu den oben ausgewerteten Wasserhaushaltsgrößen - Änderungen zusammengefasst. Die Änderungen der Hochwasserabflüsse der Wiederkehrintervalle von 5 sowie 100 Jahren können für die Referenzpegel der Abbildung 5-22 entnommen werden. Der Ausgangswert von 100% entspricht jeweils dem Mittel aus dem 20C-Zeitraum (REMO und WETTREG2006) und gilt damit immer als Referenz der Änderungen. Um die Streuung der einzelnen Realisationen und Läufe bei der Interpretation zu berücksichtigen, sind Gesamtspannweiten und Standardabweichungen eingetragen.

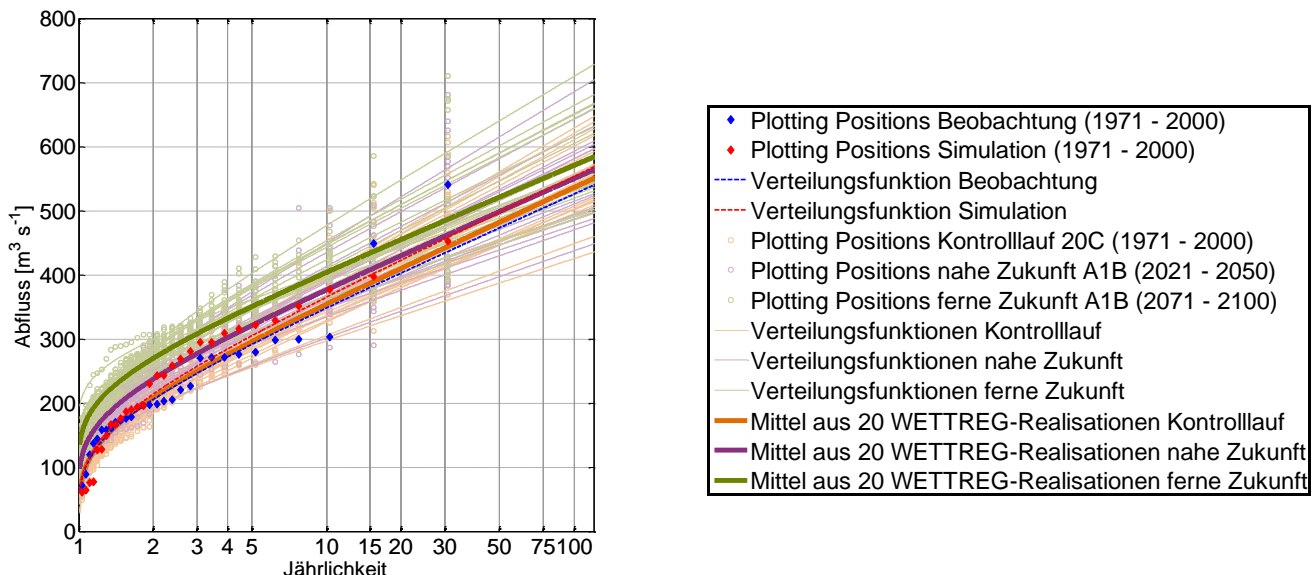


Abbildung 5-21: Vergleich der Hochwasserstatistiken für den Pegel Herrenhausen / Leine mit Plotting Positions als Grundlage zur Ermittlung von Jährlichkeiten und deren Änderungen beim Vergleich verschiedener Zeiträume.

Für das HQ5 lässt sich, auch unter Berücksichtigung der eingezeichneten Streumaße, die Tendenz einer Zunahme an allen Pegeln feststellen, wie zuvor auch für die MHQ-Werte erläutert. Beim HQ100 wird diese Tendenz für alle Pegel schwächer, gerade auch unter Berücksichtigung der Streuung. Das große Verhältnis der Streumaße zu den Änderungen weist darauf hin, dass die gezeigten Tendenzen weniger eindeutig sind als im Falle des HQ5. Dass ein einzelner Lauf / eine einzelne Realisation deutlich von dem gezeigten Mittelwert abweichen kann, sieht man im Falle des Pegels Northheim / Rhume für den Zeitraum 2071-2100 (s. Abbildung 5-22). Entsprechende Angaben für andere Jährlichkeiten können als Absolutwerte oder relative Änderungen bezogen auf den 20C-Zeitraum dem Anhang 25 bzw. Anhang 26 entnommen werden.

Aufbauend auf dem methodischen Vorgehen zur Ermittlung von hochwasserstatistischen Kenngrößen für die Referenzpegel werden nachfolgend die entsprechenden Auswertungen für die Detailgebiete beschrieben. Anders als bei den größeren Einzugsgebieten der Referenzpegel werden hier die Maximalwerte der Stunden- und nicht der Tagesmittelwerte ausgewertet. Die Kenngrößen MHQ, HQ5 sowie HQ100 sind für das Gesamtjahr, das Winter- und das Sommerhalbjahr in Tabelle 5-9 sowie in den Tabellen in Anhang 27 zusammengestellt. Bei den untersuchten kleineren Gebieten sind ebenfalls die Winterhochwasser dominierend, wobei aber Sommerereignisse gegenüber den großen Gebieten in ihrer Bedeutung für die Jahresstatistik zunehmen.

Die auf den Zeitraum 20C bezogenen Änderungen der Ereignisse HQ5 und HQ100 auf Jahresbasis sind aus Abbildung 5-23 ersichtlich. Auch bei den kleineren Pegelgebieten mit Stundenauswertung geht aus den Simulationsergebnissen eine Zunahme der Scheitelabflüsse der Wiederkehrintervalle von 5 und 100 Jahren hervor.

Für die Pegel mit Mittelgebirgseinzugsgebieten im Süden des Allergebietes (Derneburg / Nette, Reckershausen und Göttingen / Leine sowie Pionierbrücke / Sieber) ergeben sich aus den Simulationen größere Anstiege der Scheitelwerte in der Zukunft als bei den Gebieten im Norden des Gebietes (Brock / Böhme und Glentorf / Schunter). Diese räumliche Aufteilung wird wahrscheinlich z. T. auch durch die höheren Zunahmen von Extremniederschlägen im Süden des Gebietes (vgl. Kapitel 3.2) bedingt.

Zu beachten ist hier, dass sich die gezeigten Mittelwerte und Spannweiten auf 3 disaggregierte WETTREG2006-Realisationen (mit je einem Zusatzlauf mit Parallelkaskade, also insgesamt 6 WETTREG2006-Realisationen) sowie 2 REMO-Läufe beziehen. Die REMO-Läufe, auf deren Grundlage insgesamt größere Scheitelwerte berechnet wurden, erhalten dadurch ein größeres Gewicht als bei den größeren Einzugsgebieten der Referenzpegel mit 20 WETTREG2006-Realisationen. Für eine Jährlichkeit von 100 Jahren sind die Änderungen größer als bei den Referenzpegeln, aber zugleich wegen der größeren Streuung auch weniger sicher in ihrer Aussage.

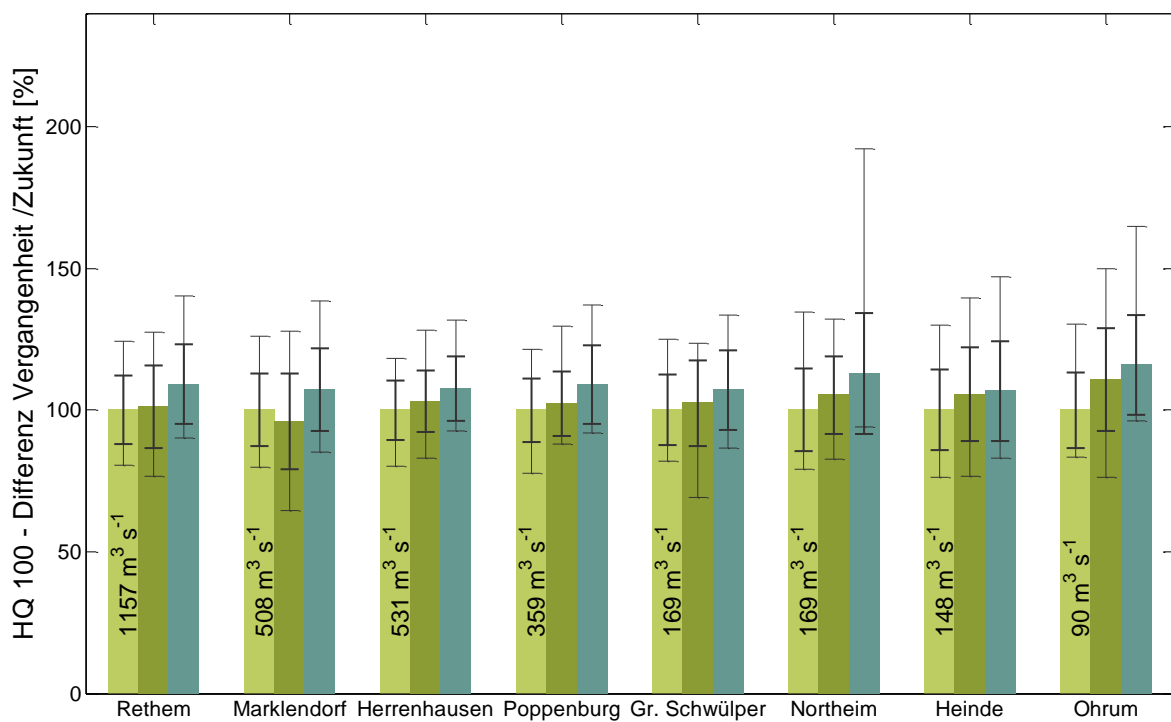
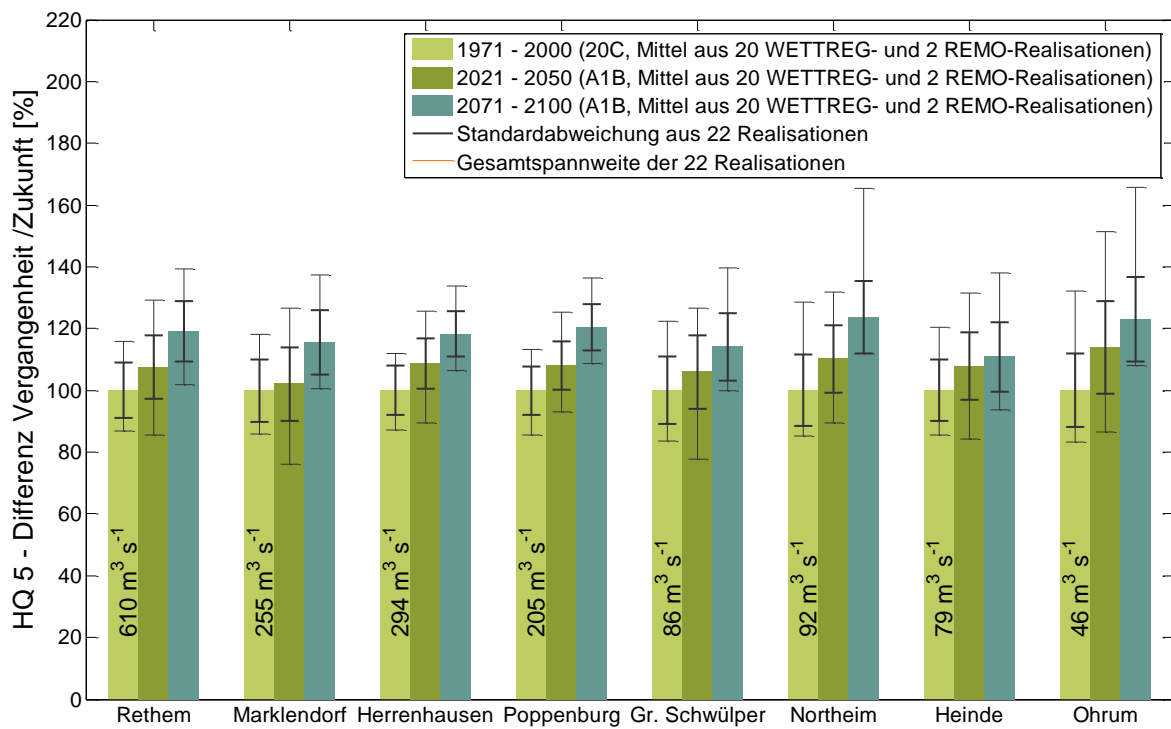


Abbildung 5-22: Prozentuale Veränderung von HQ5 (oben) und HQ100 (unten) für WETTREG2006- und REMO-Szenarien bezogen auf den Kontrolllauf, Tageswertbasis.

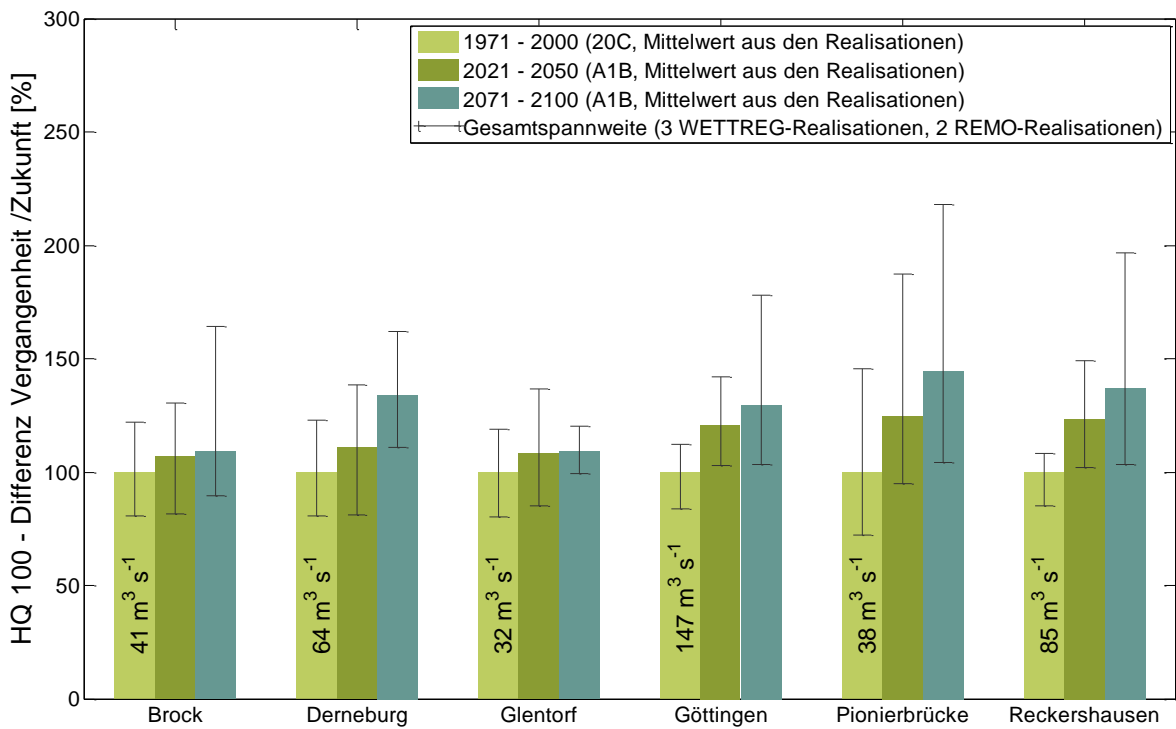
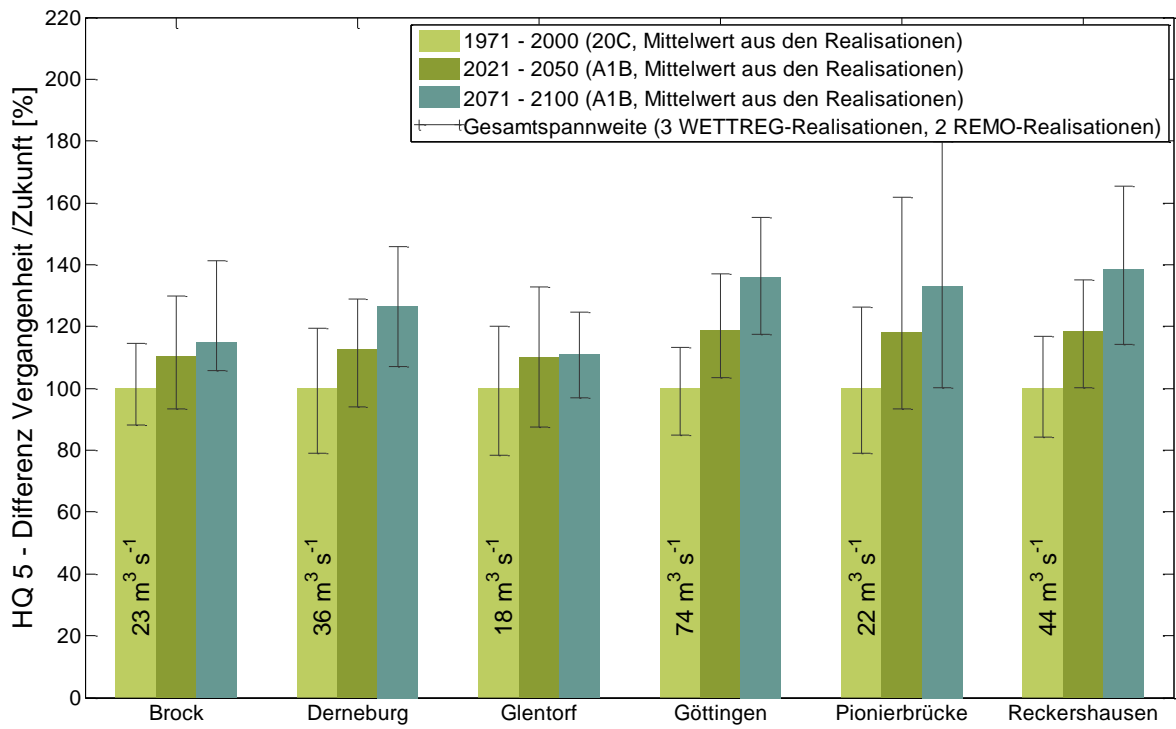


Abbildung 5-23: Prozentuale Veränderung von HQ5 (oben) und HQ100 (unten) für WETTREG2006- und REMO-Szenarien bezogen auf den Kontrolllauf, Stundenbasis.

Tabelle 5-9: Saisonale hochwasserstatistische Auswertung für den Pegel Brock / Böhme (Z1 = 1971-2000, Z2 = 2021-2050, Z3 = 2071-2100), Werte in m³ s⁻¹.

Brock / Böhme		MHQ			HQ5			HQ100		
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Gesamtjahr	Beobachtung	16			26			41		
	REMO-BFG-20C	18	19	22	25	27	33	48	52	69
	REMO-UBA-20C	19	19	20	26	24	26	50	42	47
	WETTREG55-Brock-20C-03	16	17	20	21	21	24	36	33	37
	WETTREG55-Brock-20C-03-parallel	18	20	21	23	23	25	42	36	38
	WETTREG55-Brock-20C-13	16	19	20	20	24	24	33	40	38
	WETTREG55-Brock-20C-13-parallel	18	20	21	22	25	24	35	41	36
	WETTREG55-Brock-20C-18	16	21	20	21	27	24	36	48	39
	WETTREG55-Brock-20C-18-parallel	18	23	21	22	30	26	37	54	41
Winter	Beobachtung	15			26			41		
	REMO-BFG-20C	15	16	18	20	20	26	36	34	54
	REMO-UBA-20C	17	16	18	23	21	24	43	38	44
	WETTREG55-Brock-20C-03	15	17	20	20	20	24	35	32	36
	WETTREG55-Brock-20C-03-parallel	16	19	21	22	22	25	40	34	37
	WETTREG55-Brock-20C-13	15	18	20	19	23	24	33	38	36
	WETTREG55-Brock-20C-13-parallel	17	19	21	21	24	24	36	39	36
	WETTREG55-Brock-20C-18	16	19	20	21	25	24	37	43	39
	WETTREG55-Brock-20C-18-parallel	17	21	21	22	28	26	38	50	41
Sommer	Beobachtung	9			13			23		
	REMO-BFG-20C	13	15	17	21	24	29	46	53	69
	REMO-UBA-20C	12	13	13	19	20	20	44	40	41
	WETTREG55-Brock-20C-03	8	9	8	13	12	12	26	23	24
	WETTREG55-Brock-20C-03-parallel	10	10	10	15	14	14	32	29	27
	WETTREG55-Brock-20C-13	9	11	8	13	16	13	25	32	26
	WETTREG55-Brock-20C-13-parallel	10	12	9	14	17	13	27	32	23
	WETTREG55-Brock-20C-18	9	11	8	12	18	10	24	39	17
	WETTREG55-Brock-20C-18-parallel	10	13	10	14	20	13	26	42	23

Um einen einfachen Überblick zu ermöglichen, wurden abschließend bei den Hochwasserkenngößen ebenfalls Mittelwerte der Änderungssignale von allen Pegeln graphisch aufbereitet. Abbildung 5-24 zeigt die mittleren Änderungen der zwei Zukunftszeiträume gegenüber dem Kontrolllauf (20C). Sowohl für die Referenzpegel als auch für die Pegel der kleineren Detailgebiete sind diese Änderungen der Ereignisse HQ5 und HQ100 ersichtlich. Für die Referenzpegel ist die obig beschriebene stärkere Zunahme kleinerer Hochwasserereignisse (am Beispiel HQ5 gezeigt) ersichtlich. In der nahen Zukunft ergeben die Auswertungen eine Zunahme von 10-15%, in der fernen Zukunft sogar ca. 25%. Demgegenüber nehmen seltenerere Ereignisse (z.B. HQ100) weniger stark in der Zukunft zu. Die entsprechenden Änderungen fallen mit ca. 3% bzw. ca. 10% deutlich geringer aus als bei den kleineren, häufigeren Ereignissen.

Für die kleinen (Detail-)Einzugsgebiete trifft die Aussage hinsichtlich der Änderung kleiner Hochwasser gleichermaßen zu. Verglichen mit den entsprechenden Werten der Referenzpegel, sind die mittleren Änderungen beim Ereignis HQ5 fast identisch. Allerdings konnten für die seltenen Ereignisse praktisch dieselben mittleren Änderungen von ca. 15% (nahe Zukunft) und ca. 25% (ferne Zukunft) ermittelt werden. Wie bereits erläutert, wurden bei den Auswertungen der Pegel der Detailgebiete nur 3 Realisationen von WETTREG2006 (mit je einem Lauf mit Parallelkaskade) berücksichtigt. Dieser Aspekt sollte beim Vergleich der Auswertungen der Referenzpegel mit den Pegeln der Detailgebiete stets berücksichtigt werden. Daher sollten diese Angaben auch nur als Anhaltspunkt dienen, da auch hier die Änderungssignale der Pegel gemittelt wurden. Aus der aggregierten Darstellung wird jedoch die wesentliche, auf Grundlage der Simulationsergebnisse ersichtliche tendenzielle Änderung deutlich.

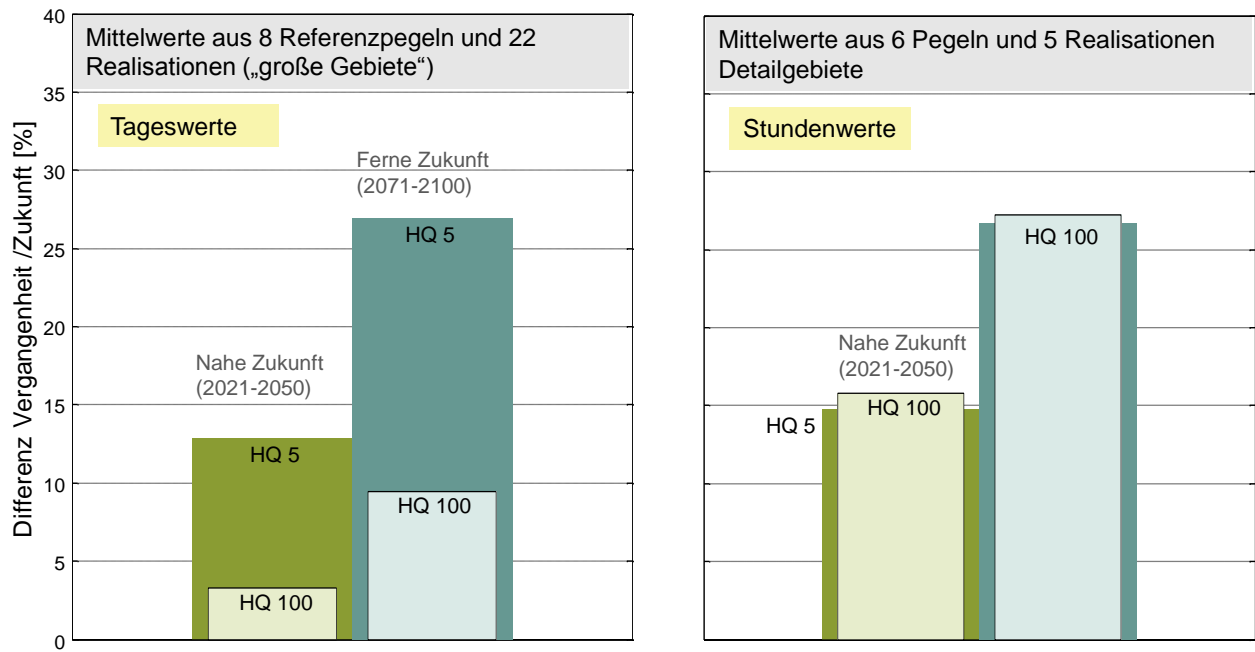


Abbildung 5-24: Prozentuale Veränderung HQ5 und HQ100 als Mittelwert von allen untersuchten Pegeln (Referenzpegel links, Pegel der Detailgebiete rechts).

5.6 Zusammenfassung

Für das Einzugsgebiet der Aller wurden mit dem hydrologischen Modell PANTA RHEI Simulationsläufe für den Zeitraum zwischen 1960 und 2000 mit meteorologischen Eingangsdaten aus der Beobachtung sowie zwischen 1960 und 2100 mit Klimamodelldaten durchgeführt und ausgewertet. Zusätzlich zum Gesamtgebiet wurden Simulationsläufe für ausgewählte kleinere Teilgebiete mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung simuliert und ausgewertet.

Das detaillierte Flussgebietsmodell der Aller wurde über einen Zeitraum von 20 Jahren so kalibriert, dass Wasserhaushalt und Hochwasserereignisse gleichermaßen gut wiedergegeben werden. Das kalibrierte Modell zeigte in einem unabhängigen Validierungslauf über 10 Jahre eine sehr gute Simulationsgüte und konnte damit als geeignetes Prognosesystem mit Daten aus Szenarien betrieben werden.

Die aus TP1 gelieferten Daten aus den Klimamodellen wurden zunächst hinsichtlich ihrer Rekonstruktion des Wasserhaushalts- und des Hochwassergeschehens in der Vergangenheit untersucht. Es wurde stets ein Ensemble mehrerer Modelle (WETTREG2006 und REMO) mit mehreren Realisierungen untersucht. Dazu wurde das Flussgebietsmodell mit den sog. Kontrollläufen (20C) erneut beaufschlagt und mit dem Lauf auf Grundlage der beobachteten Klimadaten verglichen. Diese sog. Kontrollläufe (20C) zeigten anhand statistischer Auswertungen an vielen Pegeln systematische Abweichungen gegenüber mit dem Simulationslauf mit beobachteten historischen Klimadaten. Für die interpolierten Daten aus den WETTREG2006-Realisationen wurde daher eine flächenbezogene lineare Korrektur der Niederschlagsdaten durchgeführt, welche zu erheblich besseren Anpassungen der Realisationen führte. Die Simulationen auf Grundlage von WETTREG 2006 lieferten damit eine bessere Wiedergabe des Wasserhaushalts und der Hochwasserereignisse als die entsprechenden Simulationen auf Basis der REMO-Läufe. Die REMO-Läufe wurden ohne Datenkorrektur durchgeführt.

Im nächsten Schritt wurde das hydrologische Modell mit Zeitreihen aus Zukunftszeiträumen aus dem A1B-Szenario belastet. Die Zeitreihen wurden in umfangreichen statistischen Auswertungen mit den entsprechenden Zeitreihen der Kontrollläufe (20C) gegenübergestellt. Anhand von Änderungen in ausgewählten gewässerkundlichen Kenngrößen wie mittlerer Abfluss oder Hochwasserscheitel der Wiederkehrintervalle von 5 und 100 Jahren sollten Rückschlüsse auf mögliche

Änderungen des hydrologischen Regimes infolge von Klimaänderungen ermöglicht werden.

Es zeigte sich, dass auf Grundlage der Klimamodelldaten insbesondere im Winter und Frühjahr eine deutliche Zunahme des mittleren Abflusses zu erwarten ist. Diese Zunahme ging aus den Auswertungen sämtlicher untersuchter Pegelstationen hervor. Hingegen konnten für die Sommermonate keine signifikanten Änderungen in den mittleren Abflüssen festgestellt werden. Zu ähnlichen Ergebnissen mit gleicher Tendenz gelangte auch das Projekt KLIWA (Klimaveränderung und Wasserwirtschaft). Nach KLIWA (2006) geht aus den Simulationen der Szenarien eine Zunahme des mittleren monatlichen Abflusses in den Wintermonaten für Flüsse in Süddeutschland hervor.

Für die Auswertung von Hochwasserereignissen wurden in KliBiW zwei Vorgehensweisen betrachtet. Für größere Teilgebiete im Allereinzugsgebiet wurden Höchstwerte der Tagesmittelwerte des Abflusses hochwasserstatistisch ausgewertet. Dies ist für größere Gebiete mit Einzugsgebietsflächen von zum Teil mehreren 1000 Quadratkilometern zulässig, zumal nur Tagesniederschläge als Eingangsdaten flächendeckend und als lange Zeitreihen bereitstanden. Für kleinere Einzugsgebiete mit Flächen von nur wenigen 100 Quadratkilometern und deutlich kleineren Konzentrationszeiten wurde eine hochwasserstatistische Auswertung auf Basis von Stundenwerten durchgeführt. Dazu wurden im TP1 lange Zeitreihen von Tagesniederschlägen auf Stundenwerte disaggregiert. Mit Hilfe dieser Daten und darauf aufbauenden Simulationsläufen mit dem hydrologischen Modell konnten detaillierte Hochwasserauswertungen für kleinere Gebiete durchgeführt werden.

Sowohl für die großen Gebiete als auch für die kleinen Gebiete mit Stundenwerten ergaben die Simulationen auf Grundlage der Klimamodelldaten eine Zunahme des mittleren Hochwassers (MHQ). Häufigere Hochwasserereignisse, wie z.B. HQ5, nehmen bei den großen Gebieten den Simulationen zu Folge hinsichtlich des Hochwasserscheitels mit bis zu ca. 25% stärker zu als seltenere Ereignisse, wie das hier ausgewertete HQ100 (Zunahme ca. 10%). Die prozentualen Änderungen lassen auf eine stärkere Zunahme der Scheitel in kleineren Einzugsgebieten schließen. Zudem weisen seltenere Ereignisse (HQ100) bei den kleinen Einzugsgebieten eine prozentuale Änderung ähnlicher Größenordnung (ca. 25 %) auf, wie häufigere Ereignisse (HQ5). Die Schwankungen, die sich aus der Auswertung des Ensembles vieler Läufe ergaben, weisen auf größere Unsicherheiten bei großen (seltenen) Hochwasserereignissen hin. Dennoch ist aus den Si-

mulationsergebnissen eine tendenzielle Zunahme der Scheitelwerte dieser seltenen Ereignisse in der fernen Zukunft gegenüber der nahen Zukunft ersichtlich. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangte auch Ihringer (2004) für Pegel im Neckargebiet.

Zukünftige Untersuchungen sollten Niedrigwasserkenngrößen einschließen, da hier nur mittlere Monatswerte ausgewertet wurden und keine Dauern von Trockenwetterphasen untersucht wurden. Weiterhin sollten robuste Methoden entwickelt werden, welche systematische Abweichungen der Kontrollläufe (20C) im Vergleich mit Beobachtungsdaten minimieren. Künftig könnte auch das Ensemble der Klimamodelldaten erweitert werden, um die Ergebnisse besser abzusichern und um bessere Einschätzungen hinsichtlich möglicher künftiger Extreme zu erhalten.

5.7 Risikobewertung unter Klimawandelbedingungen

Die Bewertung eines Risikos erfolgt häufig unter Einbeziehung der Aspekte Eintrittswahrscheinlichkeit und Größe des Schadens (Grünwald et al., 2003). Anders ausgedrückt kann das Risiko auch durch den sogenannten Schadenserwartungswert ausgedrückt werden. Dieser wird wiederum beschrieben durch das Produkt aus einem drohenden Verlust, Schaden oder einer Konsequenz und der Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis, welches zu diesem Schaden führt, wirklich eintritt. Im Falle eines Hochwasserereignisses kann das Risiko wie folgt eingeschätzt werden:

$$R = P(x) \cdot S(w, \dots) \quad [5-1]$$

mit

R: Risiko

P(x): Eintrittswahrscheinlichkeit

S(w, ...): Schaden in Abhängigkeit vom Wasserstand (bzw. Abfluss) und weiteren Faktoren

In Kapitel 5.5.5 wurde dargelegt, dass die Scheitelabflüsse verschiedener Jährlichkeiten (bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten) im Zuge des Klimawandels im Aller-Leine Gebiet bis Ende des 21. Jahrhunderts auf Basis des gewählten Klimamodell-Ensembles zwischen 10 und 25% ansteigen können. Dies wäre gleichbedeutend mit einem Anstieg der Wasserstände vor Ort, wenn auch nicht mit dem gleichen prozentualen Wert, und damit auch mit dem Anstieg des Schadenspotentials. D.h. bei gleicher Wahrscheinlichkeit für ein Hochwasserereignis (z.B. ein HQ100) wäre dessen Konse-

quenz (also der Abfluss bzw. Wasserstand) größer, wodurch das Schadenspotenzial und somit das Risiko für das Gebiet ansteigen würde.

Um diesem gestiegenen Risiko entgegenzuwirken, wäre ggf. eine Anpassung der vorhandenen Schutzmaßnahmen erforderlich, um dem Vorsorgeprinzip beim Hochwassermanagement auch zukünftig nachzukommen. Allerdings weisen die Ergebnisse zum Teil größere Spannweiten bei der möglichen Entwicklung auf, u.a. bedingt durch die unterschiedlichen Klimamodelldaten. Daraus ergibt sich die Frage, welchen Grenzwert man als denkbaren Bemessungsansatz wählen sollte. Zugleich muss auch berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse aus einem relativ kleinen Ensemble ausgewählter Klimamodelle stammen, deren Signale kein endgültiges Urteil über die möglichen zukünftigen Entwicklungstendenzen erlauben.

Aus diesem Grund sollten die Ergebnisse aus Kli-BiW zunächst mit anderen Erkenntnissen, vor allem aus KLIF / KLIFWA, ergänzt werden, um robustere Aussagen zu Klimasignalen in Niedersachsen machen zu können. Eine Neubemessung von Schutzmaßnahmen erscheint auf Grundlage der derzeitigen Erkenntnisse nicht ausreichend begründet. Jedoch sollte im Sinne des Vorsorgegedankens bei zukünftigen Maßnahmen bereits jetzt darauf geachtet werden, diese flexible zu gestalten, um sich an mögliche Veränderungen kurz- bis mittelfristig (ökonomisch) effizient anpassen zu können. In diesem Sinne sollten vor allem sogenannte „no-Regret“ Maßnahmen gefördert werden, die, unabhängig von der zukünftigen Entwicklung, grundsätzlich positive Effekte auf die Abflussverhältnisse bei Hoch- und Niedrigwasser haben (z.B. Verbesserung der natürlichen Retention).

6 Information und Kommunikation

6.1 Ergebnistransfer

Der Transfer der Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Projekt KliBiW in die Öffentlichkeit, die fachliche Praxis und zu den Entscheidungs- bzw. Maßnahmenträgern ist ein stetiger Prozess. Dieser hat bereits während der Bearbeitung der Phasen 1 und 2 begonnen und wird auch weiter fortgeführt werden.

Ein Teil der Erkenntnisse bzgl. des Klimawandels und seiner möglichen Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse ist in die Beschlussempfehlung des Arbeitskreises Klimafolgenanpassung (der Regierungskommission Klimaschutz) zur „Implementierung der Auswirkungen des Klimawandels in die Wasserwirtschaft im Binnenland als wichtigen Beitrag für eine vorausschauende Daseinsvorsorge“ eingeflossen (Regierungskommission Klimaschutz, 201). An der Erarbeitung der Inhalte (Ziele, Probleme, Maßnahmen, etc.) bzgl. der Handlungsfelder Hochwasserschutz, Niedrigwassermanagement, Grundwasserschutz und Siedlungswasserwirtschaft haben neben dem NLWKN u.a. auch das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und die Kommunale Umwelt-Aktion (UAN) mitgewirkt. Die Regierungskommission erarbeitet grundlegende Bestandteile für eine niedersächsische Klimaanpassungsstrategie.

Weiterhin hat der NLWKN an zwei Workshops mit Fachkollegen aus Großpolen mitgewirkt, in denen ein Austausch zu den Themen „Hochwasserschutz“ und „Klimafolgen und Anpassungsstrategien in der Wasserwirtschaft“ stattfand. Hierbei wurden zum Teil aktuelle Erkenntnisse aus dem Projekt KliBiW präsentiert. Auf nationaler Ebene vertritt der NLWKN Niedersachsen im Bund-Länder-Fachgespräch „Interpretation von Klimamodelldaten“. Dieses besteht aus Vertretern der Landesbehörden aller Bundesländer, dem Umweltbundesamt, dem Deutschen Wetterdienst sowie dem Climate Service Center (CSC). Das Fachgespräch dient zur Klärung von Fragen zur Anwendung, Interpretation und Bewertung von regionalen Klimaprojektionen. Auch innerhalb dieser Runde wurden bereits Ergebnisse aus KliBiW vorgestellt und diskutiert. Zudem fand und findet ein regelmäßiger Austausch mit den Beteiligten des Verbundforschungsprojektes KLIFF statt.

Es wurden bereits verschiedene Ergebnisse aus KliBiW veröffentlicht, sowohl in Fachzeitschriften (Haberlandt et al., 2010), sowie auf verschiedenen Tagungen (NLWKN-Gewässerforum, Tag der Hydrologie)

in Form von Posterbeiträgen. Derzeit in Arbeit und geplant sind weitere Artikel über ausgewählte Themenblöcke des Projektes, u.a. in der Schriftenreihe des NLWKN.

Zukünftig ist auch ein Internetauftritt von KliBiW auf den Seiten des NLWKN vorgesehen, in dem allgemeine Informationen zum Klimawandel und ausgewählte Ergebnisse aus dem Projekt der breiten Öffentlichkeit vorgestellt werden sollen. Die Internet-Seiten des NLWKN werden derzeit strukturell und inhaltlich überarbeitet. Eine Veröffentlichung der Inhalte von KliBiW soll in dem neuen Design zeitnah nach Abschluss der Phase 2 erfolgen.

Ein wesentlicher Meilenstein der beiden Klimaprojekte mit NLWKN-Beteiligung, KliBiW und KLIFF / KLIFWA, ist die Entwicklung eines Konzepts für eine internetbasierte Informations- und Kommunikationsplattform (vgl. Kapitel 6.2). Diese soll der fachlich interessierten Öffentlichkeit sowie Fachbehörden und Kommunen mittelfristig ein breitgefächertes Informationsspektrum zum Thema Hochwassermanagement und Katastrophenschutz, unter dem Aspekt eines sich wandelnden Klimas, anbieten.

6.2 Informationsplattform

Die Erkenntnisse von KliBiW, die für ein nachhaltiges Hochwassermanagement unter Berücksichtigung der Auswirkungen eines sich wandelnden Klimas auf den Wasserhaushalt gewonnen wurden, sollen zukünftig nicht nur Maßnahmenträger und Kommunen bei ihren Planungen und Entscheidungen unterstützen, sondern auch und vor allen Dingen den Bürgern als Information zur Verfügung gestellt werden. Im vorsorgenden Hochwasserschutz kann das Verhalten der Bürger erheblich zur Minderung von Hochwasserschäden beitragen, vorausgesetzt, die notwendigen Verhaltensweisen sind bekannt.

In diesem Sinne soll eine Informations- und Kommunikationsplattform zur Wissensvermittlung und für Handlungsempfehlungen konzipiert werden. Betroffene und interessierte Bürger könnten sich hier zum einen allgemein über die Themen Klimawandel und Hochwasser informieren. Zum anderen könnten die Möglichkeiten der Eigenvorsorge sowie Handlungsempfehlungen für den akuten Hochwasserfall dargestellt werden. Das Thema Hochwasserrisiko soll umfassend und gleichzeitig einfach verständlich an die Bürger herangetragen werden. Im Falle eines drohenden Hochwas-

serereignisses sollen Informationen über Pegelstände, Ansprechpartner und Sofortmaßnahmen zentral verfügbar sein.

Weiterhin denkbar ist ein interner, nicht öffentlicher Bereich, in dem spezielle Informationen für Institutionen des Hochwasserschutzes bzw. Kommunen vorgehalten werden, etwa Melde- und Maßnahmenpläne für den Katastrophenfall. Ebenso denkbar sind umfassende Informationen über bestehende Maßnahmen bzw. geplante Vorhaben zum Hochwasserschutz sowie im Hochwasserfall spezifische Prognosedaten über Niederschläge, Abflüsse und Speicherfüllungen.

Viele dieser Informationen liegen bereits z.T. auf anderen, internen wie externen Internet-Seiten vor. Der Vorteil einer solchen IuK-Plattform wäre die Bündelung dieser Informationen, um eine schnelle und übersichtliche Verfügbarkeit zu gewährleisten. Sie könnte eine Schnittstelle zwischen verschiedenen Informationsquellen bilden und zentraler Anlaufpunkt für Bürger, Katastrophenmanagement und Kommunen sein.

Einige der genannten Informationen liegen bereits auf den neu gestalteten Internet-Seiten des NLWKN vor. Diese sollten zunächst als Basis genutzt und ggf. um entsprechende Punkte ergänzt werden. Darauf aufbauend soll ein Konzept, auch in Zusammenarbeit mit KLIF / KLIFWA, erarbeitet werden, welche Themen bereitgestellt (auch unter Berücksichtigung von Expertenmeinungen sowie Rücksprachen mit Kommunen und Bürgern) und wie die gewünschten Informationen aufbereitet und vorgehalten werden sollten (denkbar sind neben Texten und Abbildungen vor allem interaktive Karten, beispielsweise mittels WebMapServices, um Inhalte plakativ zu vermitteln). Die Umsetzung wird Schritt für Schritt erfolgen. Eine ständige Pflege und Aktualisierung der Inhalte sollte später jedoch gewährleistet werden, ebenso wie eine zentrale Anlaufstelle für Anfragen.

Ein erster Entwurf der Struktur einer solchen Plattform ist in Anhang 9 zu finden. Die Erarbeitung eines detaillierten Konzepts sollte in enger Zusammenarbeit mit KLIF / KLIFWA sowie in Abstimmung mit den für das Hochwasserrisikomanagement zuständigen Stellen beim NLWKN erfolgen.

6.3 Erkenntnisse für die fachliche Praxis

Ein wesentliches Ziel des KliBiW Projektes ist es, in der Wissenschaft entwickelte Methoden in die fachliche Praxis des Landesdienstes zu übertragen und dort zu etablieren. Ein zentrales Element in diesem Zusammenhang ist der GLD, dessen Methodenkompetenzen hinsichtlich der Themen Klimawandel und Klimafol-

genwirkung innerhalb seiner Aufgabenbereiche erweitert werden sollen.

Die Entwicklung und Testung von bestehenden Methoden zur Analyse des Klimawandels und seiner Folgen fand zum einen während der Phase 1 des Projektes statt. Zum anderen erfolgt dies auch innerhalb des Verbundprojektes KLIF / KLIFWA, das sich mit der Entwicklung neuer methodischer Ansätze zur Analyse von Klimafolgen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie der Neu- bzw. Weiterentwicklung von deterministischen und statistischen hydrologischen Methoden auseinandersetzt. Auf die Synergien bzw. Abgrenzungen zwischen den beiden Projekten wurde bereits in Kapitel 2.2 kurz eingegangen (vgl. Tabelle 2-1).

Die in KliBiW angewendeten Methoden können in Bezug auf ihre Anwendbarkeit grundsätzlich in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Spezielle Anwendungen (Forschungscharakter): hoch spezialisierte, wissenschaftliche Ansätze
- Komplexe Anwendungen (Kompetenzzentrum): von hoch qualifiziertem bzw. spezialisiertem Personal anwendbare Verfahren
- Standardanwendungen: von fachlich qualifiziertem Personal anwendbare Verfahren

Im Hinblick auf die mögliche Übertragbarkeit in die fachliche Praxis des GLD sind vorrangig die komplexen bzw. standardisierten Anwendungen von Belang. Erstere beziehen sich auf Verfahren, die von speziell geschultem Personal mit entsprechendem Know-How im Landesdienst angewendet werden können. Dieses kann beispielsweise auch in engem Kontakt mit anderen, externen themenspezifischen Institutionen stehen (z.B. Forschungseinrichtungen). Es dient als Anlaufstelle und Kommunikationsknoten für andere Bereiche des NLWKN, die entsprechende (klimarelevante) Informationen für die Bewältigung ihrer Aufgaben benötigen. Die zuletzt genannten Verfahren sollten grundsätzlich innerhalb des gesamten GLD etabliert und eigenständig angewendet werden. Ggf. können hier ausgewählte Fachbereiche zunächst als Multiplikatoren dienen, um entsprechendes Fachwissen und die Verfahrensweisen zu vermitteln. Die speziellen Anwendungen beziehen sich auf die Entwicklung neuer, noch nicht etablierter Verfahren und sollten im Fokus wissenschaftlichen Forschung verbleiben. Die Tabelle 6-1 zeigt die innerhalb von KliBiW angewendeten Verfahren in Bezug auf ihre Stellung innerhalb der drei ge-

nannten Kategorien und die grundsätzlichen Aufgabegebiete des GLD.

Einige der in Tabelle 6-1 aufgeführten Verfahren wurden bereits während der Bearbeitung der Phase 2 von KliBiW erfolgreich in einzelnen Aufgabenbereichen eingesetzt. So wurden die regionalisierten Klimadaten (vgl. Kapitel 3.4) als Eingangsdaten in der Stoffhaushaltsmodellierung genutzt, um in einem ausgewählten Betrachtungsraum räumlich hoch aufgelöst den Austrag verschiedener Nährstoffe aus den Böden zu simulieren. Im Aufgabenbereich der Hochwasservorhersagezentrale (HWVZ) wird bereits ein Niederschlag-Abfluss-Modell (Panta Rhei) für das Gebiet von Aller

und Leine genutzt. Ein ähnliches Modell für die Langzeitsimulation von Klimaszenarien konnte in KliBiW erfolgreich genutzt werden, um Abflusszeitreihen zukünftiger Klimaszenarien zu berechnen, die als Basis für die Bewertung der klimawandelbedingten Hochwasserverhältnisse dienen. Eine Validierung von simulierten Vorhersage-Zeitreihen der HWVZ anhand von Methoden aus dem KliBiW-Projekt ist zurzeit in Arbeit. Zeitnah denkbar ist auch die Validierung von Abflusskomponenten aus den Stoffhaushaltsmodellen anhand der Ergebnisse aus dem Wasserhaushaltsmodell sowie ggf. eine Kopplung der beiden Modelltypen.

Tabelle 6-1: Erweiterung der Methodenkompetenzen des Gewässerkundlichen Landesdienstes in dessen Aufgabenbereichen durch ausgewählte Verfahren des Projekts KliBiW

Aufgaben GLD	Standard	Komplex	Forschung
Niederschlag	Identifikation besonders betroffener Regionen • Datenprüfung / -analyse	• Regionalisierung von Zeitreihendaten • Analyse von Klimamodellsignalen	• Disaggregation von Tageswert-Zeitreihen
Klima	• Validierung von Modelldaten		
Wasserhaushalt / Hochwasser	• Nutzung regionalisierter Zeitreihen	• Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen	• (Weiter-)Entwicklung von Wasserhaushaltsmodellen
Beratung / Stellungnahmen	• Ergebnistransfer in zukünftige Planung (u.a. ÜSG, WRRL, HWRMRL) und Verfahren	• Ableitung von Handlungsempfehlungen + Anpassungsstrategien	
Wasserhaushalt / Niedrigwasser	Phase 3		

6.4 Handlungsempfehlungen

Im Zuge des Projektes KliBiW Phase 1 und 2 wurden verschiedene Aspekte des Klimawandels betrachtet und die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft im Binnenland analysiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können nun Handlungsempfehlungen für den zukünftigen Umgang mit diesen potentiellen Veränderungen abgeleitet und Schwerpunkte für deren Umsetzung bzw. für den Handlungsbedarf in der wasserwirtschaftliche Praxis identifiziert werden.

Um einheitliche und robuste Aussagen zum Thema Klimawandel und Klimawandelfolgen in Niedersachsen machen zu können, sollten die Ergebnisse aus KliBiW

zunächst mit anderen Untersuchungen in Niedersachsen abgeglichen werden. Hier bietet sich vor allem das Verbundprojekt KLIFF / KLIFWA an. Die Projektbeteiligten der beiden Forschungsprojekte sind annähernd identisch, und bereits während der Bearbeitung von KliBiW konnten viele Synergien zwischen den Projekten genutzt werden. Die Erkenntnisse aus KliBiW können in KLIFF genutzt und vertieft werden, so dass nach Abschluss von KLIFF fundierte und robuste Aussagen für Niedersachsen vorliegen werden. Ergebnisse aus anderen Projekten, z.B. Klimafolgenmanagement in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen-Wolfsburg, sowie anderen Bundesländern, z.B. KLIWA, sollten für den Abgleich mit einbezogen werden.

Durch die Synergien von KliBiW und KLIFF konnte eine umfassende Datenbank mit klimarelevanten meteorologischen und hydrologischen Basisdaten sowie entsprechenden Arbeitsergebnissen erstellt werden. Diese bildet ein wichtiges Instrument zur Klimadatenhaltung in Niedersachsen ebenso wie eine wesentliche Grundlage für zukünftige Untersuchungen. Denkbar sind in diesem Zusammenhang etwa Analysen im Aufgabenbereich des Gewässerkundlichen Landesdienstes, aber auch zukünftige klimarelevante Anfragen an und Projekte mit Beteiligung des NLWKN. Um eine notwendige Qualität der Klimadatenbank aufrechterhalten zu können, müssen die Daten kontinuierlich fortgeführt bzw. gepflegt werden.

In Kapitel 6.3 wurde bereits verdeutlicht, inwieweit die fachliche Praxis, insbesondere der GLD, von den Erkenntnissen und entwickelten Methoden aus KliBiW hinsichtlich der Kompetenzen und Methoden im Bereich der Klimafolgenanalyse profitieren kann. Zu den besonders hervorzuhebenden neu gewonnenen Methodenkompetenzen zählen

- die Plausibilisierung und Konsistenzprüfung von Mess- bzw. Modelldaten,
- die Nutzung von (regionalisierten) Klimamodellszenarien,
- die Modellierung von Klimafolgen mittels Niederschlag-Abfluss-Modellen,
- die Nutzung von Klimadaten bei der Gütemodellierung (EG-WRRL).

Es gilt, diese Kompetenzen nachhaltig in die fachliche Praxis des GLD zu integrieren. Das gewonnene Know-How sollte nicht nur vertieft, sondern durch einen stetigen Austausch mit anderen „Experten-Einrichtungen“ fortgeführt und erweitert werden. Auf diese Weise könnte der GLD intern wie extern in Fragen rund um das Thema Klimawandel und seine wasserwirtschaftlichen Folgen auf Landesebene beraten und unterstützen. Entsprechende Institutionen existieren bereits in Landesämtern anderer Bundesländer, wie etwa das Fachzentrum Klimawandel in Hessen oder die Klimaaгентur in Thüringen. Daneben besitzen die Landesbehörden von Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Brandenburg eigenständige Referate mit den Themenschwerpunkten Klimawandel und Klimafolgen.

Ein wichtiger Schritt ist zudem die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in der wasserwirtschaftlichen Praxis. So werden der Klimawandel und seine hydrologischen Folgen einen wesentlichen Einfluss auf

den Betrieb von Multifunktionsspeichern haben und diesen erheblich anspruchsvoller gestalten, da die Speicher vor der Herausforderung stehen, einen Ausgleich zwischen dem voraussichtlich höheren Wasserdargebot im Winter und dem niedrigeren Wasserdargebot im Sommer zu schaffen. Planungen zum Hochwasserschutz und die (Neu-)Bemessung von Hochwasserschutzanlagen müssen so konzipiert sein, dass sie einen gewissen Grad der Flexibilität aufweisen. Aussagen zur Klimafolgenwirkung sind heute noch mit Bandbreiten behaftet, die für die weitere Entwicklung z.T. Spielräume sowohl nach oben wie auch nach unten zulassen. Dementsprechend sollten Maßnahmen derart gestaltet sein, dass sie kostengünstig anpassbar sind („No regret“-Maßnahmen). Auch bei der Ausweisung von wasserwirtschaftlichen Risikogebieten, etwa von Überschwemmungsgebieten oder Gefahrenkarten bei Hochwasserrisikomanagementplänen, wird eine Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaänderungen bereits gefordert (vgl. Richtlinie 2007/60/EG, Wasserhaushaltsgesetz). Auch hier wird die Betrachtung von Bandbreiten als sinnvoll erachtet. Von der Angabe eines einzelnen Klimafaktors wird jedoch zurzeit abgeraten. Zum einen weisen die heutigen Klimaszenarien (Klimamodell-Ensemble) eine relativ große Bandbreite auf, vor allem im Bereich von Extremereignissen, die nicht mit Wahrscheinlichkeiten belegt werden kann. Daher ist auch die Angabe eines Mittels aller Ensemble-Mitglieder als zu erwartende Entwicklungstendenz mit Unsicherheiten behaftet. Zum anderen können Klimamodelle systematische Fehler aufweisen (im Vergleich zu Beobachtungsdaten), deren Korrektur, vor allem im Bereich hoher zeitlicher Auflösung, zurzeit noch Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung ist.

Daher wird auf Basis der bisherigen Ergebnisse aus KliBiW empfohlen, den Klimawandel und seine möglichen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in Niedersachsen als ein (weiteres) qualitatives Bemessungskriterium anzusehen und entsprechend die oben gemachten Ausführungen zu berücksichtigen.

7 Zusammenfassung

Mit dem Projekt KliBiW waren die Ziele verbunden, die Auswirkungen des zu erwartenden Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Niedersachsen zu beurteilen, fundierte Grundlagen für eine effiziente Planung zu schaffen und vor allem wissenschaftlich entwickelte Methoden in die fachliche Praxis des Landesdienstes (GLD) nachhaltig zu integrieren.

Die Tendenzen eines sich ändernden Klimas (Temperatur, Niederschlag) in Niedersachsen wurden im Zuge der Untersuchungen analysiert. Am Beispiel des Einzugsgebietes von Aller und Leine konnten die resultierenden Auswirkungen auf die zukünftigen Abflussverhältnisse modelliert und ausgewertet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass es in Niedersachsen innerhalb der letzten ca. 50 Jahre zu einer signifikanten Erhöhung der mittleren Temperaturen im Winter, Frühjahr und Sommer kam (zwischen etwa +1,4 und +1,9 Grad Celsius, Haberlandt et al., 2010). Die Niederschlagsmittelwerte nahmen im Winter und Herbst zu (bis knapp +30%). Die Entwicklung der Extreme ging bei beiden Klimagrößen grundsätzlich in die gleiche Richtung. Gleichzeitig kam es zu einer Zunahme der Trockendauern im Sommer. Andererseits zeigt sich eine signifikante Abnahme der Sommerhochwasser, während die Trends der Winterhochwasser dagegen eher uneinheitlich bzw. nicht signifikant waren.

Die möglichen zukünftigen Entwicklungen wurden auf Basis des Szenarios A1B mittels des Klimamodell-Ensembles aus REMO UBA bzw. BfG und WETT-REG2006 analysiert. Danach werden die Temperaturen bis Ende des 21. Jahrhunderts in Niedersachsen in allen Jahreszeiten weiter steigen, am stärksten im Winter mit im Mittel ca. +3,2 Grad Celsius gegenüber dem Zeitraum 1971-2000. Die Niederschläge werden im gleichen Zeitraum vor allem im Winter zunehmen, um etwa +18%, im Sommer kommt es dagegen zu Abnahmen von rund -11%. Es kommt zudem zu einer Zunahme der Extremwerte (bis etwa +20%), die jedoch regional stark variieren und durch eine große Bandbreite innerhalb des Modell-Ensembles repräsentiert werden. Die Modellierungsergebnisse aus Panta Rhei auf Tageswertbasis weisen für den Zeitraum 2071-2100 mit rund +40-50% auf eine deutliche Zunahme der mittleren Abflüsse im Winterquartal gegenüber 1971-2000 hin. Jedoch kommt es demnach zu keiner signifikanten Änderung der Mittelwerte im Sommer. Kleinere Hochwasser werden voraussichtlich häufiger auftreten. Zudem nehmen die Scheitelabflüsse von kleinen wie

großen Hochwasserereignissen im Jahr grundsätzlich zu (je nach Größe des Ereignisses und des Teileinzugsgebietes zwischen +10 und +25%), wobei insbesondere die Ergebnisse für extreme Ereignisse große Bandbreiten und demzufolge große Unsicherheiten aufweisen. Hinsichtlich der Entwicklung der Extremwerte zeigte sich bei allen Untersuchungen (historische wie auch zukünftige Niederschläge und Abflüsse) ein schwaches räumliches Muster mit Schwerpunkt der Zunahmen im Süden bzw. Südwesten des Aller-Leine Gebietes, die jedoch z.T. saisonal abhängig sind.

Demnach konnten die Annahmen aus Kapitel 1.1 hinsichtlich der grundsätzlichen zukünftigen Entwicklungstendenzen von Niederschlägen und den resultierenden Abflüsse durch das KliBiW-Projekt bestätigt und quantifiziert werden (vgl. auch Abbildung 7-1).

Durch die Bereitstellung eines zentralen Datenservers (FTP-Server), auf dem sämtliche verfügbaren klimarelevanten Informationen (Rohdaten) gesammelt und daraus ermittelte Analyseergebnisse (Endprodukte) abgelegt werden konnten, wurde eine einheitliche, fundierte Datenbasis für die Projektpartner von KliBiW und KLIF / KLIFWA geschaffen. Informationen und Zwischenergebnisse konnten optimal ausgetauscht und Synergien zwischen den Projekten effizient genutzt werden. Auch zukünftig kann bzw. sollte dieser Datenpool als Grundlage für Untersuchungen dienen und fortgeführt werden.

Im Zuge der Synergien von KliBiW und KLIF / KLIFWA wurden in KLIF neue methodische Ansätze zur Modellbasierten Analyse von Klimawandelfolgen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten entwickelt. Zudem wurden deterministische und statistische hydrologische Methoden wissenschaftlich erprobt. Innerhalb von KliBiW wurden diese Methoden angewendet und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit in die fachliche Praxis, speziell des GLD, untergliedert. Es ergaben sich drei Kategorien von Anwendungen bzw. Methodenansätzen. Während hoch spezialisierte, wissenschaftliche Ansätze, wie etwa die Disaggregation von Niederschlagszeitreihen oder die Entwicklung von Wasserhaushaltsmodellen, üblicherweise der Forschung vorbehalten bleiben sollten, haben sich durchaus Methoden gezeigt, die schon während der Laufzeit von KliBiW in der wasserwirtschaftlichen Praxis Anwendung gefunden haben. Hierzu gehören zum einen komplexe Anwendungen, die im Sinne eines Kompetenzzentrums von hoch qualifiziertem und speziell geschultem Personal zentral durchgeführt werden können. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen zur Simulation von zukünftigen Abflussszenarien genannt. Daneben gibt es

zusätzliche Standardverfahren, die von fachlich qualifiziertem Personal genutzt werden können und grundsätzlich in allen Bereichen des GLD Anwendung finden sollten. Darunter fallen unter anderem die Datenprüfung und –plausibilisierung, die Validierung von Klima(modell)daten und die Nutzung von regionalisierten Zeitreihen.

Auf diese Weise wird die Methodenkompetenz des GLD in Bezug auf die Einschätzung und Berücksichti-

gung von Klimawandelfolgen erweitert. Diese kann bei zukünftigen klimasensiblen Betrachtungen optimal eingesetzt werden, wie etwa bei der Bemessung oder Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen oder der Erstellung von Hochwassergefahrenkarten im Zuge der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie.

Entwicklungstrends	1950 bis 2000 (Niedersachsen)		2000 bis 2100 (Niedersachsen / Aller-Leine)	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Mittlere Niederschläge	↓	↑	↓	↑
Extreme Niederschläge	●	↑	●	↑
Mittlere Abflüsse	↓	●	●	↑
Extreme Abflüsse	↓	●	↑	

↑ ↓ deutliche Zu- / Abnahme ↑ ↓ leichte Zu- / Abnahme ● nicht eindeutig

Abbildung 7-1: Qualitative Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Projekt KliBiW hinsichtlich der Entwicklungstendenzen der mittleren und extremen Niederschläge und Abflüsse für Niedersachsen bzw. das Aller-Leine Gebiet

8 Ausblick

Am Ende der Bearbeitung der Phasen 1 und 2 von KliBiW zeigen sich erste Tendenzen hinsichtlich einer möglichen Entwicklung im Bereich des Wasserhaushaltes und der Hochwasserverhältnisse unter dem Einfluss eines sich wandelnden Klimas am Beispiel des Einzugsgebietes von Aller und Leine. Diese Ergebnisse zeigen aber nur einen Teil der für die fachliche Praxis aber auch die Forschung relevanten Erkenntnisse hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels. Weitere Untersuchungen werden notwendig sein.

So ist vorgesehen, in einer dritten Phase von KliBiW die Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse unter dem Einfluss des Klimawandels in Niedersachsen bzw. dem Aller-Leine Gebiet näher zu betrachten. Neben der detaillierten Analyse der Niedrigwasserproblematik sollen u.a. Schwerpunkte der wasserwirtschaftlichen Folgen identifiziert sowie Grundlagen für effiziente Managementstrategien in Trockenperioden entwickelt werden. Die Ergebnisse aus KliBiW sollen mit denen aus KLIFF / KLIFWA abgeglichen werden, um robuste Aussagen zu den Entwicklungen im niedersächsischen Binnenland machen zu können. Die Phase 3 soll sich unmittelbar an die Untersuchungen der Phase 2 anschließen und wird im Mai 2012 beginnen.

Im Zuge der Bearbeitung der Teilprojekte von KliBiW (Phase 2) haben sich verschiedene Themenblöcke heraus kristallisiert, die zukünftig einer genaueren Betrachtung, vor allem unter dem Aspekt wissenschaftlicher Methoden, bedürfen. Hierzu zählen

- eine Vergrößerung des Modell-Ensembles zur besseren Einschätzung der Bandbreite und Robustheit zukünftiger Klima- bzw. hydrologischer Entwicklungen,
- (dynamische) Klimamodelle besitzen einen systematischen Fehler (Bias), dem es durch robuste Korrektur-Methoden entgegenzuwirken gilt, um Unsicherheiten zu verringern,
- Verbesserung der Plausibilität und Konsistenz von Beobachtungsdaten, vor allem von Pegelaufzeichnungen,
- Übertragung von Regionalisierungsansätzen auch auf Abflusskennwerte,
- Verbesserung der Disaggregationsmodelle, um mit zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsdaten die (Hochwasser-)Simulation weiter zu verbessern.

Aus Sicht der fachlichen Praxis besteht zum einen die Notwendigkeit, die angewandten Methoden zu etablieren und auf weitere Einzugsgebiete in Niedersachsen zu übertragen, da bereits das Aller-Leine Gebiet aufgrund seiner geographischen Lage und topographischen Gegebenheiten eine z.T. hohe Variabilität der Klimasignale und Klimawandelfolgen aufweist. Zum anderen müssen auch die betrachteten hydrologischen Fragestellungen erweitert werden. So besitzen nicht nur die Auswirkungen des Klimawandels auf die Hoch- und Niedrigwasserverhältnisse eine Relevanz für zukünftige Planungen, sondern z.B. auch die Veränderungen in der Gewässergüte und im Stoffhaushalt.

9 Literatur

- ÅNGSTRÖM, A. (1924): Solar and terrestrial radiation, *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 50, 210, 121–125.
- AKIN H., SIEMES H. (1988): *Praktische Geostatistik: Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften* Springer-Verlag, Berlin.
- BRONSTERT, A., KOLOKOTRONIS, V., SCHWANDT, D., STRAUB, H. (2007): Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis: General scheme and application example. *International Journal of Climatology*, 27, 1579-1594.
- BUBENZER, O. & RADTKE, U. (2007): Natürliche Klimaänderungen im Laufe der Erdgeschichte. In: *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Endlicher & Gerstengarbe, Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung e.V. (Hrsg.).
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER – LAWA (2010): *Strategiepapier „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“ – Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen*. Beschluss des Ständigen Ausschusses der LAWA „Hochwasserschutz und Hydrologie (AH)“, Dresden.
- CLAUSSEN, M. (2003): Klimaänderungen: Mögliche Ursachen in Vergangenheit und Zukunft. In: *UWSF - Umweltchemie und Ökotoxologie* 15 (1), 21-30.
- COX, D. R., & STUART, A. (1955): Some quick sign test for trend in location and dispersion. *Biometrika*, 42, 80-95.
- DEUTSCHE METEOROLOGISCHE GESELLSCHAFT DMG (2007): *Stellungnahme der DMG zur Klimaproblematik*, 09.10.2007.
- DVWK (1996): *DVWK-Merkblatt 238/1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen*.
- GELLESZUN, M., K. FÖRSTER, G. RIEDEL, G. MEON, U. PETRY (2012): *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Niedersachsen – Ergebnisse modelltechnischer und hochwasserstatistischer Auswertungen*. In: Weiler, M. (Hrsg.): *Wasser ohne Grenzen - Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 31.12, S. 379f.
- GRÜNEWALD, U., MERZ, B. (2003): Vom Sicherheitsdenken zur Risikokultur. In: *Hochwasservorsorge in Deutschland – Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet* (Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge DKKV; Hrsg.). Schriftenreihe des DKKV, Heft 29, Bonn. Abschnitt 1.3, S. 13-17.
- GÜNTNER, A., OLSSON, J., CALVER, A., GANNON, B. (2001): Cascade-based disaggregation of continuous rainfall time series: the influence of climate. *Hydrology and Earth System Science* 5, 2, 145-164.
- GOOVAERTS P. (2000): Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228, 1-2, 113-129.
- GOOVAERTS P. (1997): *Geostatistics for Natural Resources Evaluation* Oxford University Press, New York, Oxford.
- HABERLANDT, U.; MÜLLER, H. (2012): *Disaggregation von Niederschlägen ausgewählter WETTREG-Szenarien für Teilgebiete in Niedersachsen als Grundlage für mesoskalige Modellierungen*. Leibniz Universität Hannover, Institut für Hydrologie, Wasserwirtschaft und landwirtschaftlichen Wasserbau, interner Bericht (unveröffentlicht), Hannover.
- HABERLANDT, U., MÜLLER, H., VAN DER HEIJDEN, S., VERWORN, A., BERNDT, C., DIETRICH, J., WALLNER, M., KRAUSE, F. (2011): *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 KLIF.

- HABERLANDT, U., BELLI, A., HÖLSCHER, J. (2010): Trends in beobachteten Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag in Niedersachsen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 54(1), 28-36.
- HABERLANDT U., SCHUMANN A., BÜTTNER U. (2005): Räumliche Niederschlagsschätzung aus Punktmessungen und Radar am Beispiel des Elbehochwassers 2002. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 49, 2, 56-68.
- HALL, M. J. (2001): How well does your model fit the data? *Journal of Hydroinformatics* 03.1, S. 49-55.
- HANTEL, M.; KRAUS, H.; SCHÖNWIESE, C.D. (1987): *Climate definition*. Berlin: Springer Verlag.
- HARZWASSERWERKE GMBH (2011): Analyse von Hochwasserereignissen in Einzugsgebieten des Westharzes zur Phase II des Forschungsvorhabens KliBiW.
- HARZWASSERWERKE GMBH (2009): *Wasserwirtschaft im Westharz – Hydrologische Untersuchungen mit Blick auf ein sich veränderndes Klima*.
- HUNDECHA, Y., & BÀRDOSSY, A. (2005): Trends in daily precipitation and temperature extremes across western Germany in the second half of the 20th century. *International Journal of Climatology*, 25, 1189-1202.
- IHRINGER, J. (2004): Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasser-Statistik. In: 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg, Fachvorträge. *Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft*. KLIWA-Berichte, Heft 4, Arbeitskreis KLIWA (LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Deutscher Wetterdienst (DWD)).
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC (2007): *Klimaänderung 2007 – Wissenschaftliche Grundlagen*. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung, Bern/Wien/Berlin.
- JACOB D., GÖTTEL H., KOTLARSKI S., LORENZ P., SIECK K. (2008): *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. Climate Change 11/08, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau.
- KENDALL, M. G. (1975): *Rank Correlation Methods*. Griffin, London.
- KLIWA (2009): *Klimawandel im Süden Deutschlands / Ausmaß – Folgen – Strategien*. KLIWA Broschüre.
- KLIWA (2006): *Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt*. KLIWA-Berichte, Heft 9, Arbeitskreis KLIWA (LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Deutscher Wetterdienst (DWD)).
- MANIAK, U. (1997): *Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure*. Springer, Berlin.
- MARSLAND, J.S., HAAK, H., JUNGCLAUS, J.H., LATIF, M., RÖSKE, F. (2003): The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean modelling* 5, 2, 91-127.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, MUNLV (2007): *Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Wege zu einer Anpassungsstrategie*.
- MONTEITH, J L. (1965): *Evaporation and environment*. In: 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge: University Press, S. 205–234.
- MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In: *Nature* 463, p. 747-756.
- MÜLLER, H. (2011): *RAINcarnation – User documentation*. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Leibniz Universität Hannover, Hannover.

- NAKICENOVIC N., DAVIDSON O., DAVIS G., GRÜBLER A., KRAM T., ROVERE E.L.L., BERT METZ, 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, in: I. P. o. C. Change (Ed.).
- NASH, J. E. & J. V. SUTCLIFFE (1970): River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology* 10, S. 282–290.
- NIEDERSÄCHSISCHES WASSERGESETZ (2010): Gesetz zur Neuregelung des Niedersächsischen Wasserrechts. In der Fassung vom 19.02.2010.
- OLSSON, J. (1998): Evaluation of a scaling cascade model for temporal rainfall disaggregation. *Hydrology and Earth System Science* 2, 1, 19-30.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- RAHMSTORF, S. & SCHELLNHUBER, H.J. (2007): *Der Klimawandel. Diagnose, Prognose, Therapie.* München.
- REGIERUNGSKOMMISSION KLIMASCHUTZ (2010): Beschlussempfehlung des Arbeitskreises ‚Klimafolgenanpassung‘ zur ‚Implementierung der Auswirkungen des Klimawandels in der Wasserwirtschaft im Binnenland als wichtiger Beitrag für eine vorausschauende Daseinsvorsorge‘. (unveröffentlicht)
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmesser. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach am Main*, 194, 93 Seiten.
- RICHTLINIE 2007/60/EG (2007): EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie. Fassung vom 23.10.2007.
- RIEDEL, G. (2012): *Panta Rhei Benutzerhandbuch - Programmdokumentation zur hydrologischen Modellsoftware.* Institut für Flussgebietsmanagement, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- RIEDEL, G., K. FÖRSTER, G. MEON, S. LANGE, T. LICHTENBERG UND M. ANHALT (2011): *PANTA RHEI – Modellsystem für Forschung und Praxis* (Posterbeitrag), Tag der Hydrologie, Wien.
- RIEDEL, G. (2004): *Ein hydrologisches Modell für tidebeeinflusste Flussgebiete.* Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- ROECKNER, E., BÄUML, G., BONAVENTURA, L., BROKOPF, R., ESCH, M., GIORGETTA, M., HAGEMANN, S., KIRCHNER, I., KORNBLUEH, L., MANZINI, E., RHODIN, A. SCHLESE, U., SCHULZWEIDA, U., TOMPKINS, A. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM 5 part I-Model description. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 349.
- RUTTER, A. J., K. A. KERSHAW, P. C. ROBINS, A. J. MORTON (1971): A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology* 9, S. 367–384.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2 - Endbericht. Publikationen des Umweltbundesamtes.
- THE COPENHAGEN DIAGNOSIS (2009): *Updating the World on the Latest Climate Science.* I. Allison, N.L. Bindoff, R.A. Bindshadler, P.M. Cox, N. de Noblet, M.H. England, J.E. Francis, N. Gruber, A.M. Haywood, D.J. Karoly, G. Kaser, C. Le Quéré, T.M. Lenton, M.E. Mann, B.I. McNeil, A.J. Pitman, S. Rahmstorf, E. Rignot, H.J. Schellnhuber, S.H. Schneider, S.C. Sherwood, R.C.J. Somerville, K. Steffen, E.J. Steig, M. Visbeck, A.J. Weaver. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia.

WALSH, J. E. (1950): Some nonparametric tests of whether the largest observations of a set are too large or too small. *Annals of Mathematical Statistics* 21, 583-592.

WASSERHAUSHALTSGESETZ (2010): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. In der Fassung vom 31.07.2009.

Internetseiten:

http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/stellungnahmen/DMG-KlimastatementKurzf_160307.pdf

(21.03.2012)

[http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesk-top?nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_start&T99803827171196328354269gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FKU%2FKUPK%2FHomez-mepa-](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesk-top?nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_start&T99803827171196328354269gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FKU%2FKUPK%2FHomez-mepa-ge%2FKlimawandel%2FKlimawandel.html&_state=maximized&_windowLabel=T99803827171196328354269&_lastPageLabel=dwdwww_start)

[ge%2FKlimawandel%2FKlimawandel.html&_state=maximized&_windowLabel=T99803827171196328354269&_lastPageLabel=dwdwww_start](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesk-top?nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_start&T99803827171196328354269gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FKU%2FKUPK%2FHomez-mepa-ge%2FKlimawandel%2FKlimawandel.html&_state=maximized&_windowLabel=T99803827171196328354269&_lastPageLabel=dwdwww_start)
(07.03.2012)

http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Other/klimawandel_fact_sheet.pdf (07.03.2012)

http://klimawandel.hlug.de/fileadmin/dokumente/klima/fachgespraech/Leitlinien_zur_Interpretation-req-KMD-05-2011.pdf (07.03.2012)

Anhang

Anhang 1:	Emissionsszenarien der Zukunft (nach IPCC, 2007; IPCC, 2000)	102
Anhang 2:	Ordnerstruktur auf dem FTP-Server von KliBiW (Stand Februar 2012)	103
Anhang 3:	Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der nach Größe sortierten Jahresmitteltemperaturen für verschiedene Teilgebiete	104
Anhang 4:	Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der Monatsmitteltemperaturen für verschiedene Teilgebiete	105
Anhang 5:	Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der nach Größe sortierten Jahresniederschlagssummen für verschiedene Teilgebiete	106
Anhang 6:	Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der Monatsniederschlagssummen für verschiedene Teilgebiete	107
Anhang 7:	Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der nach Größe sortierten Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge für verschiedene Teilgebiete	108
Anhang 8:	Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der nach Größe sortierten max. Anzahl von aufeinanderfolgenden Trockentagen (mit $N < 0,1\text{mm}$) für verschiedene Teilgebiete	109
Anhang 9:	Konzept zum Aufbau einer Informations- und Kommunikationsplattform zur Wissensvermittlung im Bereich Klimawandel und Hochwasser(schutz)	110
Anhang 10:	Generalisierung der ATKIS-Landnutzungsklassen für die hydrologische Modellierung	111
Anhang 11:	Das Einzugsgebiet der Aller mit der Unterteilung in Teileinzugsgebieten nach der Hydrographischen Karte Niedersachsens	114
Anhang 12:	Systemplan des Einzugsgebietsmodells der Aller. Die Verknüpfungen geben an, in welches unterhalbliegende Systemelement ein betrachtetes Systemelement entwässert. Das unterteste Systemelement ist der Gebietsauslass.	115
Anhang 13:	Im Allereinzugsgebiet berücksichtigte Bauwerke	116
Anhang 14:	Kategorisierung der WETTREG2006-Realisationen nach der Eigenschaft „nass“, „mittel“, „trocken“ anhand der Abweichungen des mittleren Abflusses bzw. der Hochwasser-Quantile vom Mittel über alle Realisationen.	117
Anhang 15:	Mittlere Monatsmittel der Niederschlags- und Abflusshöhe auf Basis von 20 WETTREG-Realisationen für die Referenzpegel (20C). Die Niederschläge wurden zunächst um systematische Abweichungen korrigiert.	118
Anhang 16:	Mittlere Monatsmittel der Niederschlags- und Abflusshöhe auf Basis der Läufe REMO-UBA und REMO BfG für die Referenzpegel (20C). Die Niederschläge wurden zunächst um systematische Abweichungen korrigiert.	122
Anhang 17:	Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesmittelwertes des Abflusses für die Referenzpegel in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	126
Anhang 18:	Hochwasserwahrscheinlichkeiten für die Referenzpegel, ermittelt mit Hilfe der Gumbel-Verteilung	127
Anhang 19:	Hochwasserwahrscheinlichkeiten für die Pegel der Detailgebiete mit REMO-Stundenniederschlägen und disaggregierten WETTREG-Niederschlägen, ermittelt mit Hilfe der Gumbel-Verteilung	131
Anhang 20:	Mittlere monatliche Abflusshöhen aus REMO-UBA für drei Zeiträume	136
Anhang 21:	Mittlere monatliche Abflusshöhen aus REMO-BFG für drei Zeiträume	141

Anhang 22:	Mittlere Abflusshöhen pro Quartal aus 20 WETTREG2006-Realisationen und 2 REMO-Läufen (UBA und BfG) für drei Zeiträume.	145
Anhang 23:	Mittlere Hochwasserabflüsse (MHQ) aus 20 WETTREG2006-Realisationen und 2 REMO-Läufen (UBA und BfG) für drei Zeiträume, Angaben in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	149
Anhang 24:	Mittlere Hochwasserabflüsse (MHQ) aus 20 WETTREG2006-Realisationen und 2 REMO-Läufen (UBA und BfG) für drei Zeiträume in Relation zum entsprechenden Kontrolllauf (20C).....	150
Anhang 25:	Vergleich der Hochwasserabflüsse verschiedener Zeiträume für die Referenzpegel.....	151
Anhang 26:	Relative Änderung der Hochwasserabflüsse verschiedener Zeiträume bezogen auf den Zeitraum 1971-2000 (=100%) für die Referenzpegel.....	153
Anhang 27:	Hochwasserkenngößen der Szenarien für die Pegel der Detailgebiete (Z1 = 1971-2000, Z2 = 2021-2050, Z3 = 2071-2100)	154

Anhang 1: Emissionsszenarien der Zukunft (nach IPCC, 2007; IPCC, 2000)

A1. Die A1-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, und rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Wichtige grundlegende Themen sind Annäherung von Regionen, Entwicklung von Handlungskompetenz sowie zunehmende kulturelle und soziale Interaktion bei gleichzeitiger substantieller Verringerung regionaler Unterschiede der Pro-Kopf-Einkommen. Die A1-Szenarien-Familie teilt sich in drei Gruppen auf, die unterschiedliche Ausrichtungen technologischer Änderungen im Energiesystem beschreiben. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich in ihrer technologischen Hauptstossrichtung: fossil-intensiv (A1FI), nichtfossile Energiequellen (A1T) oder eine ausgewogene Nutzung aller Quellen (A1B) (wobei ausgewogene Nutzung definiert ist als eine nicht allzu große Abhängigkeit von einer bestimmten Energiequelle und durch die Annahme eines ähnlichen Verbesserungspotentials für alle Energieversorgungs- und -verbrauchstechnologien).

A2. Die A2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sehr heterogene Welt. Das Grundthema ist Autarkie und Bewahrung lokaler Identitäten. Regionale Fruchtbarkeitsmuster konvergieren nur sehr langsam, was eine stetig zunehmende Bevölkerung zur Folge hat. Die wirtschaftliche Entwicklung ist vorwiegend regional orientiert und das Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum und technologische Veränderungen sind bruchstückhafter und langsamer als in anderen Modellgeschichten.

B1. Die B1- Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sich näher kommende Welt, mit der gleichen, Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung wie in der A1-Modellgeschichte, jedoch mit raschen Änderungen der wirtschaftlichen Strukturen in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft, bei gleichzeitigem Rückgang des Materialverbrauchs und Einführung von sauberen und ressourcen-effizienten Technologien. Das Schwergewicht liegt auf globalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit, einschließlich erhöhter sozialer Gerechtigkeit, aber ohne zusätzliche Klimainitiativen.

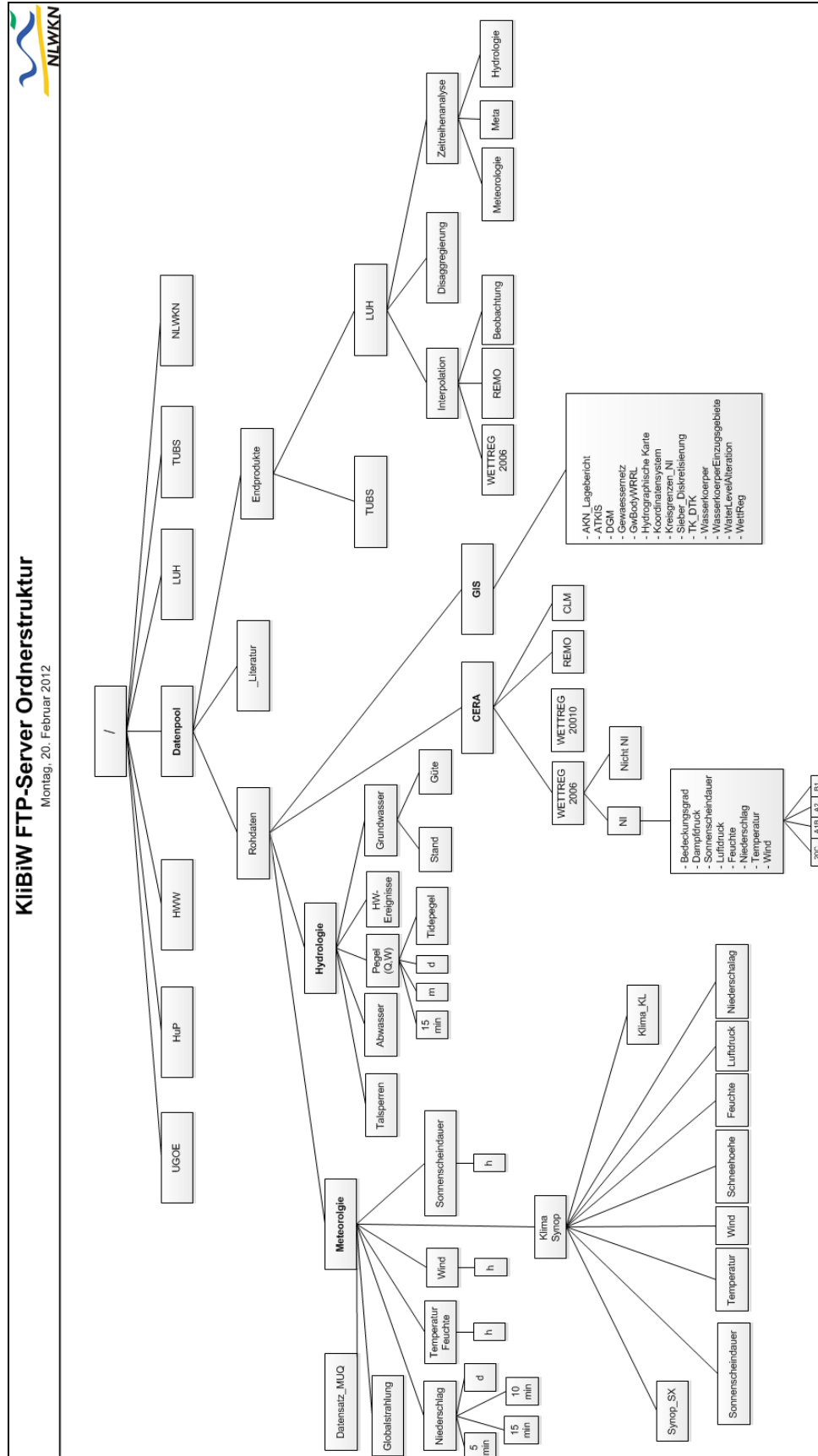
B2. Die B2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine Welt mit Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit. Es ist eine Welt mit einer stetig, jedoch langsamer als in A2 ansteigenden Weltbevölkerung, wirtschaftlicher Entwicklung auf mittlerem Niveau und weniger raschem, dafür vielfältigerem technologischem Fortschritt als in den B1- und A1-Modellgeschichten. Obwohl das Szenario auch auf Umweltschutz und soziale Gerechtigkeit ausgerichtet ist, liegt der Schwerpunkt auf der lokalen und regionalen Ebene.

Für jede der sechs Szenarien-Gruppen A1B, A1FI, A1T, A2, B1 und B2 wurde ein illustratives Szenario gewählt. Alle sollten als gleich stichhaltig betrachtet werden.

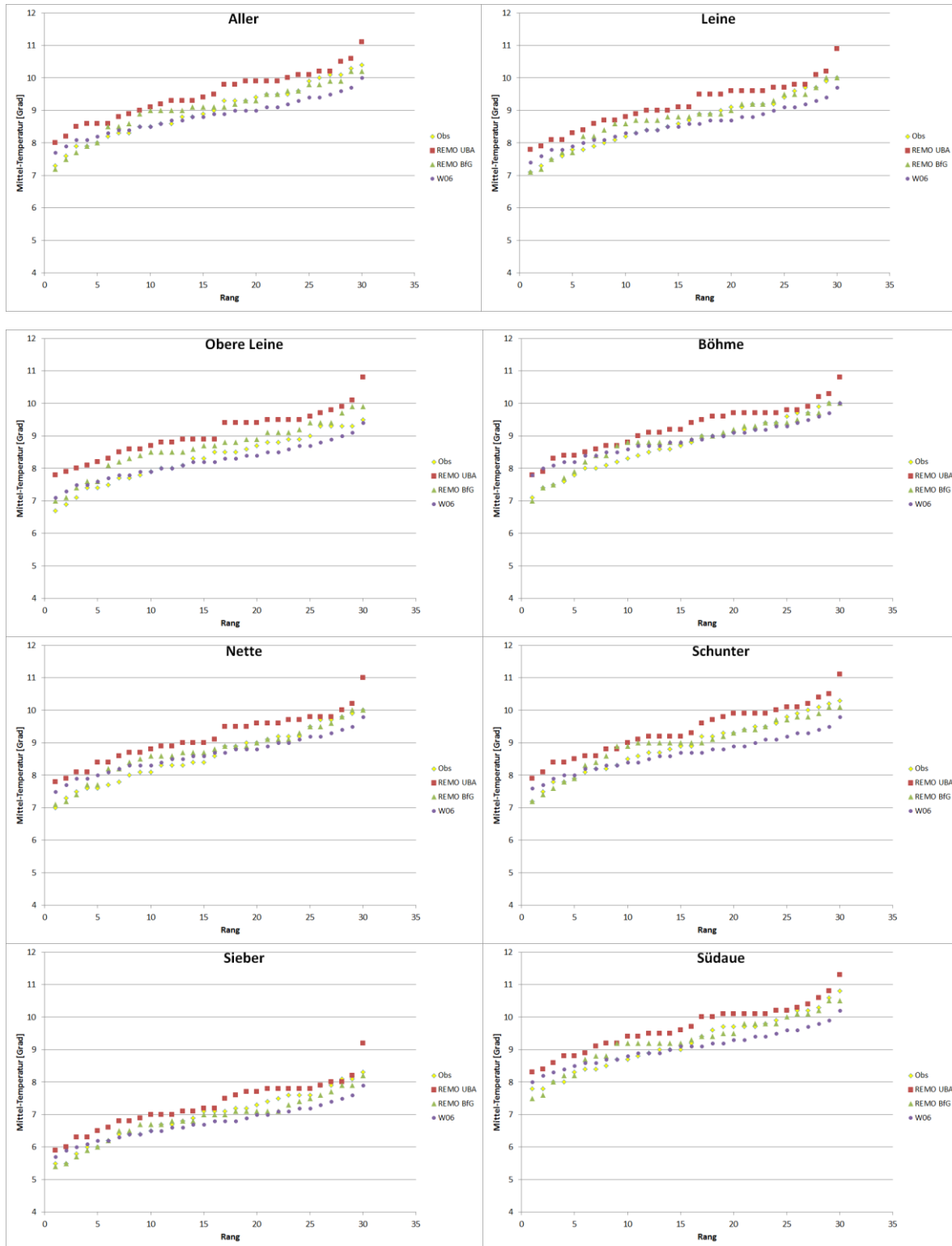
Die SRES-Szenarien beinhalten keine zusätzlichen Klimainitiativen, d.h. es sind keine Szenarien berücksichtigt, die ausdrücklich eine Umsetzung des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) oder den Emissionszielsetzungen des Kyoto-Protokolls annehmen.

Anhang 2:

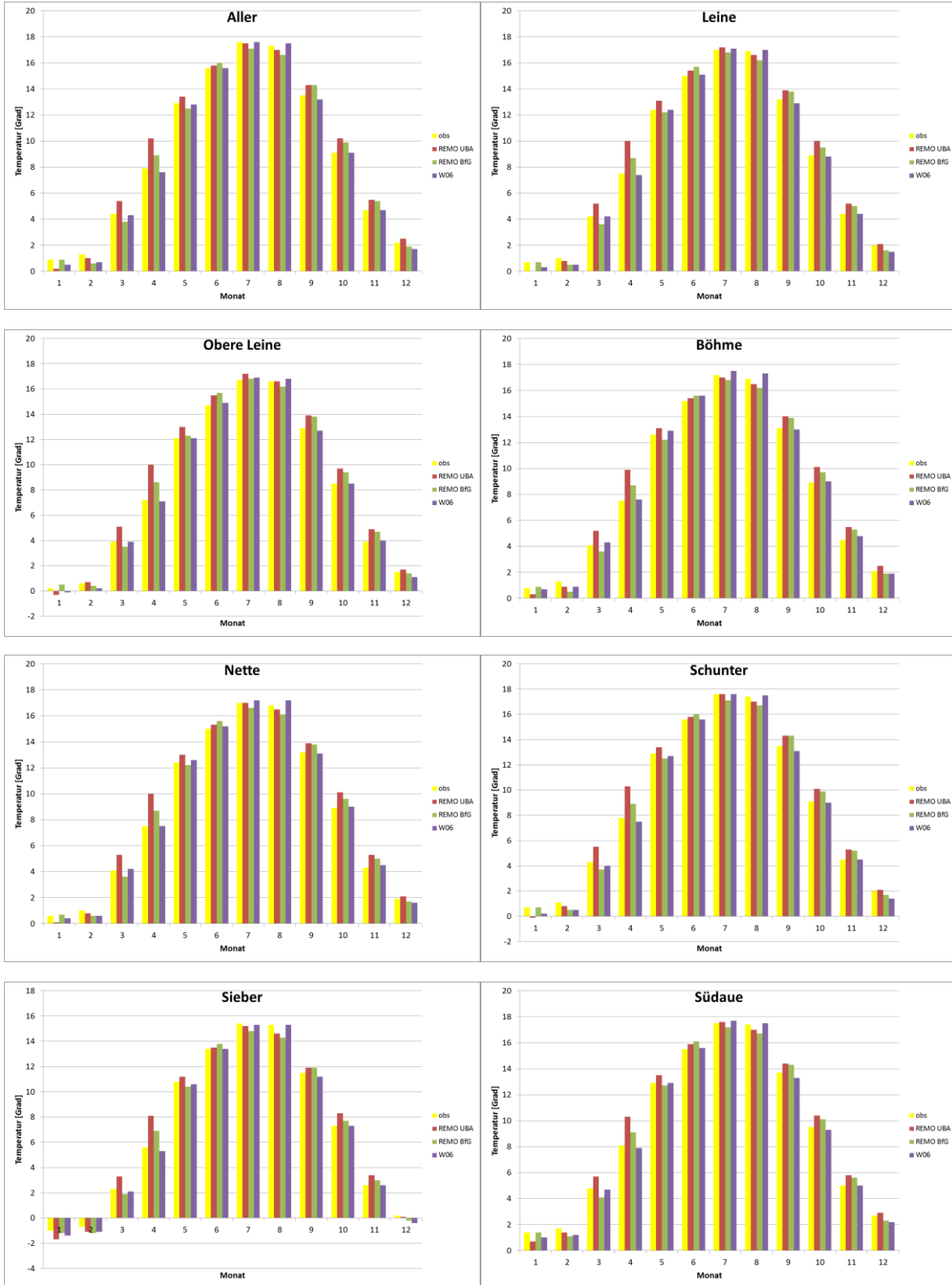
Ordnerstruktur auf dem FTP-Server von KliBiW (Stand Februar 2012)



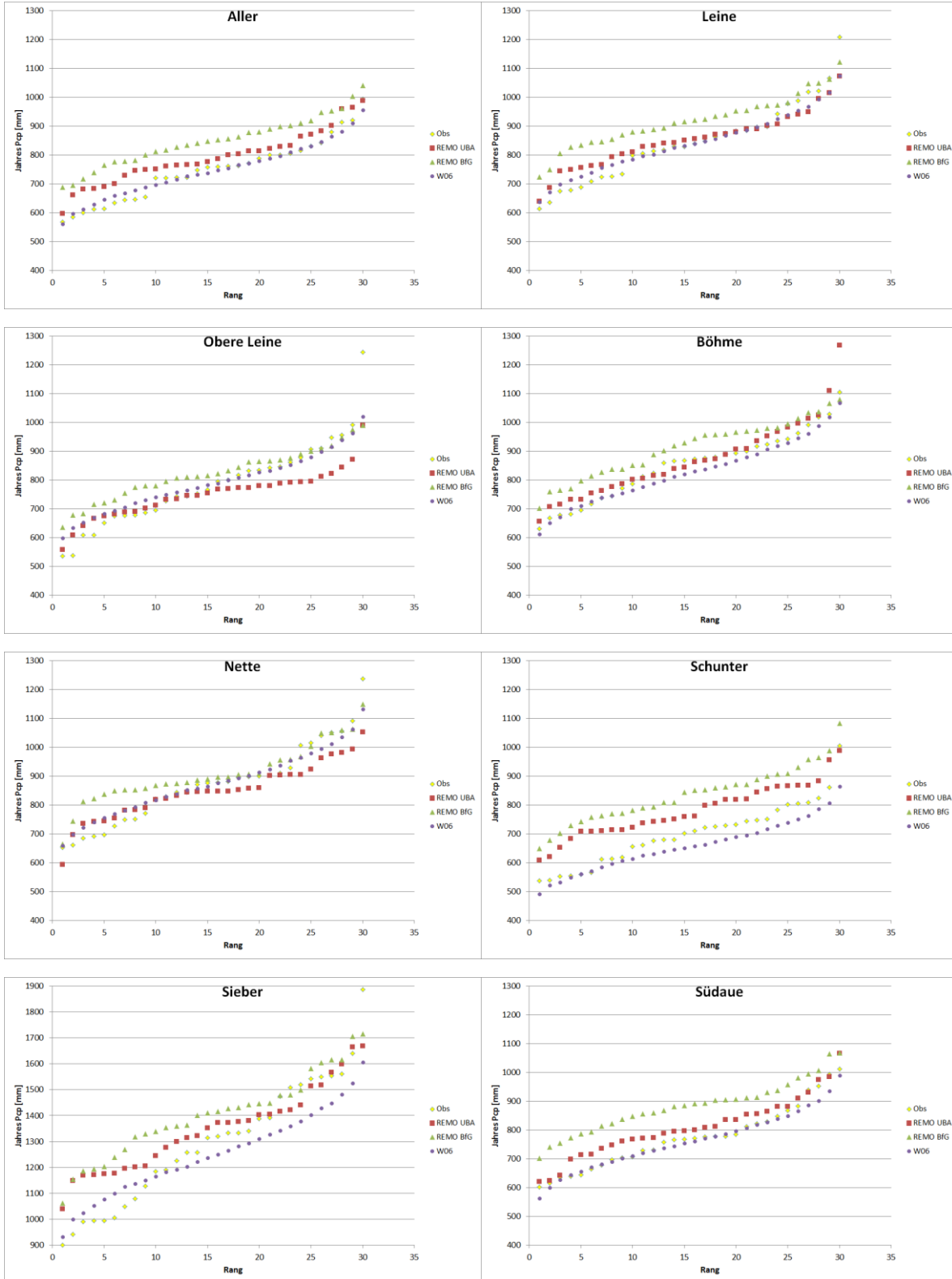
Anhang 3: Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der nach Größe sortierten Jahresmitteltemperaturen für verschiedene Teilgebiete



Anhang 4: Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der Monatsmitteltemperaturen für verschiedene Teilgebiete



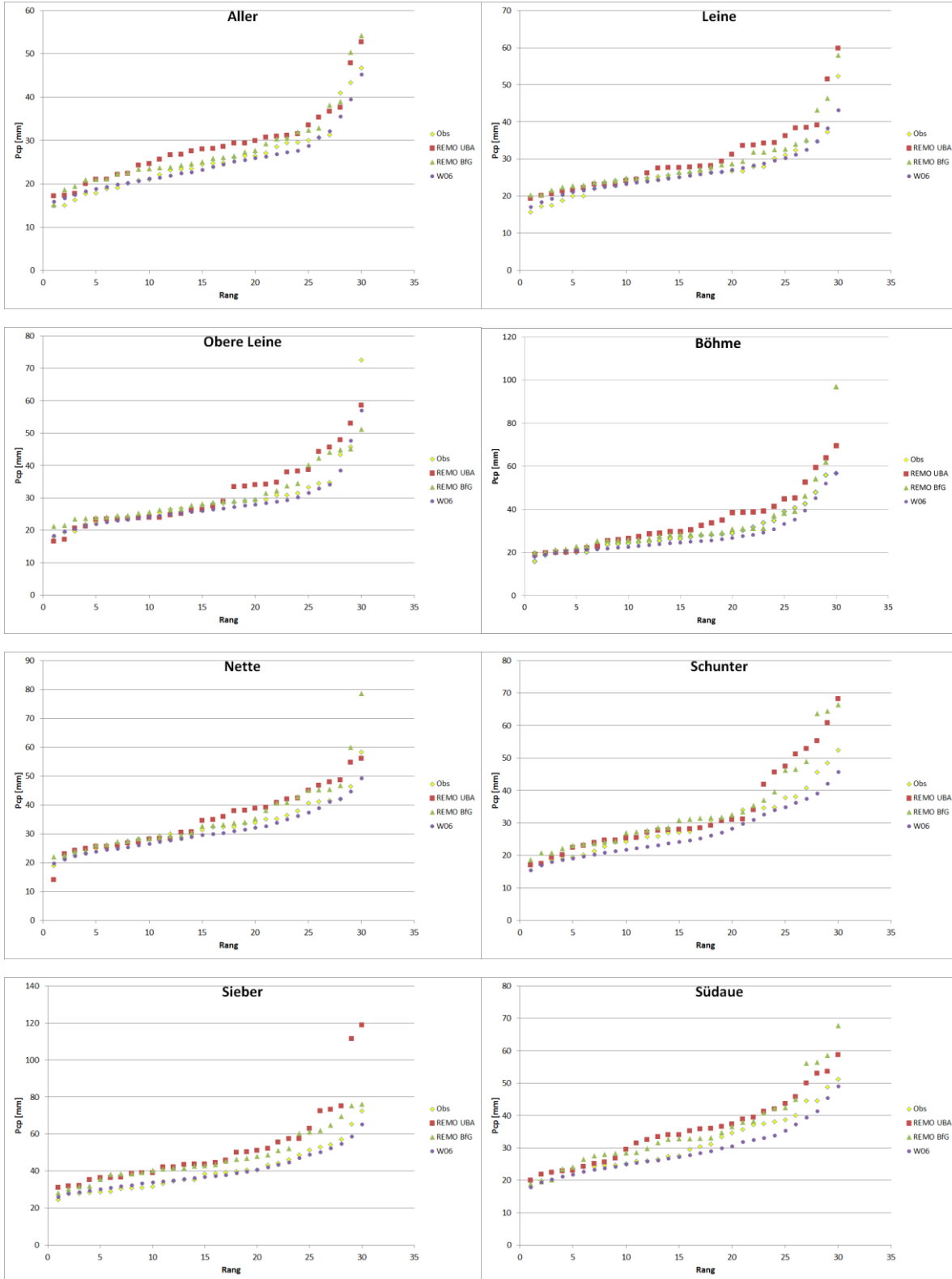
Anhang 5: Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der nach Größe sortierten Jahresniederschlagssummen für verschiedene Teilgebiete



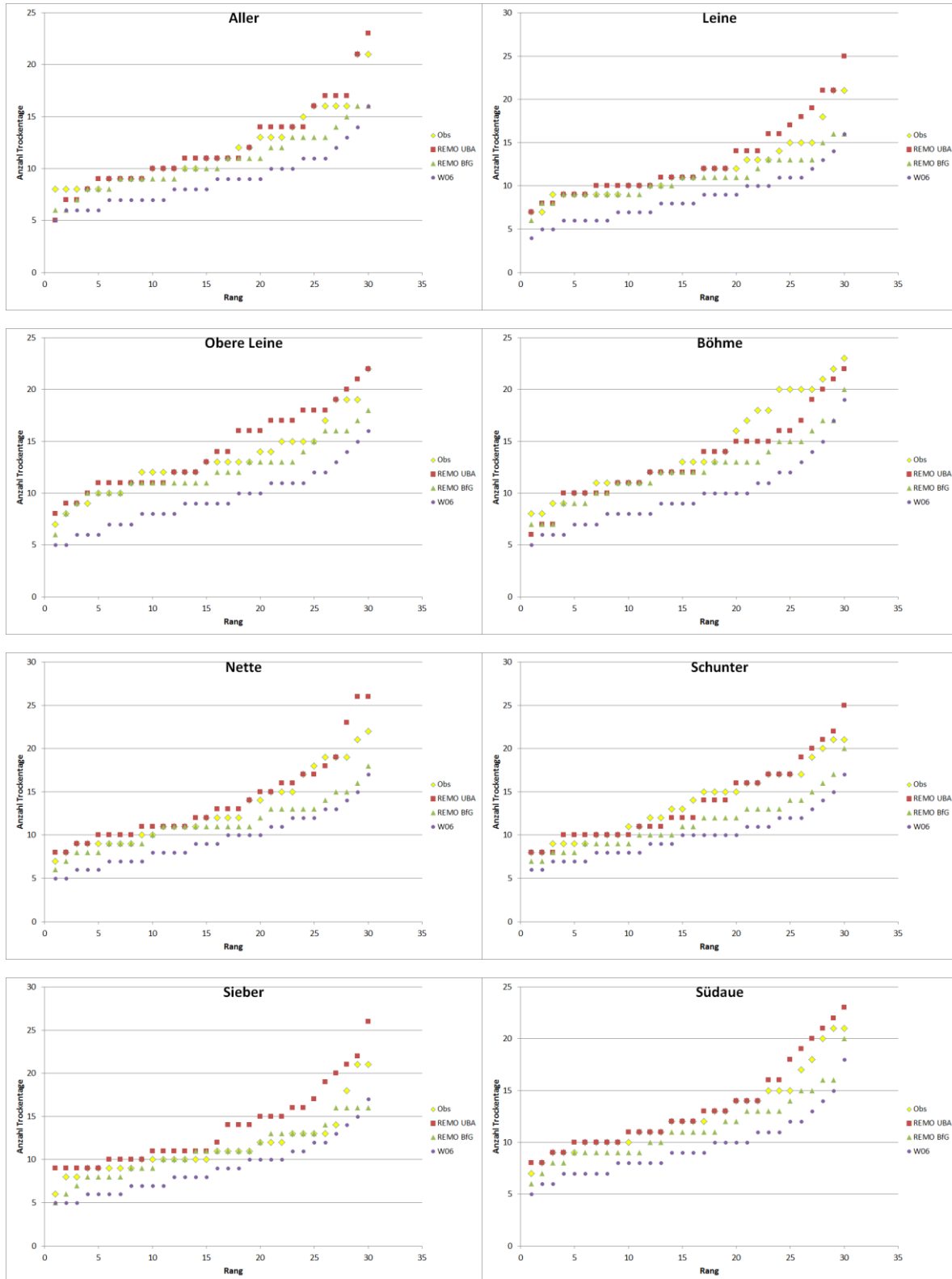
Anhang 6: Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der Monatsniederschlagssummen für verschiedene Teilgebiete



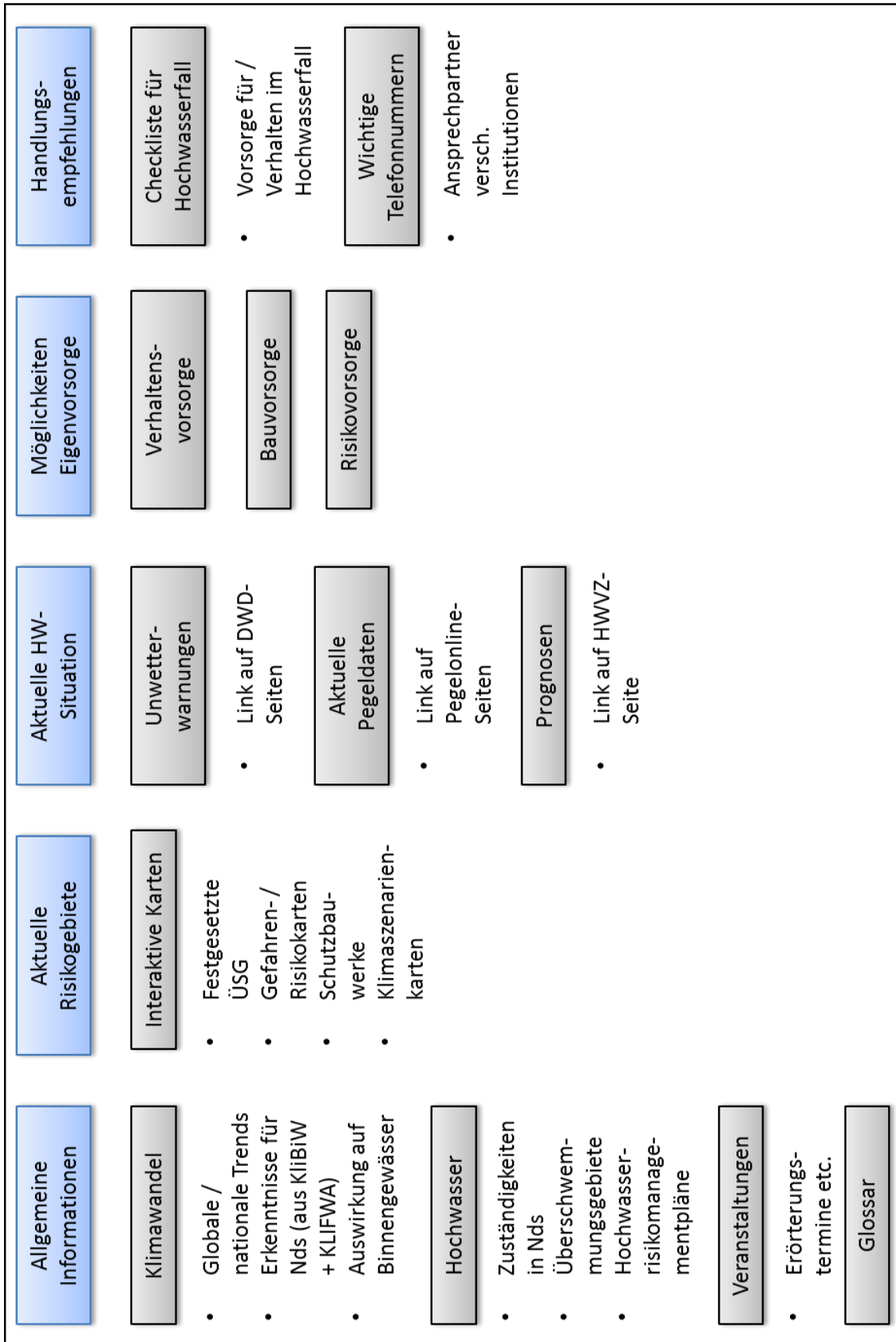
Anhang 7: Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der nach Größe sortierten Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge für verschiedene Teilgebiete



Anhang 8: Validierung der Klimamodelldaten von WETTREG2006, REMO UBA und BfG anhand der nach Größe sortierten max. Anzahl von aufeinanderfolgenden Trockentagen (mit $N < 0,1\text{mm}$) für verschiedene Teilgebiete



Anhang 9: Konzept zum Aufbau einer Informations- und Kommunikationsplattform zur Wissensvermittlung im Bereich Klimawandel und Hochwasser(schutz)



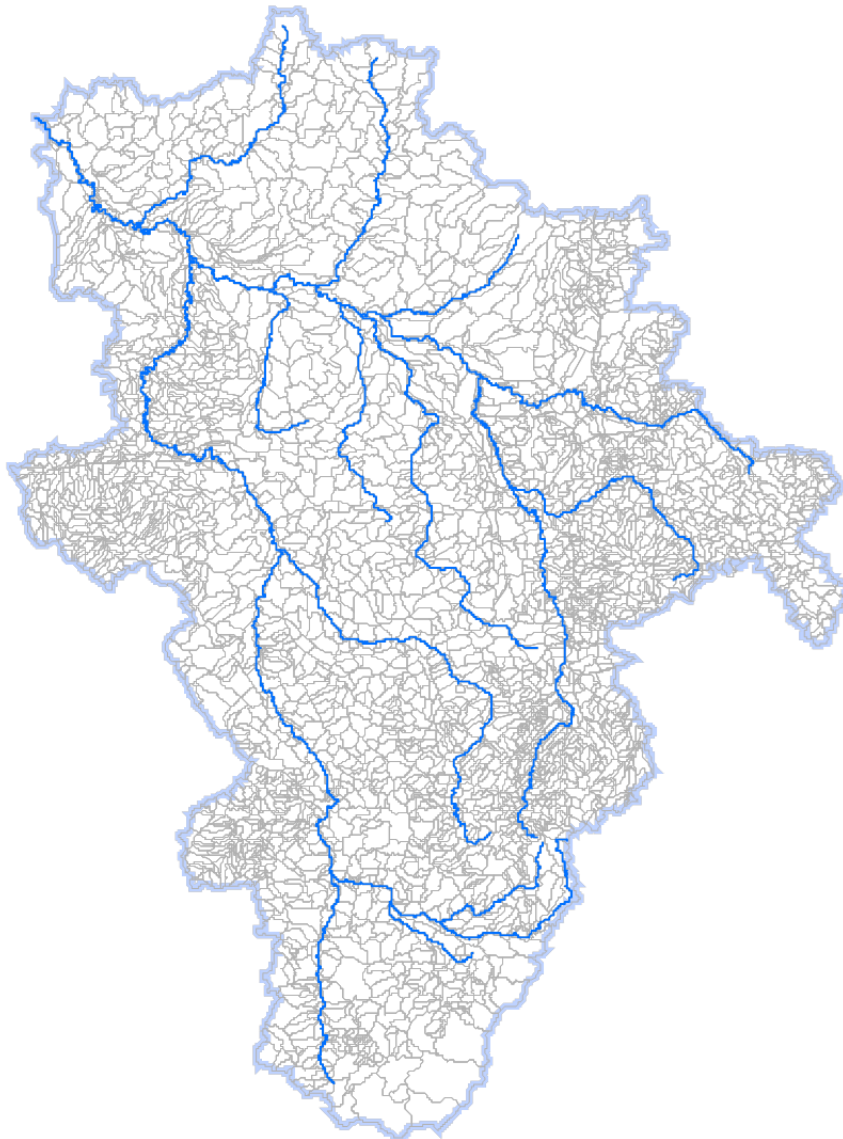
Anhang 10: Generalisierung der ATKIS-Landnutzungsklassen für die hydrologische Modellierung

Bezeichnung	ATKIS-Nr.	Bezeichnung ATKIS (OBJEKTART)	G0	G1	G2	Entsprechung Corine
Acker	4101	Ackerland	4101			211
Moor	4105	Moor	4105	4101	4101	412
Moor	4106	Sumpf, Ried	4106	4105	4105	411
Laubwald	4107	Wald, Forst	9411	9411		
Laubwald	4108	Gehölz	9414	9414	9411	311
Nadelwald	4107	Wald, Forst	9412	9412		
Nadelwald	4108	Gehölz	9415	9415	9412	312
Mischwald	4107	Wald, Forst	9413	9413		
Mischwald	4108	Gehölz	9416	9416	9413	313
Ortslage	2101	Ortslage	2101			
Wohnbaufläche	2111	Wohnbaufläche	2111	2111		111
Industrie- und Gewerbefläche	2135	Abfallbeseitigungsanlage	2135			
Industrie- und Gewerbefläche	2122	Abfalldeponie	2122			131
Industrie- und Gewerbefläche	2131	Ausstellungsgelände Messegelände	2131			
Industrie- und Gewerbefläche	3501	Bahnhofsanlage	3501			
Industrie- und Gewerbefläche	2121	Bergbaubetrieb	2121			
Industrie- und Gewerbefläche	3301	Flughafen	3301			
Industrie- und Gewerbefläche	3401	Hafen	3401			123
Industrie- und Gewerbefläche	2133	Heizwerk	2133			
Industrie- und Gewerbefläche	2112	Industrie- und Gewerbefläche	2112			121
Industrie- und Gewerbefläche	2129	Kläranlage Klärwerk	2129			
Industrie- und Gewerbefläche	2126	Kraftwerk	2126			
Industrie- und Gewerbefläche	3502	Raststätte	3502			
Industrie- und Gewerbefläche	5303	Schleuse	5303			
Industrie- und Gewerbefläche	2127	Umspannwerk	2127			
Industrie- und Gewerbefläche	2134	Wasserwerk	2134			
Industrie- und Gewerbefläche	2124	Werft	2124			
Industrie- und Gewerbefläche	2128	Förderanlage	2128	2112	9210	

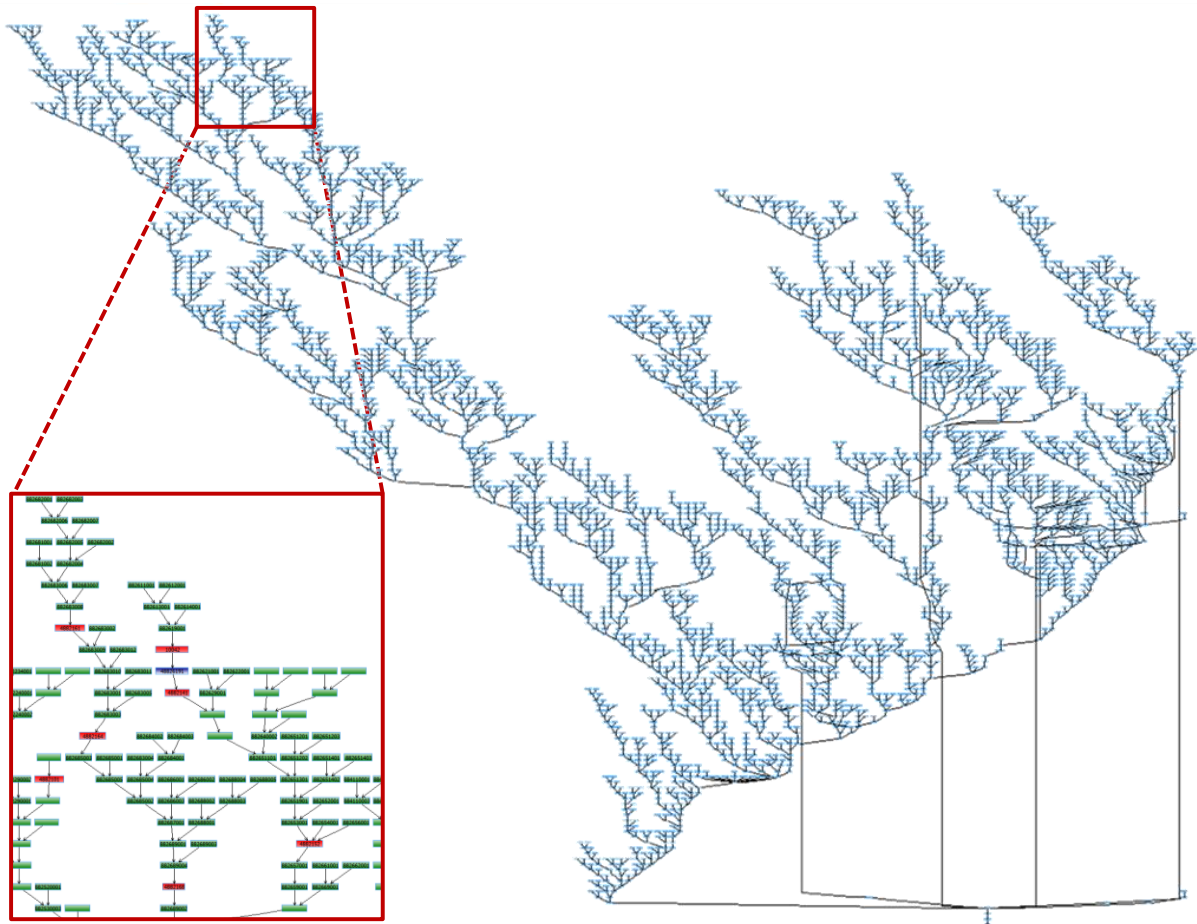
Bezeichnung	ATKIS-Nr.	Bezeichnung ATKIS (OBJEKTART)	G0	G1	G2	Entsprechung Corine
versiegelte Flächen	3514	Brücke Unterführung Überführung	3514			
versiegelte Flächen	3302	Flugplatz Landeplatz	3302			124
versiegelte Flächen	3103	Platz	3103			122
versiegelte Flächen	3303	Rollbahn	3303			
versiegelte Flächen	2221	Stadion	2221	3103		
Binnensee Stausee Teich	2314	Absetzbecken Rieselfeld Schlammteich	2314			
Binnensee Stausee Teich	5112	Binnensee Stausee Teich	5112			
Binnensee Stausee Teich	3402	Hafenbecken	3402			522
Binnensee Stausee Teich	5102	Kanal (Schifffahrt)	5102			
Binnensee Stausee Teich	4111	Nasser Boden	4111			
Binnensee Stausee Teich	5304	Schleusenkammer	5304			
Binnensee Stausee Teich	2345	Schwimmbecken	2345			
Binnensee Stausee Teich	5105	Talsperre Wehr	5105	5112		
Binnensee Stausee Teich	5103	Graben Kanal (Wasserwirtschaft)	5103			
Strom Fluss Bach	5101	Strom Fluss Bach	5101			511
Strom Fluss Bach	5302	Quelle	5302	5101	9510	
entfällt	3513	Tunnel	3513			
Freizeitanlage	2228	Campingplatz	2228			
Freizeitanlage	2226	Freizeitpark Safaripark	2226			
Freizeitanlage	2230	Golfplatz	2230			
Freizeitanlage	2223	Schiesstand	2223			
Freizeitanlage	2224	Schwimmbad Freibad	2224			
Freizeitanlage	2201	Sportanlage	2201			141
Freizeitanlage	2222	Sportplatz	2222			
Freizeitanlage	2211	Freilichttheater	2211			
Freizeitanlage	2202	Freizeitanlage	2202			
Freizeitanlage	2342	Spielfeld, Spielfläche	2342			
Freizeitanlage	2343	Zuschauertribüne	2343	2202		
Grünanlage	2213	Friedhof	2213			
Grünanlage	2225	Zoo	2225			
Grünanlage	2227	Grünanlage	2227	2227		
Gartenland	2132	Gärtnerei	2132	4103	9321	

Bezeichnung	ATKIS-Nr.	Bezeichnung ATKIS (OBJEKTART)	G0	G1	G2	Entsprechung Corine
Gartenland	4103	Gartenland	4103			
Gartenland	4109	Sonderkultur	4109			
Grünland	3304	Flughafen-Vorfeld	3304			
Grünland	4102	Grünland	4102	4102		321
Heide	4104	Heide	4104	4104		
Naturschutzgebiet	7302	Naturschutzgebiet	7302	7302		
gemischte Nutzung	2302	Halde Aufschüttung	2302			
gemischte Nutzung	2301	Tagebau Grube Steinbruch	2301			
gemischte Nutzung	2114	Fläche besonderer funktionaler Prägung	2114			
gemischte Nutzung	2113	Fläche gemischter Nutzung	2113			
gemischte Nutzung	4199	Fläche z.Zt. unbestimmbar	4199	2113		999
gemischte Nutzung	7403	Truppenübungsplatz	7403	2113		
Insel	7211	Insel	7211	7211		
Brache	4120	Vegetationslose Fläche	4120	4120	9600	331

Anhang 11: Das Einzugsgebiet der Aller mit der Unterteilung in Teileinzugsgebieten nach der Hydrographischen Karte Niedersachsens



Anhang 12: Systemplan des Einzugsgebietsmodells der Aller. Die Verknüpfungen geben an, in welches unterhalbliegende Systemelement ein betrachtetes Systemelement entwässert. Das unterteste Systemelement ist der Gebietsauslass.



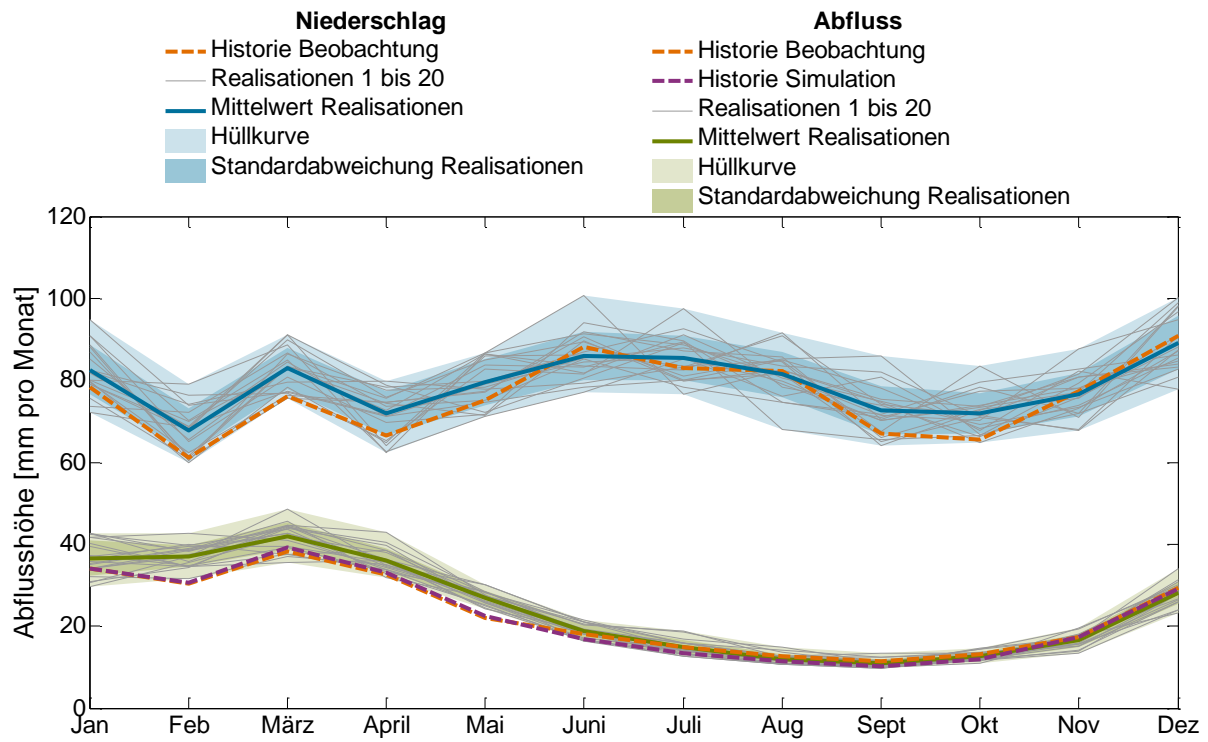
Anhang 13: Im Allereinzugsgebiet berücksichtigte Bauwerke

Bauwerk	Typ	Bauwerk	Typ
VW-Werk	HRB-Seeretention	Aufleitung Aue-Erse-Düker	Verzweigung
Warmenau	HRB-Seeretention	Aufleitung Fuhse-Düker	Verzweigung
Kreuzheide	HRB-Seeretention	Aufleitung Burgdorfer Aue-Düker	Verzweigung
Neuer Teich	HRB-Seeretention	Aufleitung Billerbach-Düker	Verzweigung
Alter Teich	HRB-Seeretention	Niedersickte	Verzweigung
Allersee	HRB-Seeretention	Braunschweig	Verzweigung
Aueteich	HRB-Seeretention	Bühne-Hoppenstedt	Verzweigung
Westhagen I	HRB-Seeretention	Börßum	Verzweigung
Salzteich	HRB-Seeretention	Hornburg	Verzweigung
Fraunteich	HRB-Seeretention	Hehlenriede-Försterkamp	Verzweigung
Krummer Teich	HRB-Seeretention	Hehlenriede-Bahndamm	Verzweigung
Kleiner Schillerteich	HRB-Seeretention	Aller-Allerkanal	Verzweigung
Großer Schillerteich	HRB-Seeretention	Entlaster 1	Verzweigung
Stemmelteich	HRB-Seeretention	Entlaster 2	Verzweigung
Detmeroder Teich	HRB-Seeretention	Aufleitung Hasselbach	Verzweigung
HRB Salzderhelden	HRB-Seeretention	Aufleitung Hehlenriededüker	Verzweigung
HRB Stapelteich	HRB-Seeretention	Aufleitung Viehtriftdüker	Verzweigung
HRB Nette	HRB-Pulsverfahren	Aufleitung Schwarzer Weg	Verzweigung
Innerstetalsperre	Lamellenplan	Aufleitung Westl. Grenzgraben	Verzweigung
Granetalsperre	Lamellenplan	Aufleitung Steekgrabendüker	Verzweigung
Okertalsperre	Lamellenplan	Aufleitung Reislinger Düker	Verzweigung
Eckertalsperre	Lamellenplan	Aufleitung Allerdüker	Verzweigung
Sösetalsperre	Lamellenplan	Ausuferung Kiefholzwiesen	Verzweigung
Odertalsperre	Lamellenplan	Wasserableitung Ecker	Verzweigung
Allerknie	Retentionsraum	Mühlenriede-Elbeseitenkanal	Düker
Hehlenriede 1	Retentionsraum	Allerkanal-Elbeseitenkanal	Düker
Hehlenriede 2	Retentionsraum	Allerdüker	Düker
Hehlenriede 3	Retentionsraum	Steekgraben	Düker
Hehlenriede 4	Retentionsraum	Reislingen	Düker
Aller	Retentionsraum	Hasselbach	Düker
Allerkanal 1	Retentionsraum	Schillerbach	Düker
Allerkanal 2	Retentionsraum	Westlicher Grenzgraben	Düker
Börßum	Retentionsraum	Schwarzer Weg	Düker
Hornburg	Retentionsraum	Weyhäuser Weg	Düker
Hoppenstedt	Retentionsraum	Viehtriftweg	Düker
Hondelage	Retentionsraum	Mühlenriede	Düker
Fuhse Heerte	Retentionsraum	Hehlenriede-Mittellandkanal	Düker
Fuhse Peine	Retentionsraum	Hehlenriede-Elbeseitenkanal	Düker
Fuhse Lengede	Retentionsraum		

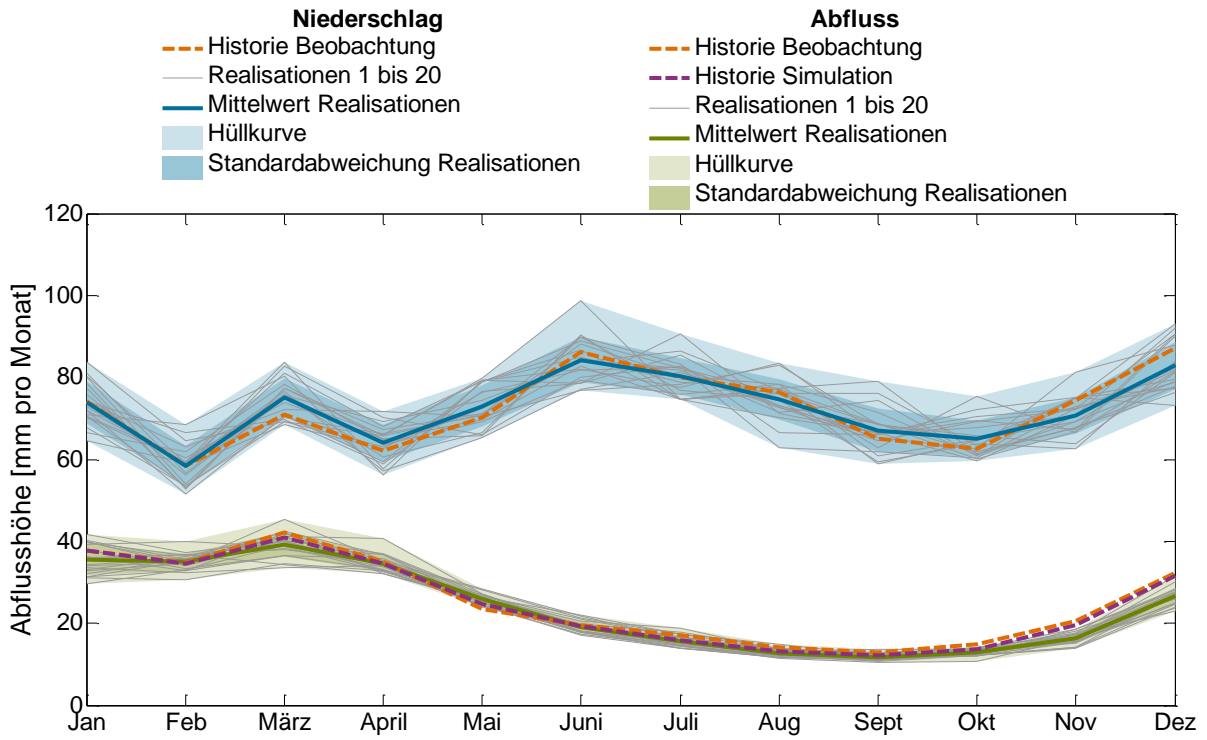
Anhang 14: Kategorisierung der WETTREG2006-Realisationen nach der Eigenschaft „nass“, „mittel“, „trocken“ anhand der Abweichungen des mittleren Abflusses bzw. der Hochwasser-Quantile vom Mittel über alle Realisationen.

Realisation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Abweichung MQ vom Mittel aller Realisationen [%]	-4,0	-0,2	-0,9	2,4	-1,2	2,4	-1,1	1,3	-0,7	-4,2
Abweichung der HW-Quantile vom Mittel aller Realisationen [%]	-7,3	9,0	-1,4	5,6	0,1	-1,5	0,3	6,3	-4,4	-5,3
Kategorisierung der Eigenschaft der Realisation	trocken	mittel	mittel	nass	mittel	nass	mittel	mittel	mittel	trocken
Realisation	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Abweichung MQ vom Mittel aller Realisationen [%]	-3,9	-2,1	-3,3	3,1	5,1	4,9	3,9	4,2	-5,4	-0,4
Abweichung der HW-Quantile vom Mittel aller Realisationen [%]	-9,3	1,5	-11,7	6,7	-1,3	3,5	4,3	4,1	-5,6	6,4
Kategorisierung der Eigenschaft der Realisation	trocken	trocken	trocken	nass	nass	nass	nass	nass	trocken	mittel

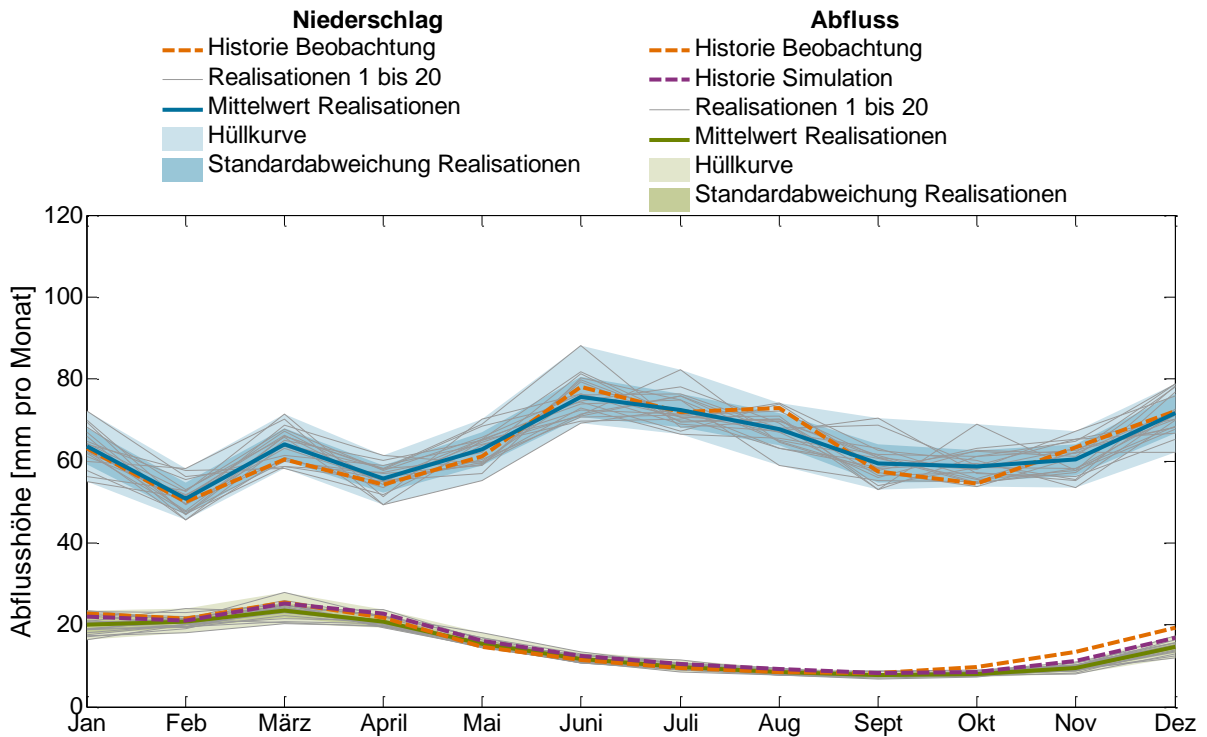
Anhang 15: Mittlere Monatsmittel der Niederschlags- und Abflusshöhe auf Basis von 20 WETTREG-Realisationen für die Referenzpegel (20C). Die Niederschläge wurden zunächst um systematische Abweichungen korrigiert.



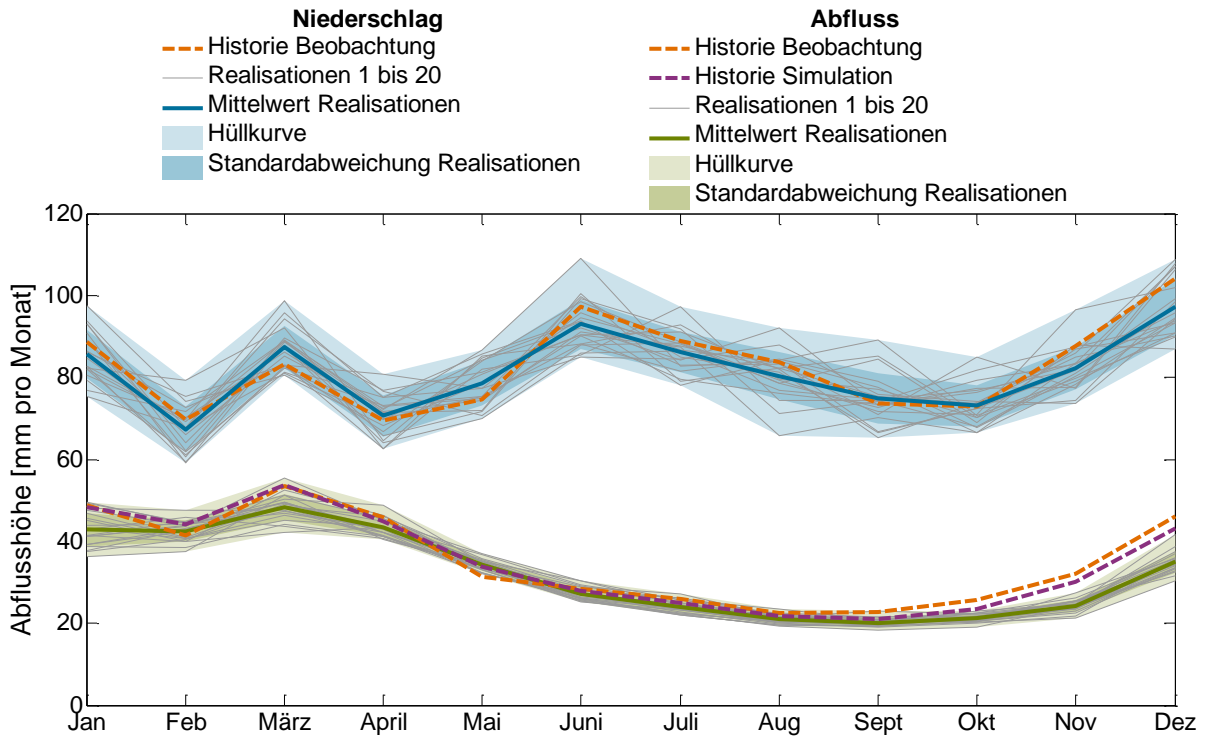
Heinde



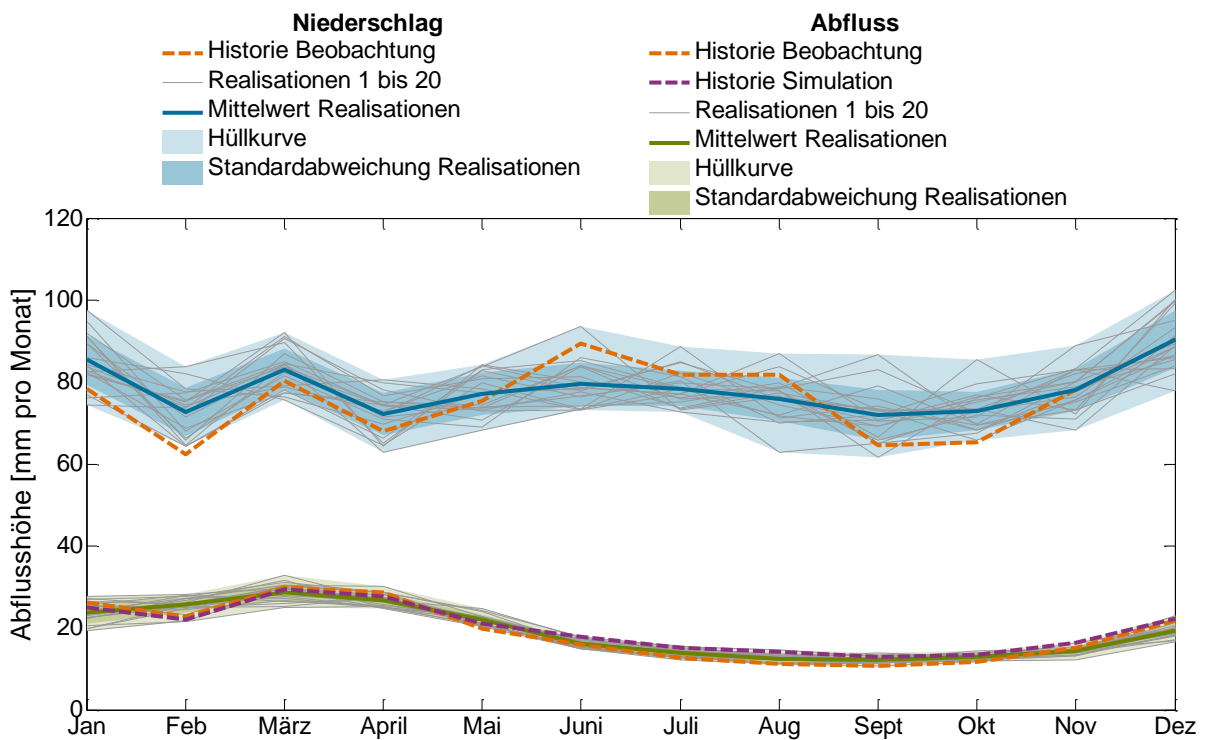
Herrenhausen



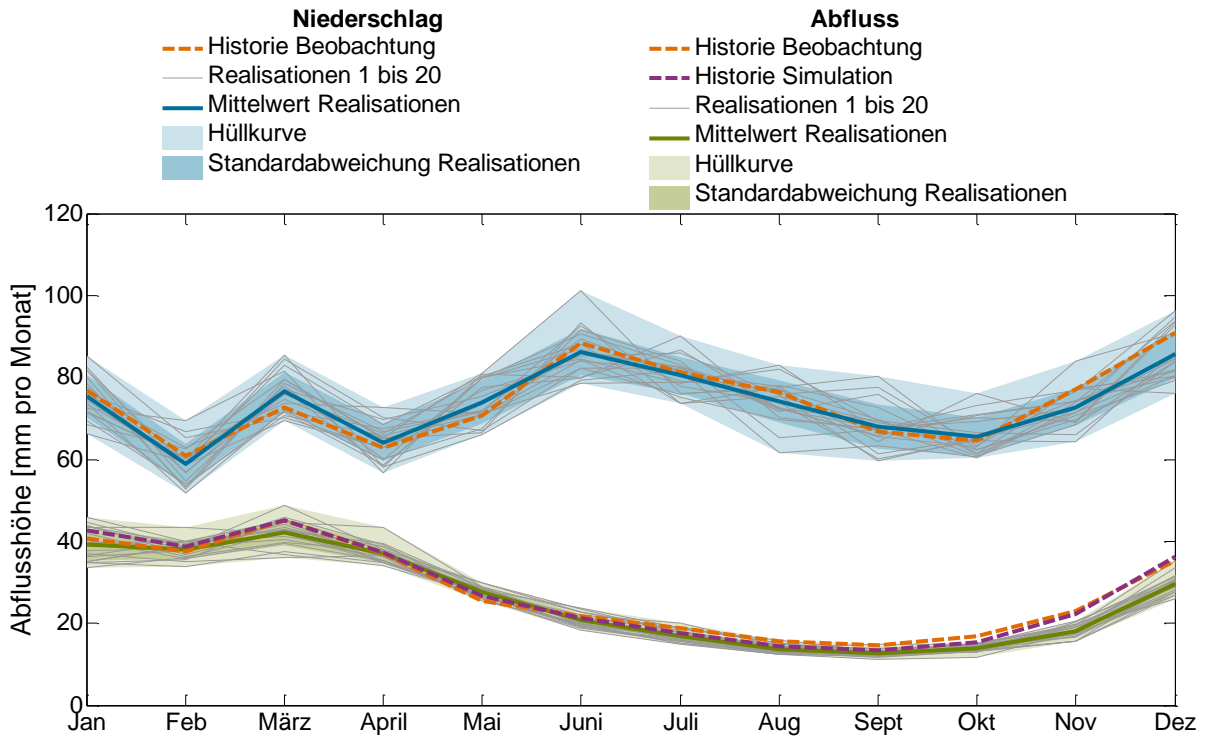
Marklendorf



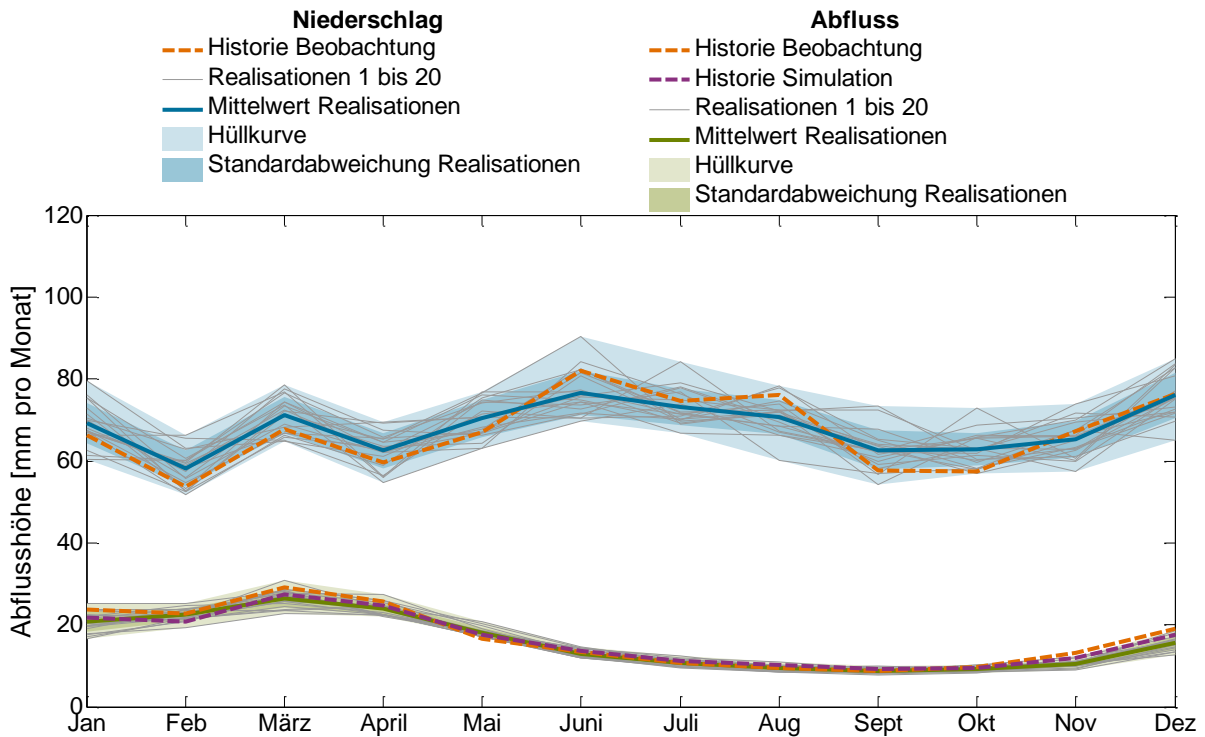
Northeim



Ohrum

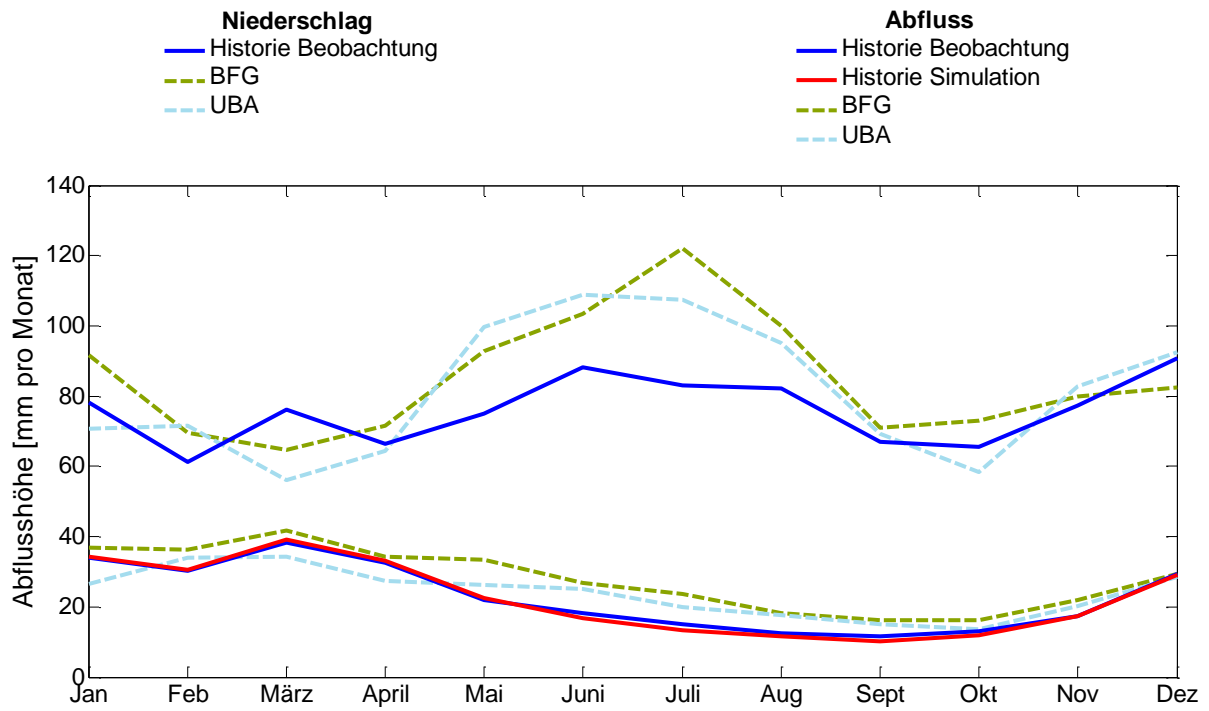


Poppenburg

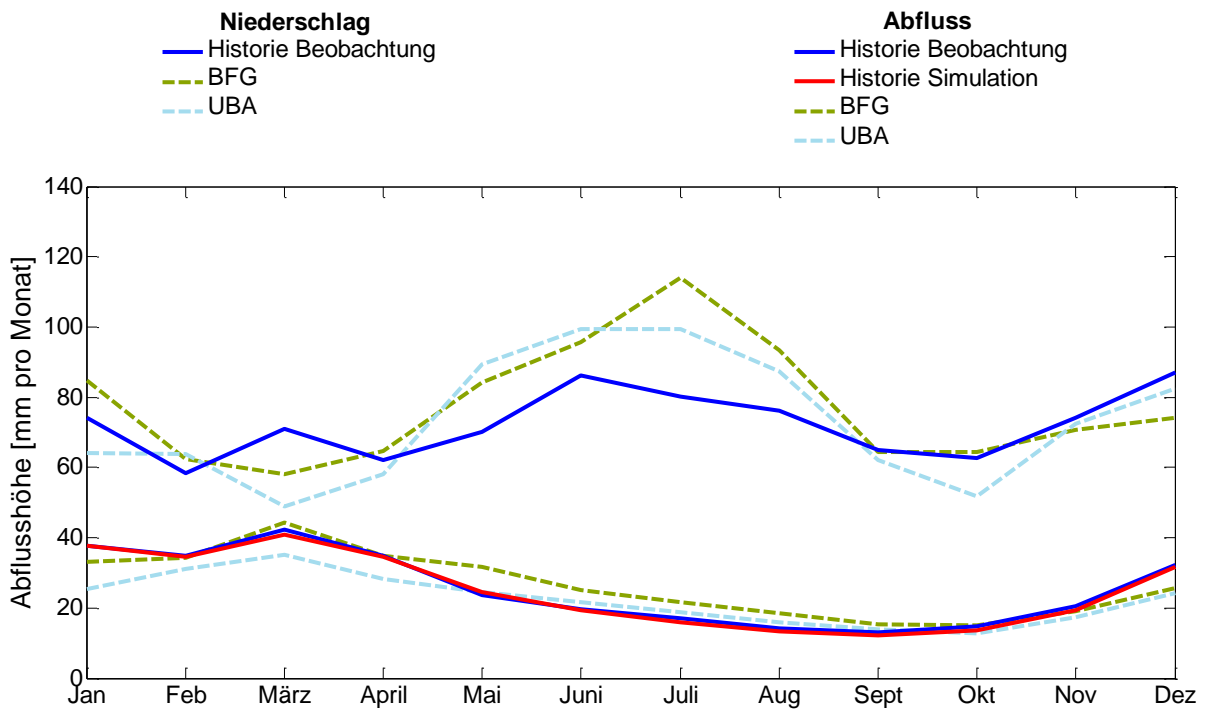


Groß Schwülper

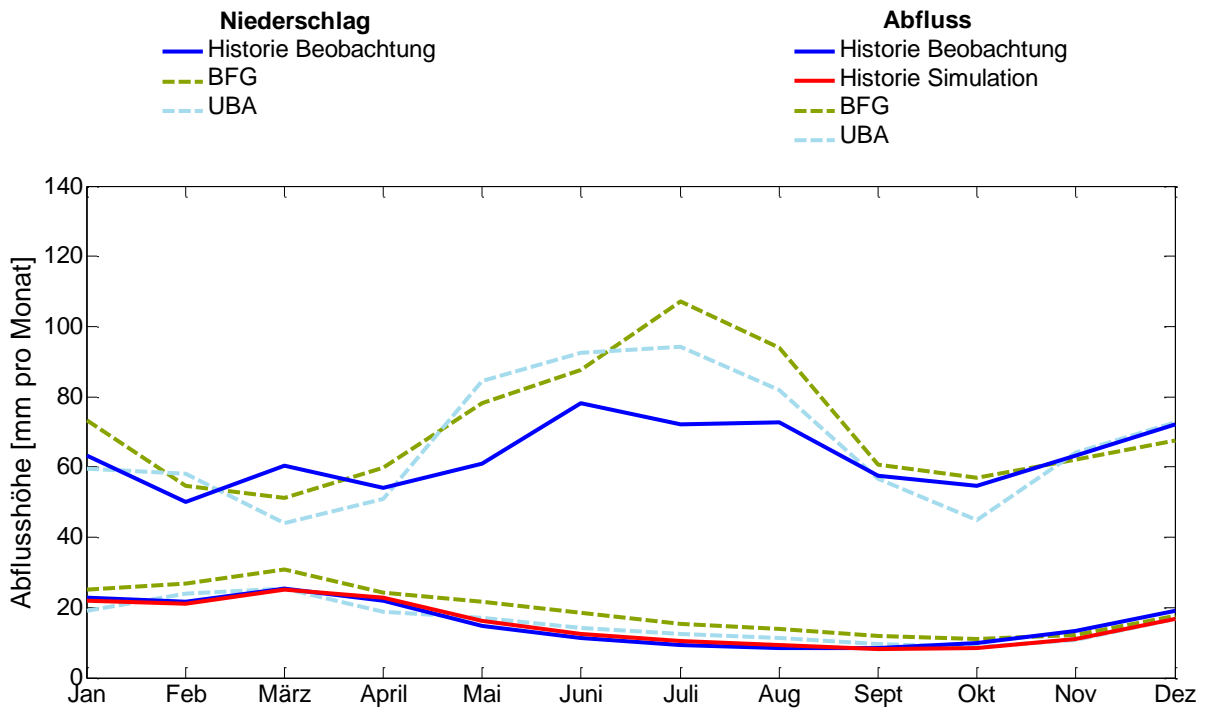
Anhang 16: Mittlere Monatsmittel der Niederschlags- und Abflusshöhe auf Basis der Läufe REMO-UBA und REMO BfG für die Referenzpegel (20C). Die Niederschläge wurden zunächst um systematische Abweichungen korrigiert.



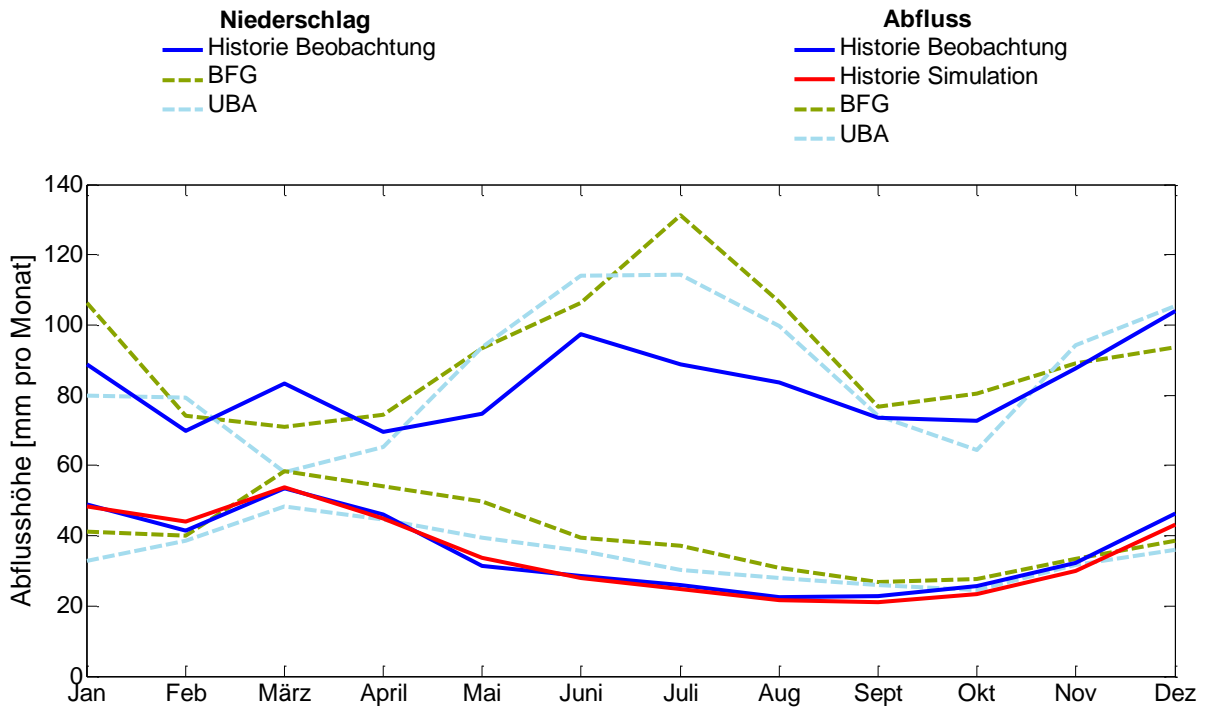
Heinde



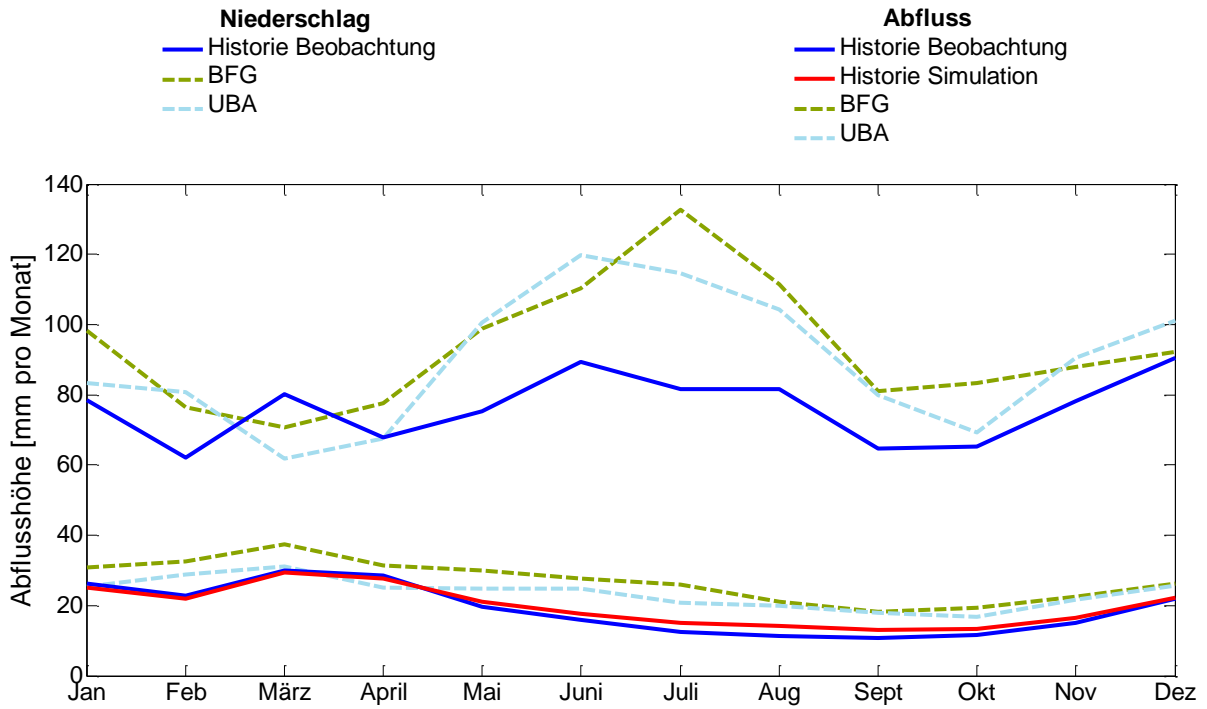
Herrenhausen



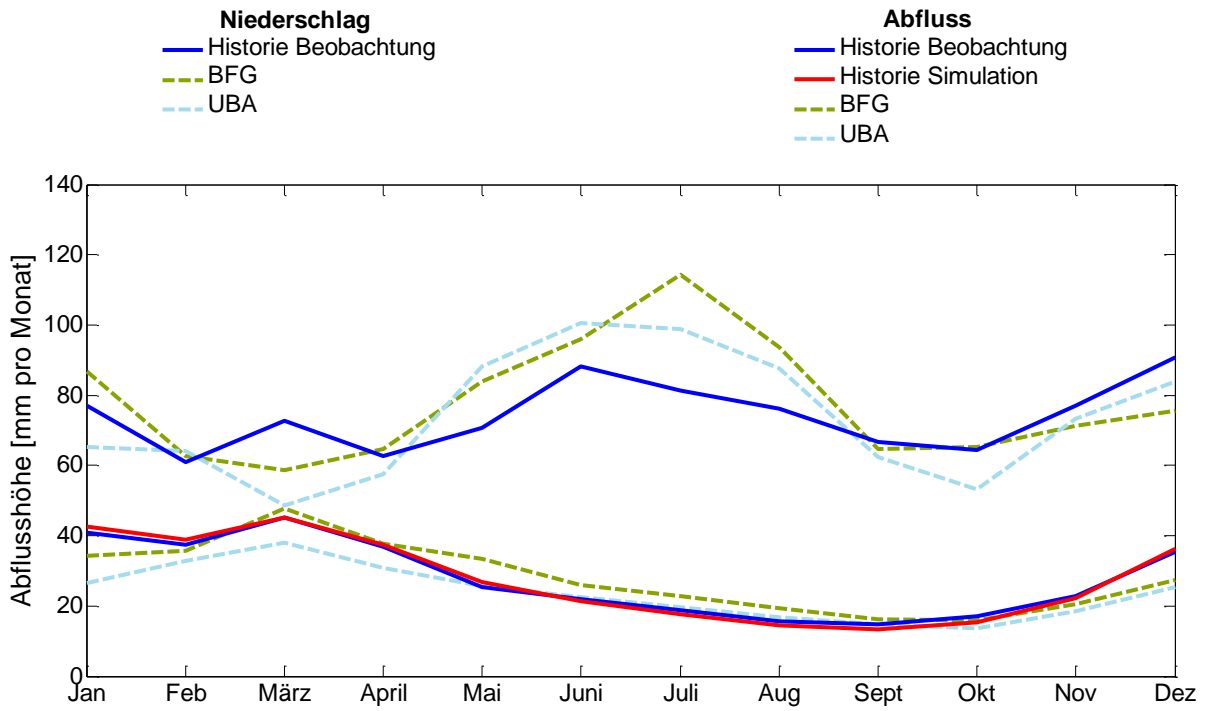
Marklendorf



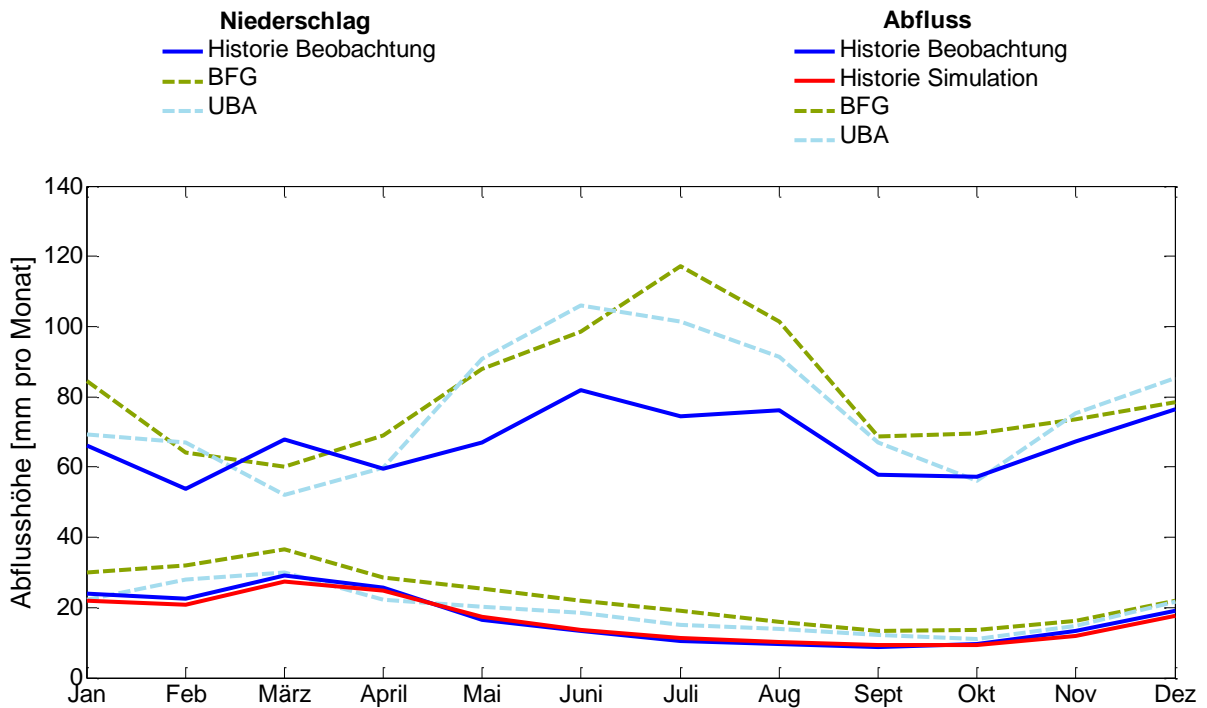
Northeim



Ohrum



Poppenburg

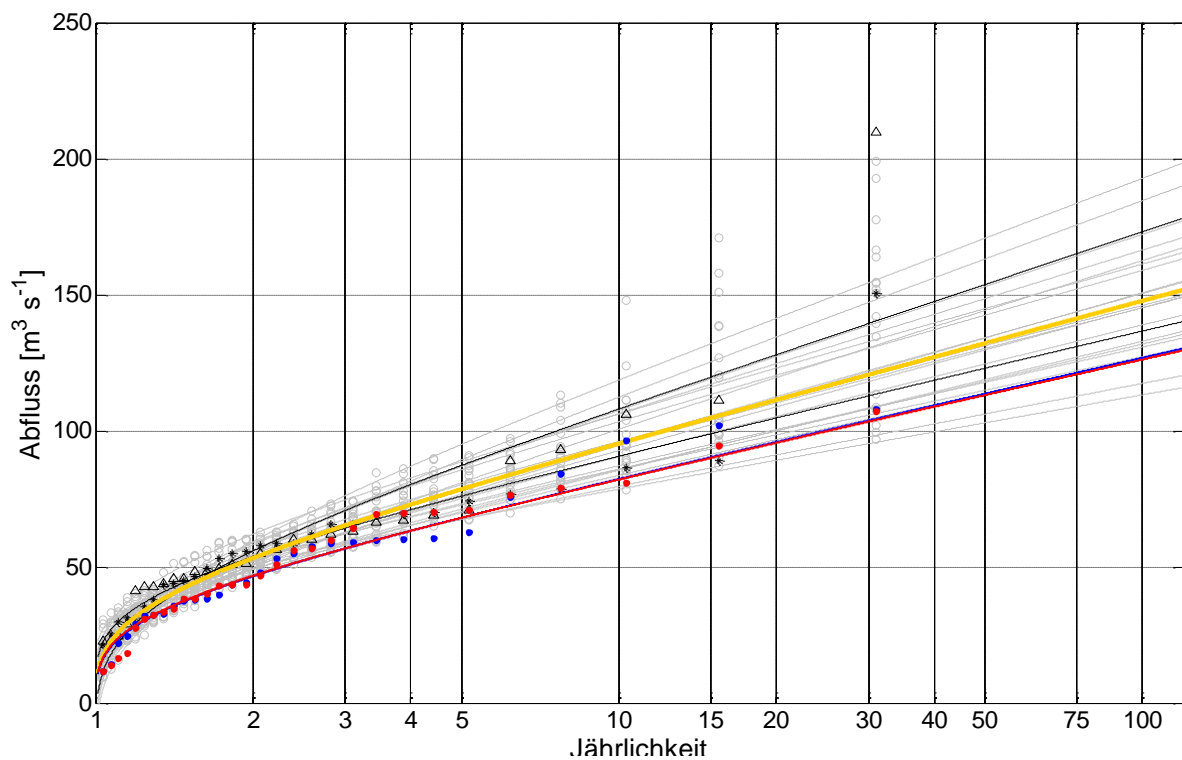
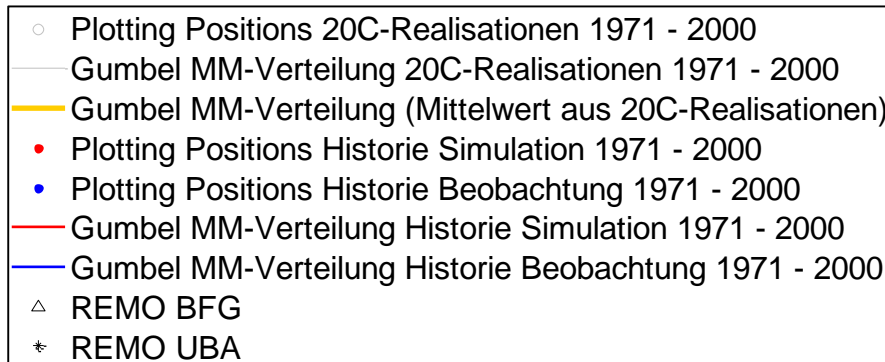


Groß Schwülper

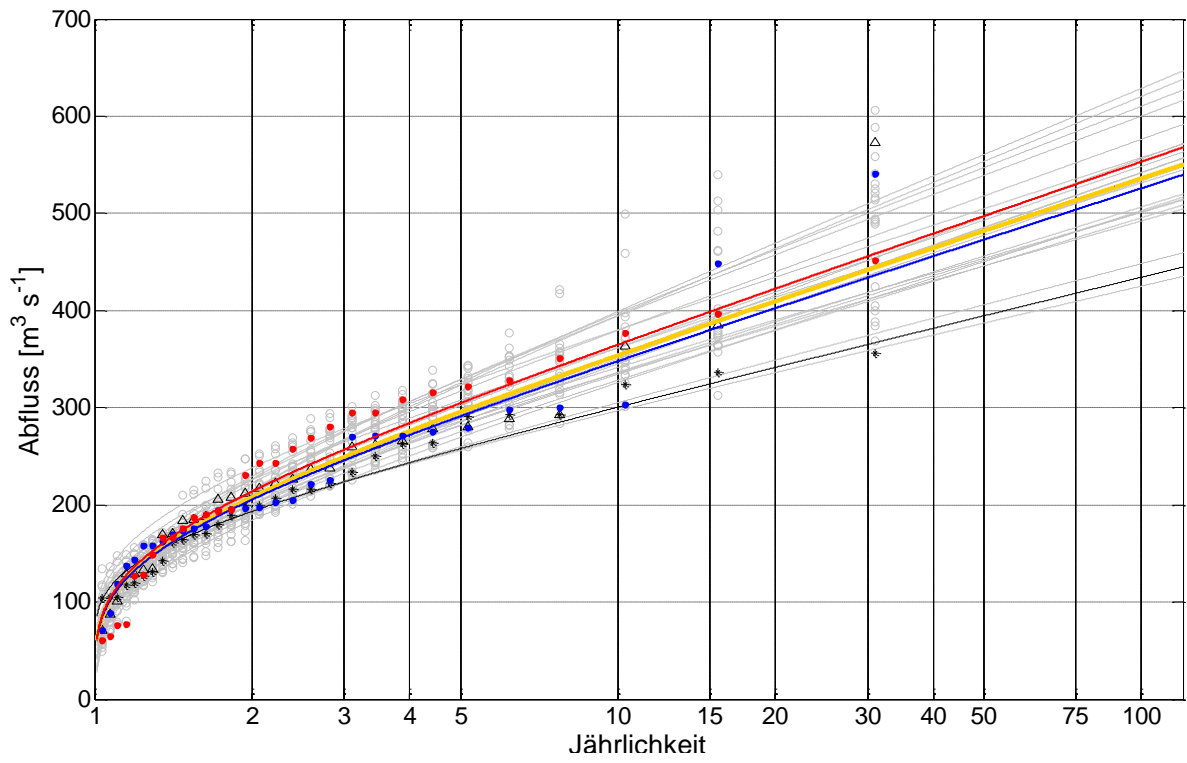
Anhang 17: Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesmittelwertes des Abflusses für die Referenzpegel in m³ s⁻¹.

Pegel	Beobachtung 1971-2000	WETTREG			REMO BfG			REMO UBA		
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100
Gr. Schwülper	57	60	66	73	81	83	81	78	82	92
Heinde	51	58	64	66	62	64	64	58	63	71
Herrnhausen	221	224	253	284	223	257	243	205	224	249
Markendorf	152	178	191	223	204	222	194	195	200	214
Northeim	90	67	77	89	84	98	102	86	92	107
Ohrum	29	32	37	41	44	50	50	43	53	59
Poppenburg	169	159	179	206	165	183	174	148	156	182
Rethem	396	446	504	575	470	522	475	441	464	508

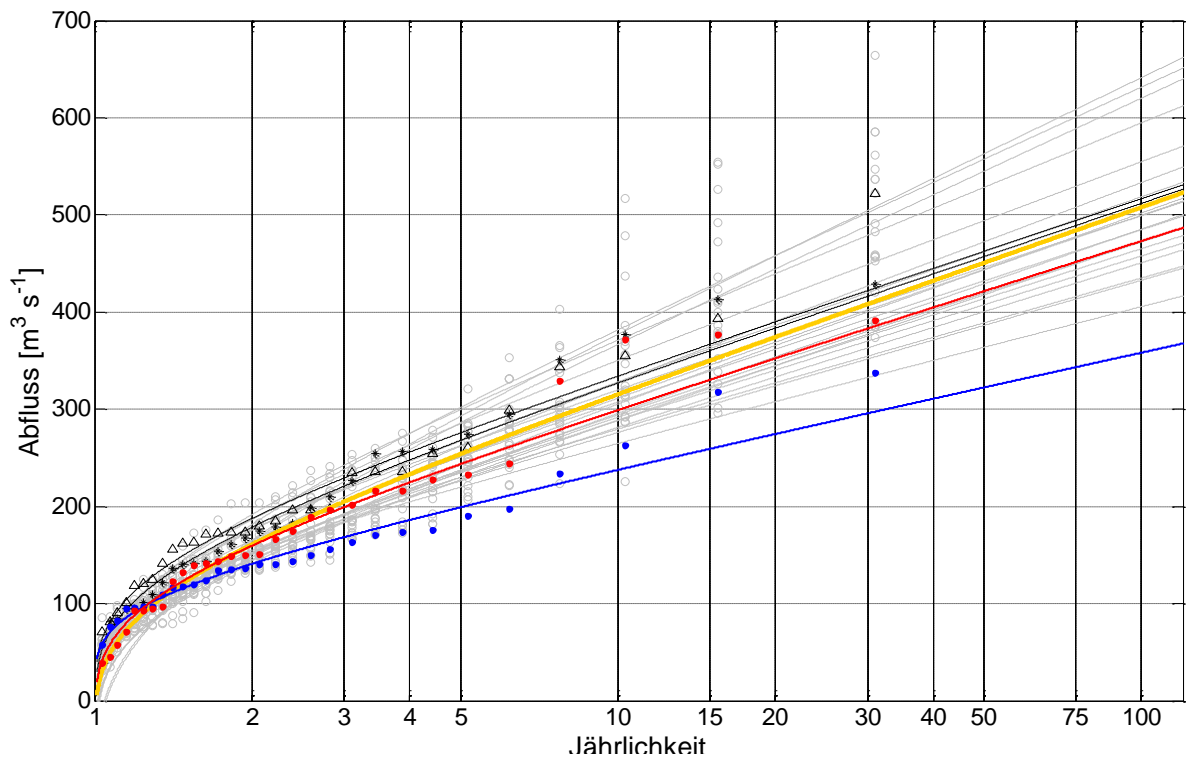
Anhang 18: Hochwasserwahrscheinlichkeiten für die Referenzpegel, ermittelt mit Hilfe der Gumbel-Verteilung.



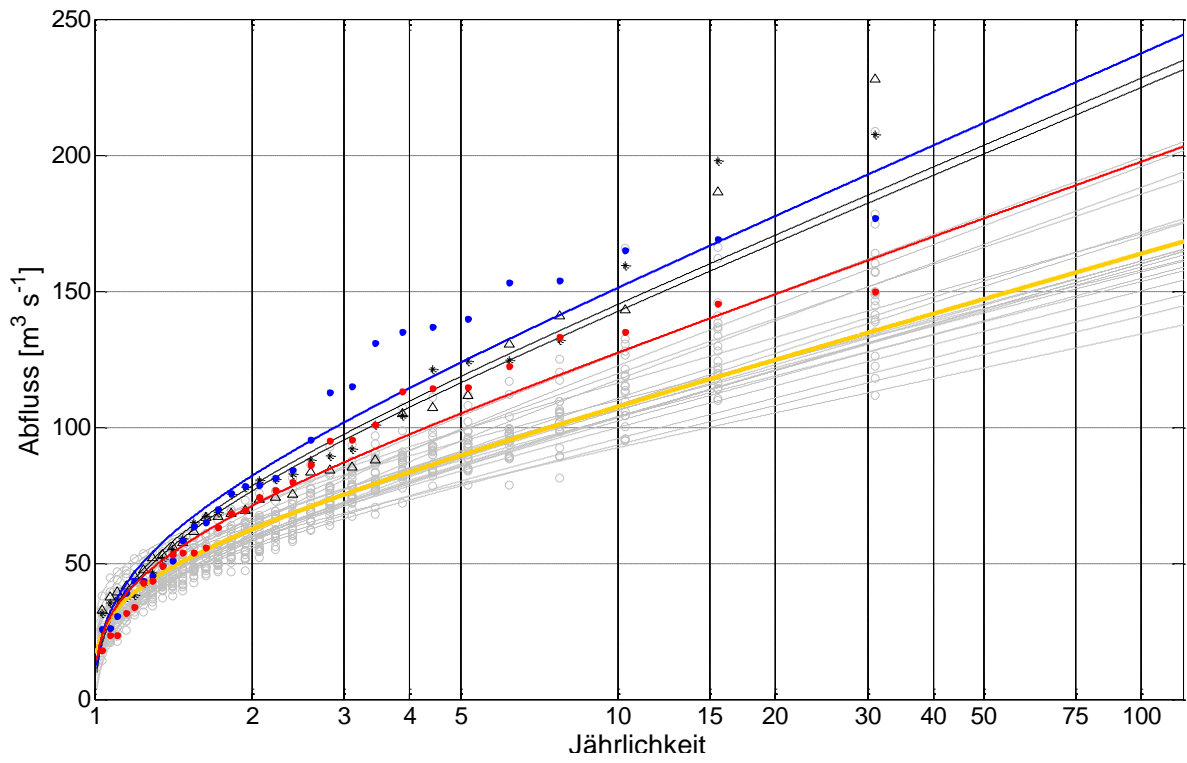
Heinde



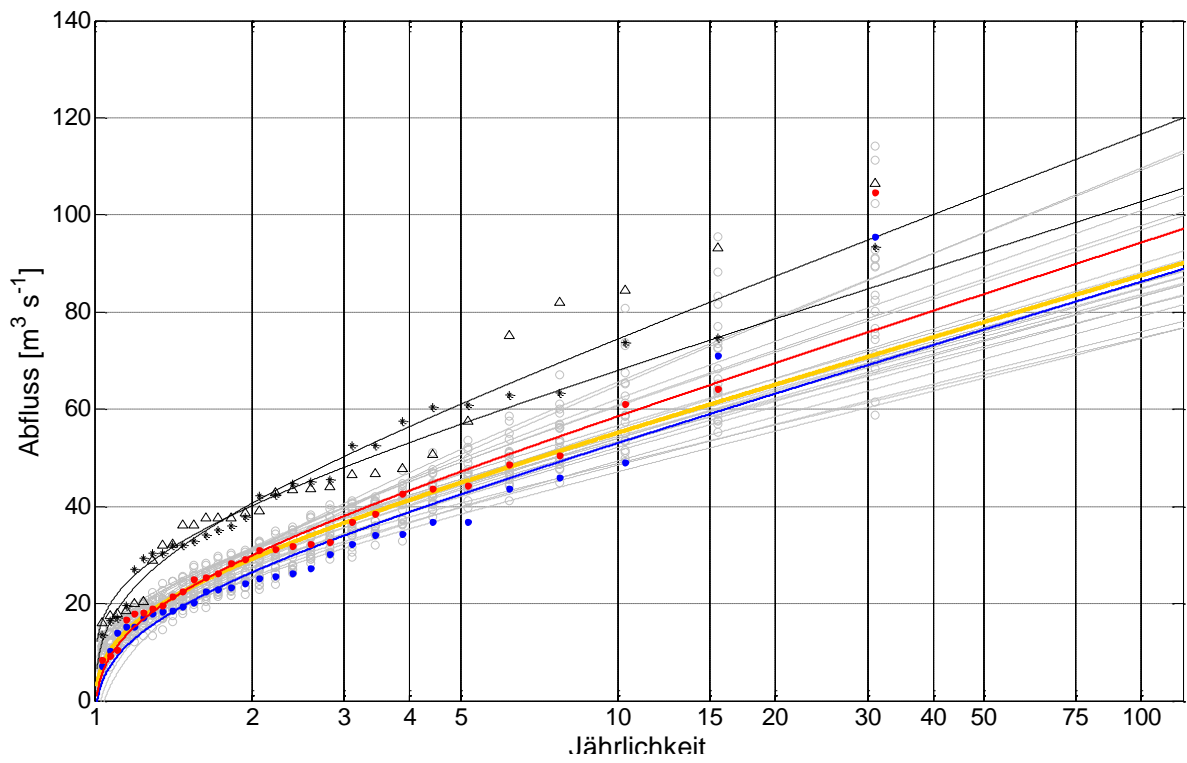
Herrenhausen



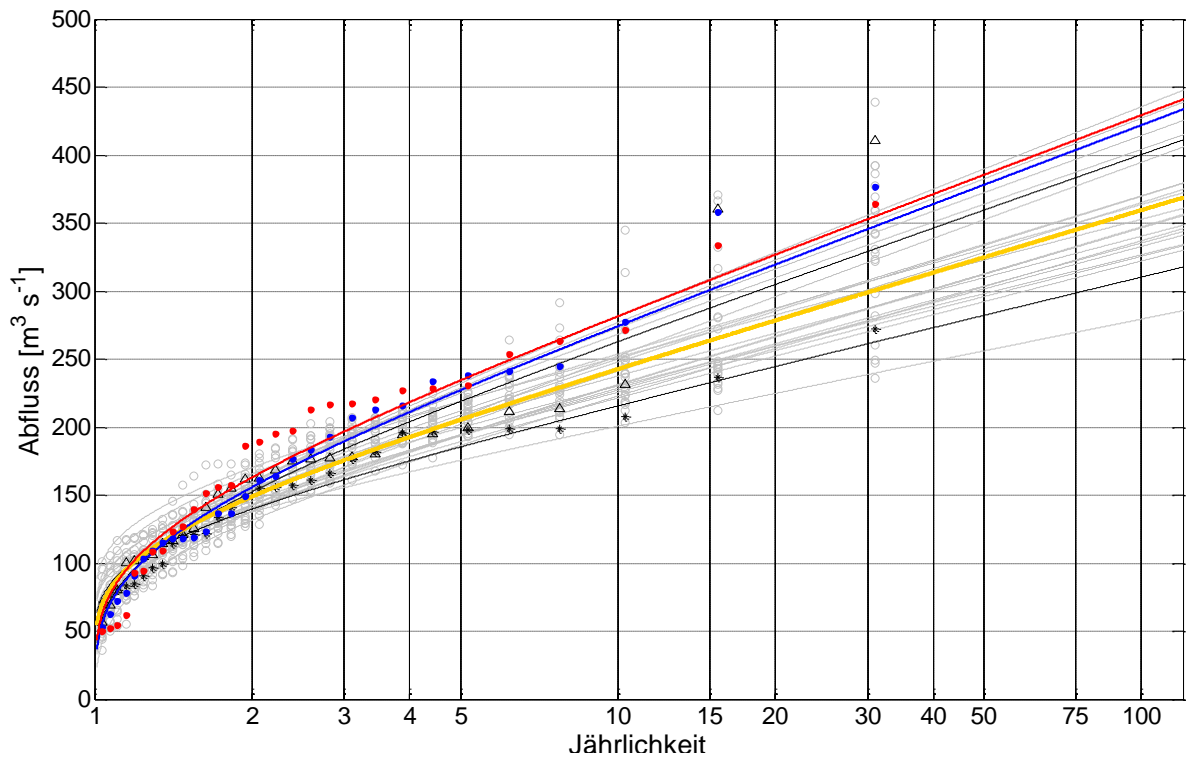
Marklendorf



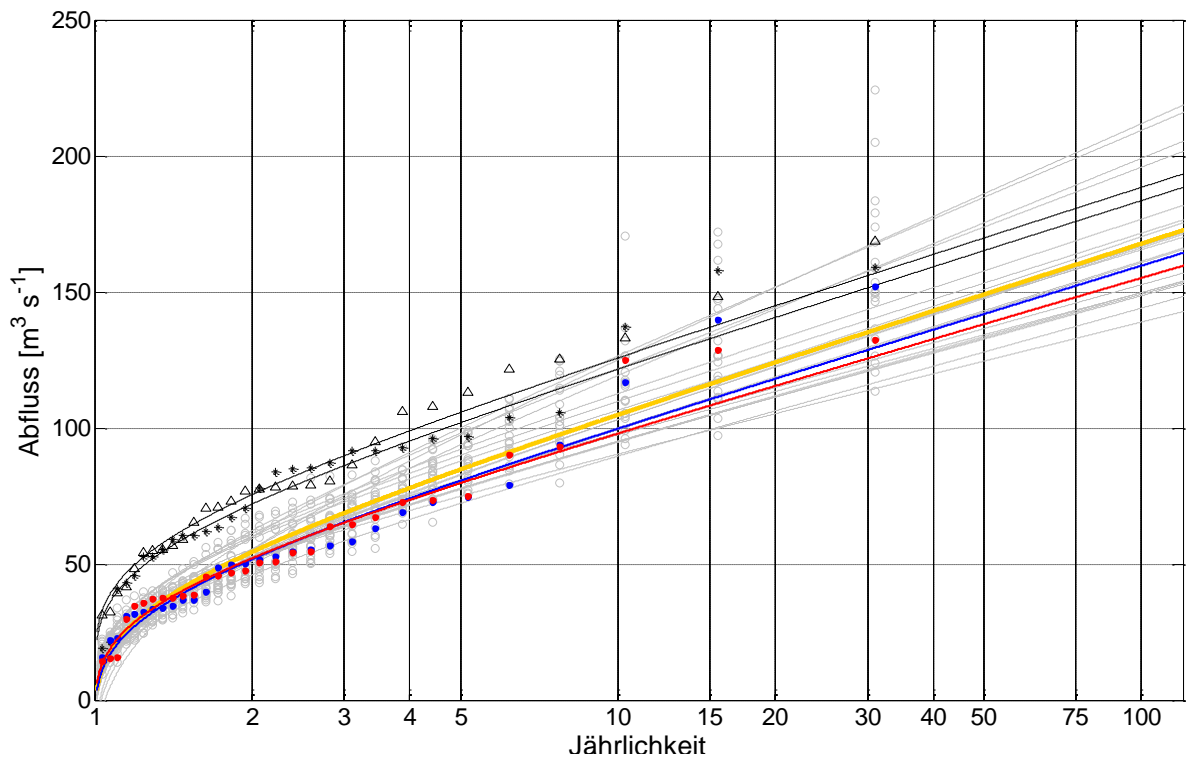
Northeim



Ohrum

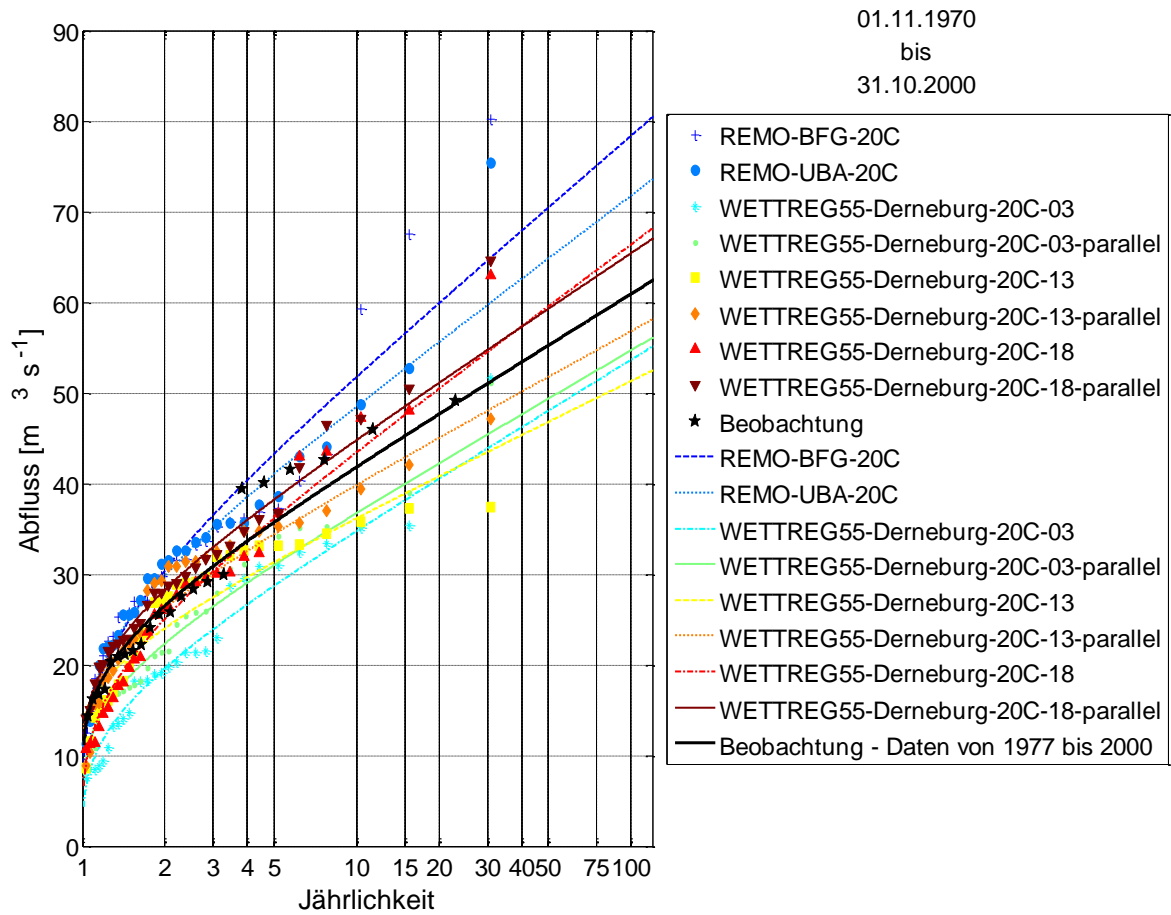


Poppenburg

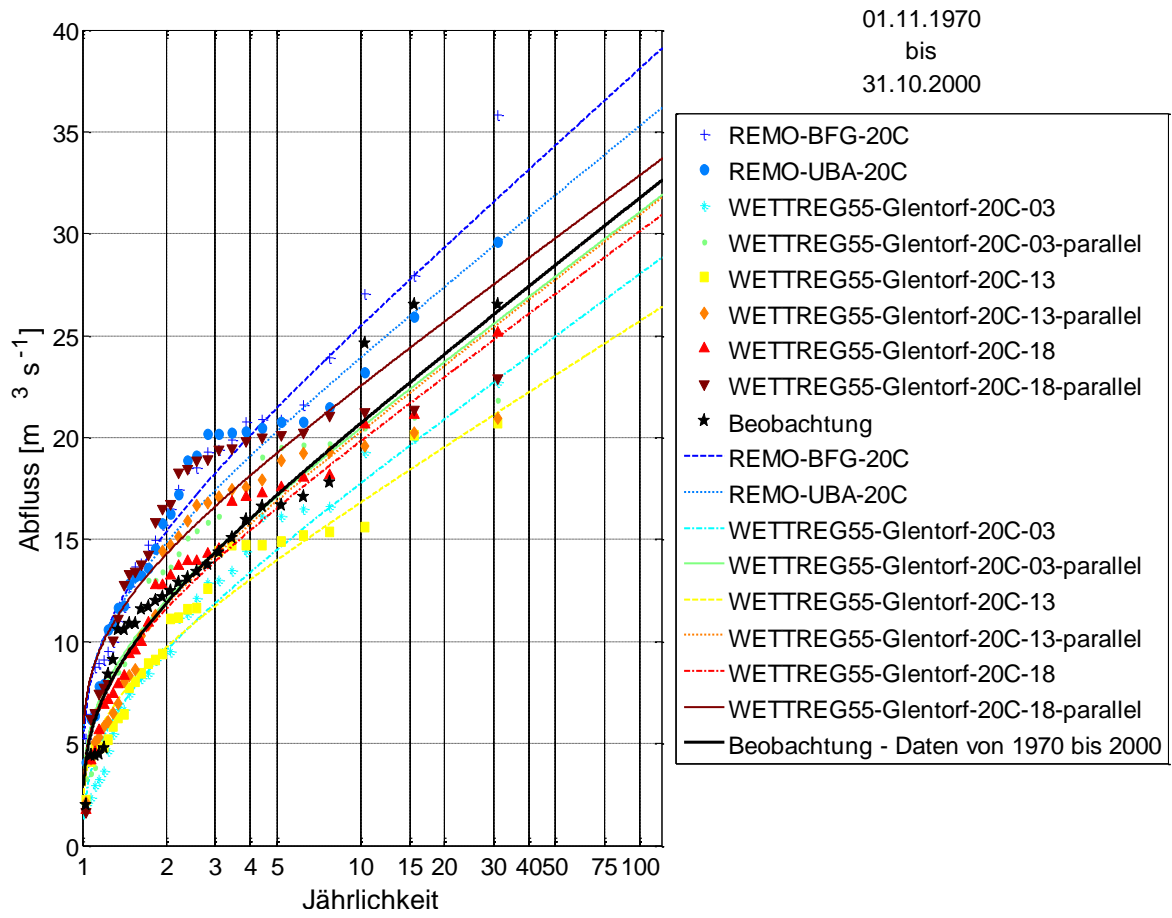


Groß Schwülper

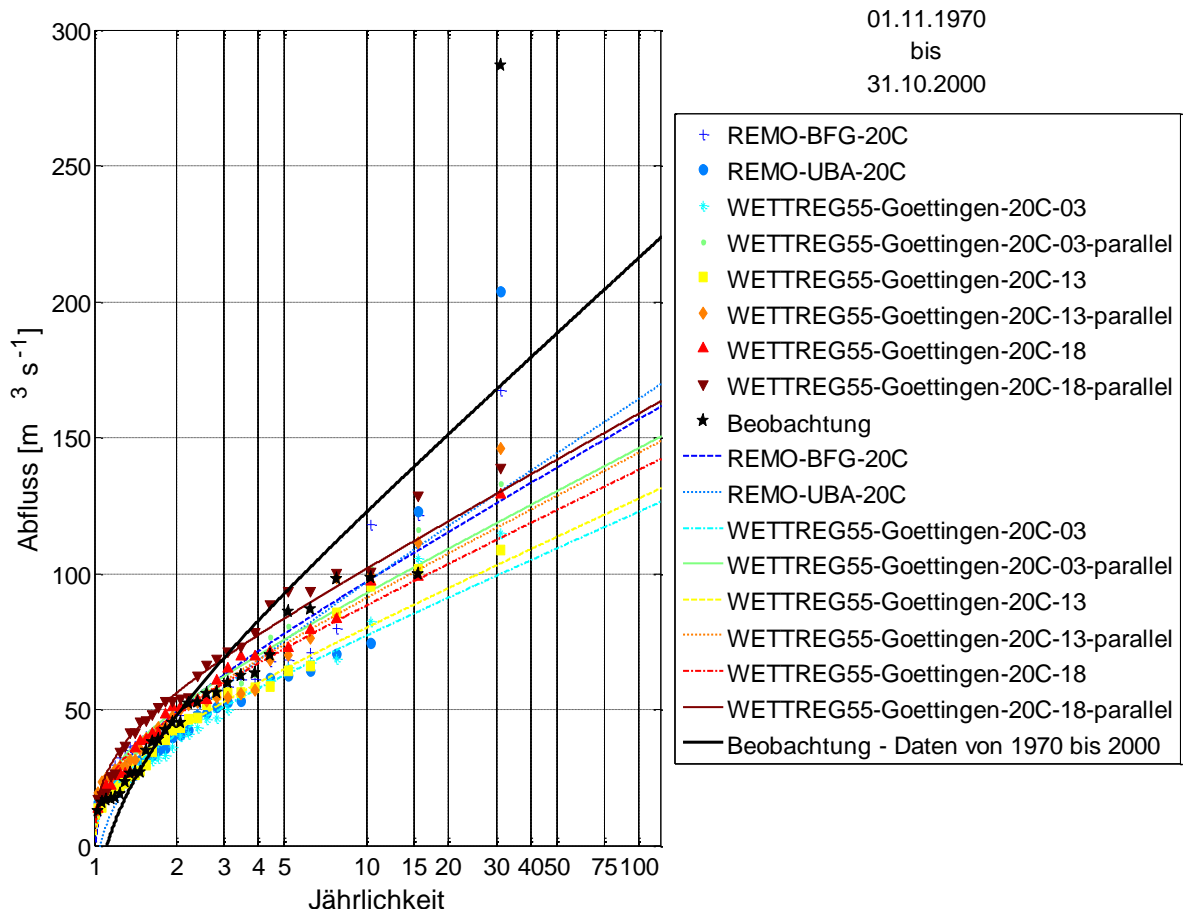
Anhang 19: Hochwasserwahrscheinlichkeiten für die Pegel der Detailgebiete mit REMO-Stundenniederschlägen und disaggregierten WETTREG-Niederschlägen, ermittelt mit Hilfe der Gumbel-Verteilung.



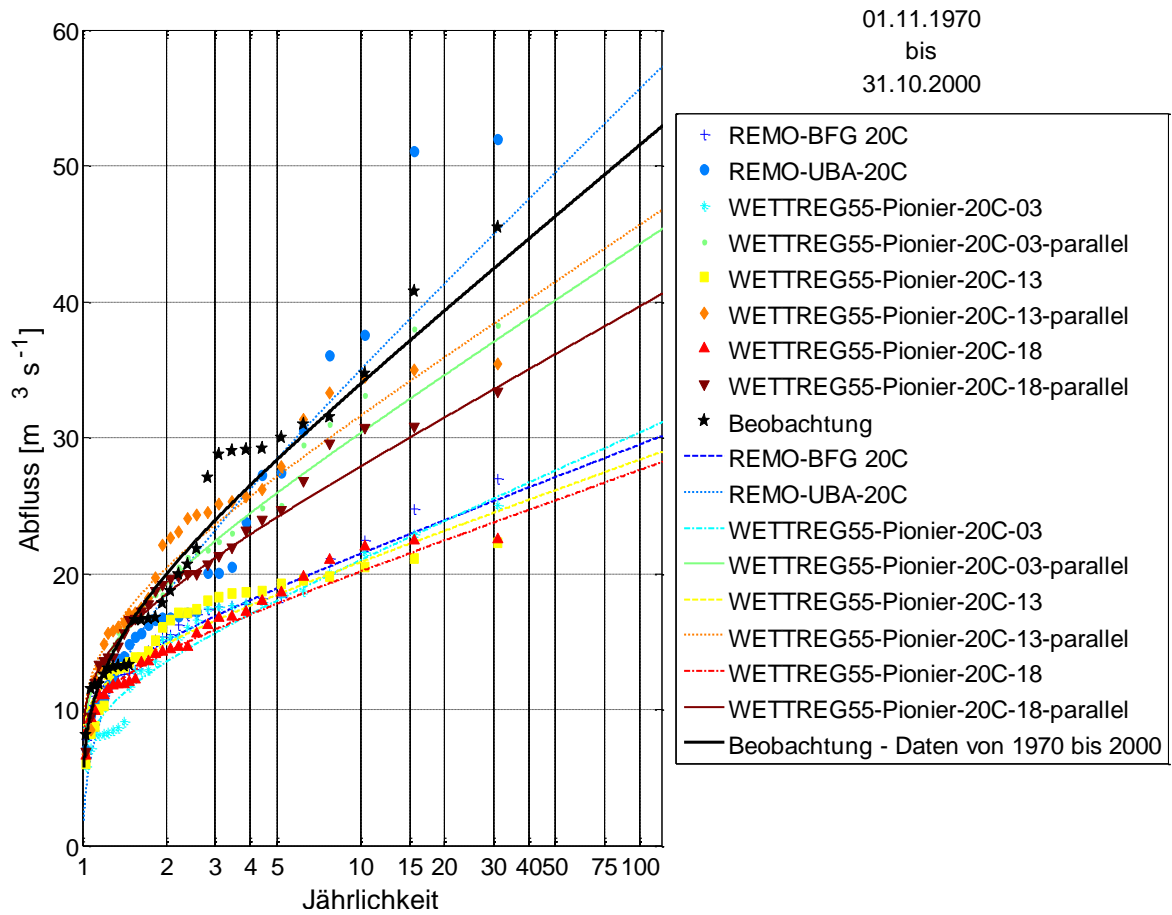
Derneburg



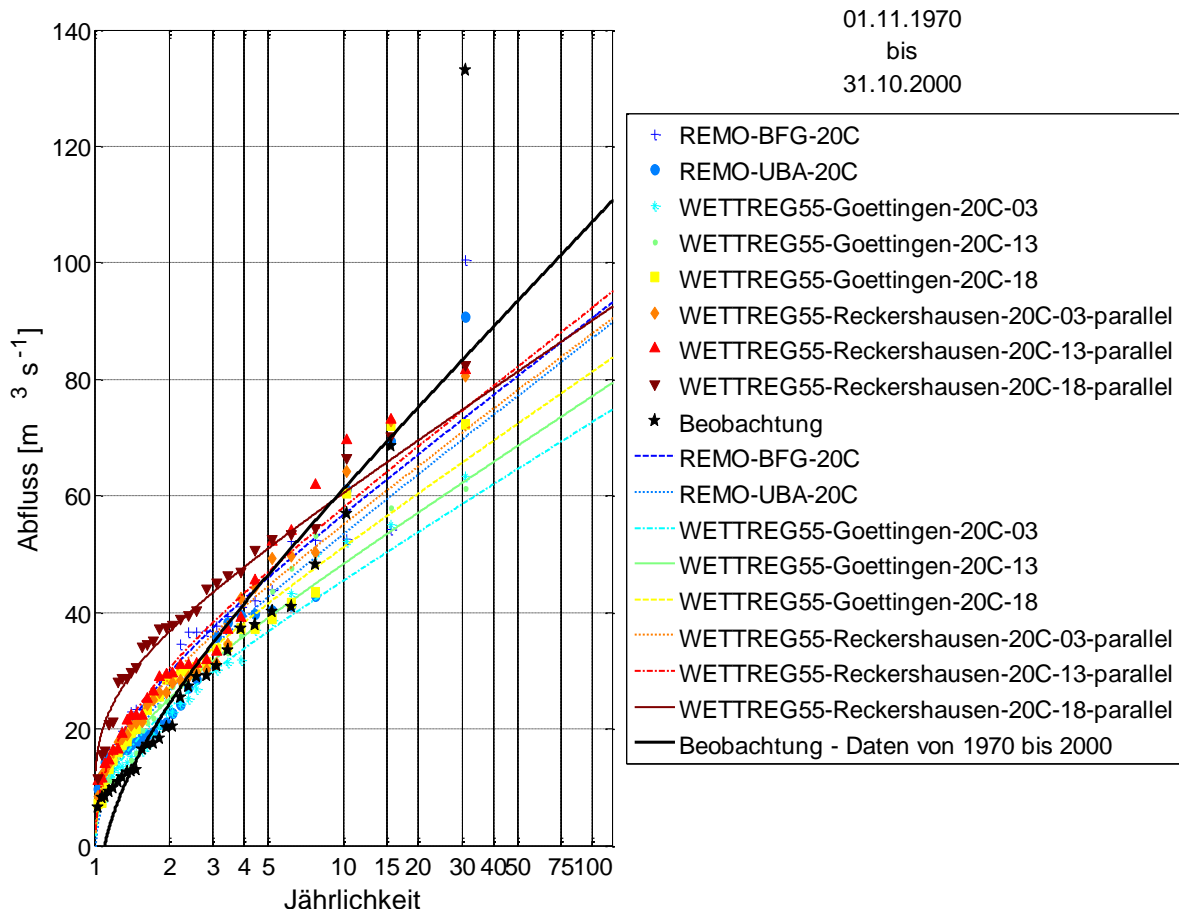
Glentorf



Göttingen

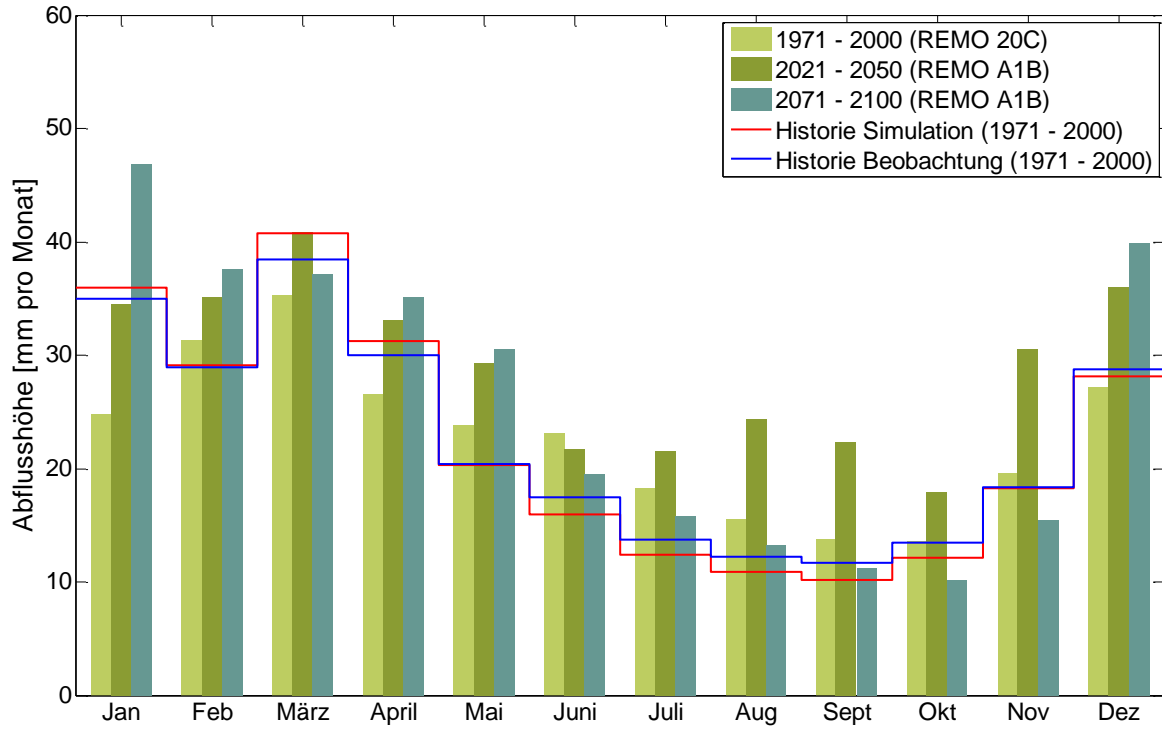


Pionierbrücke

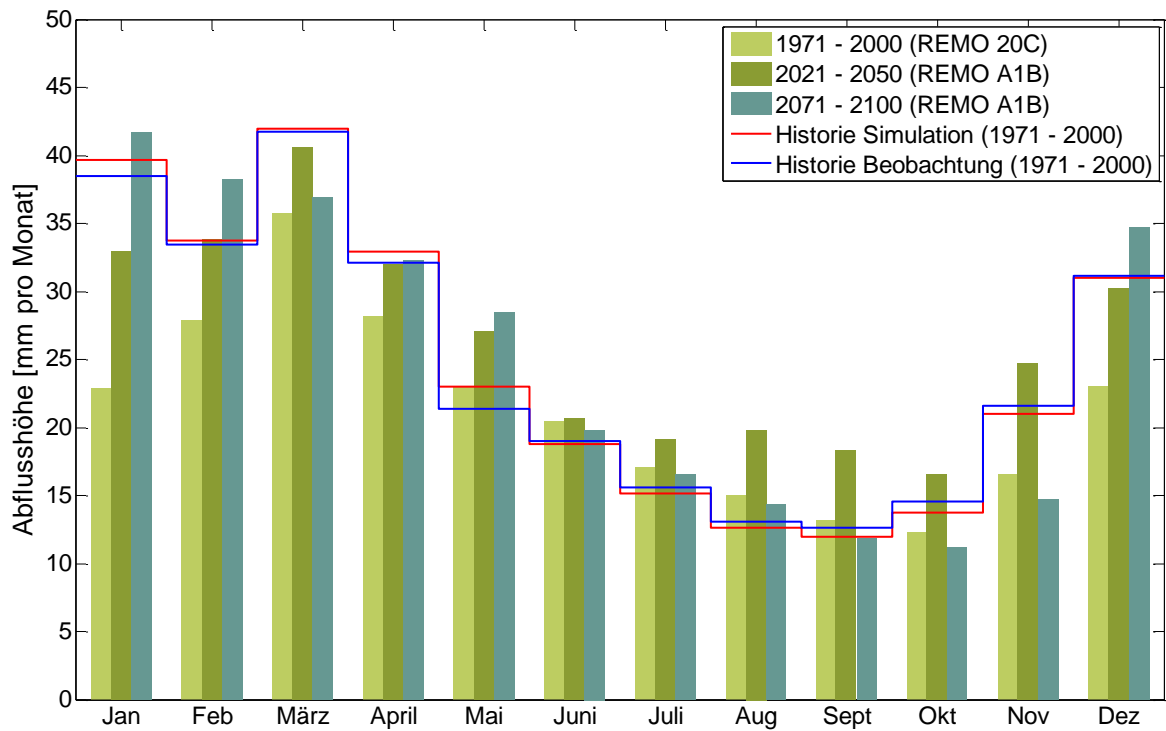


Reckershausen (Parallel-Kaskade für Stationen im Einzugsgebiet der Leine bis Reckershausen, nicht-parallelisierte Disaggregationen wie bei den Simulationen für Göttingen)

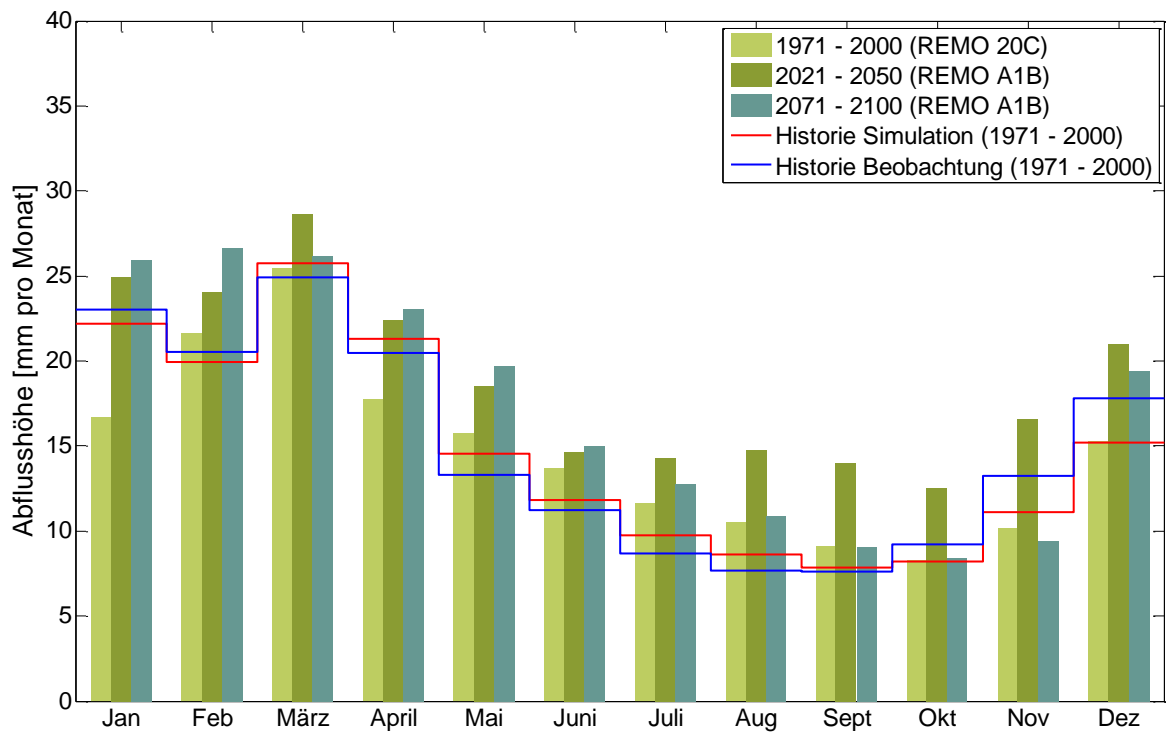
Anhang 20: Mittlere monatliche Abflusshöhen aus REMO-UBA für drei Zeiträume.



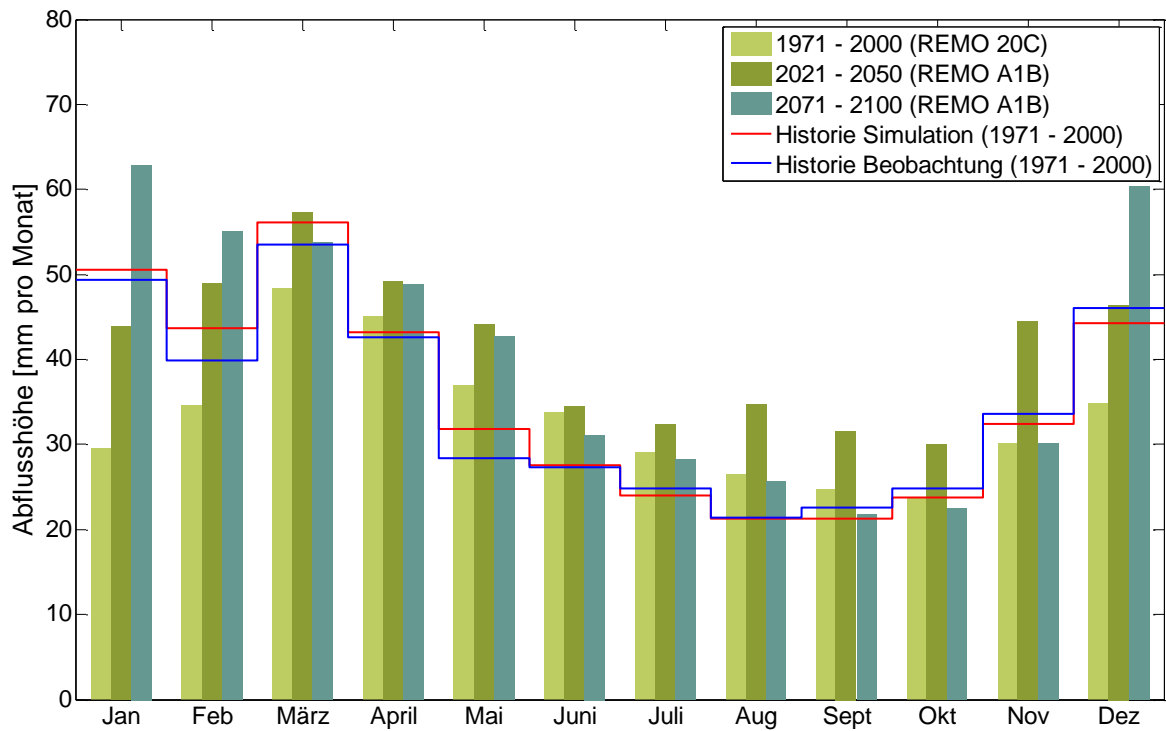
Heinde



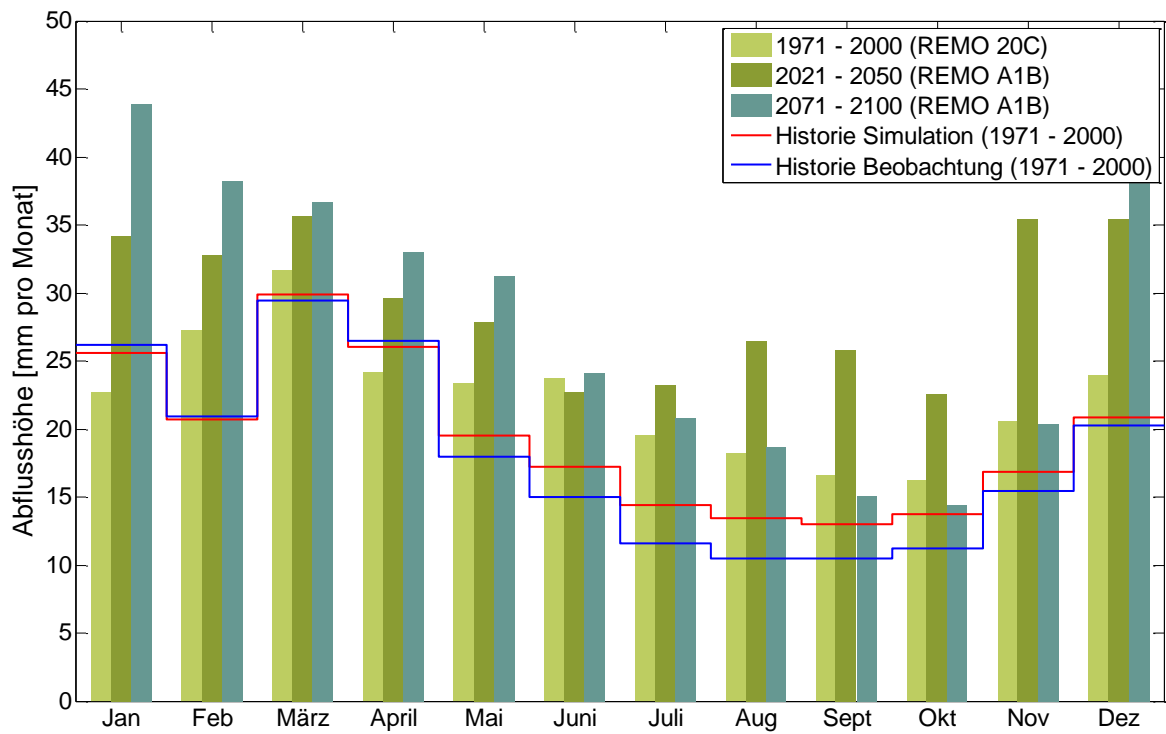
Herrenhausen



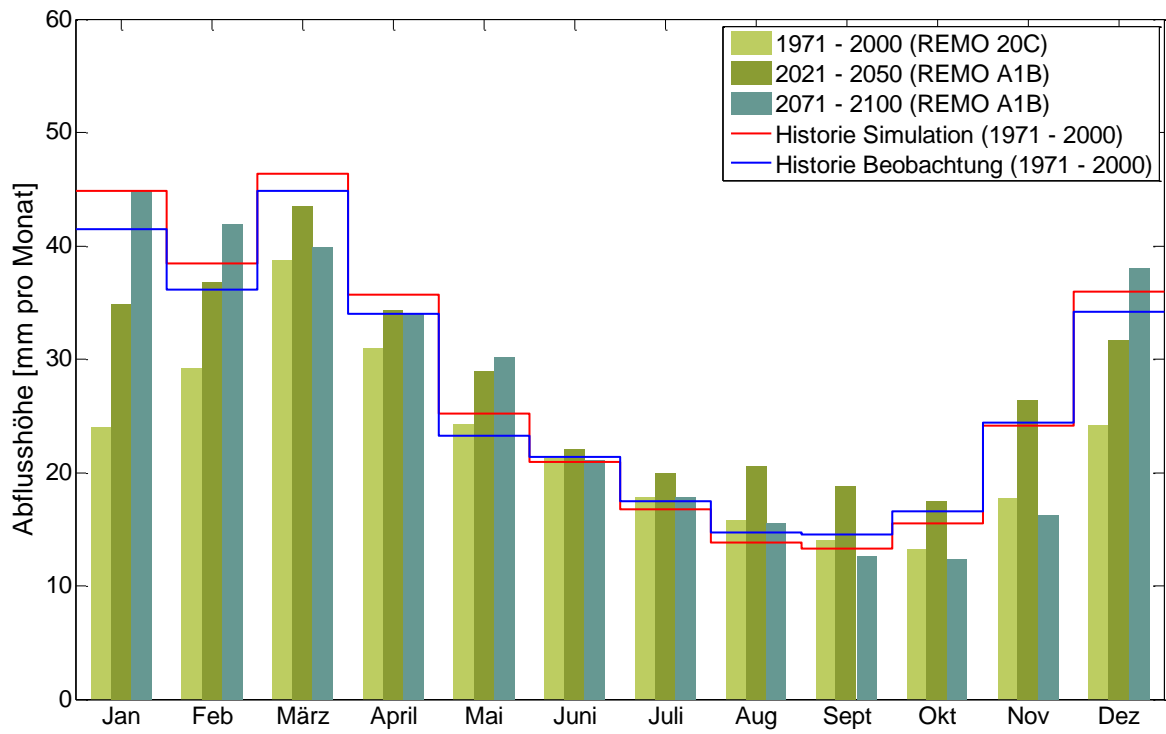
Marklendorf



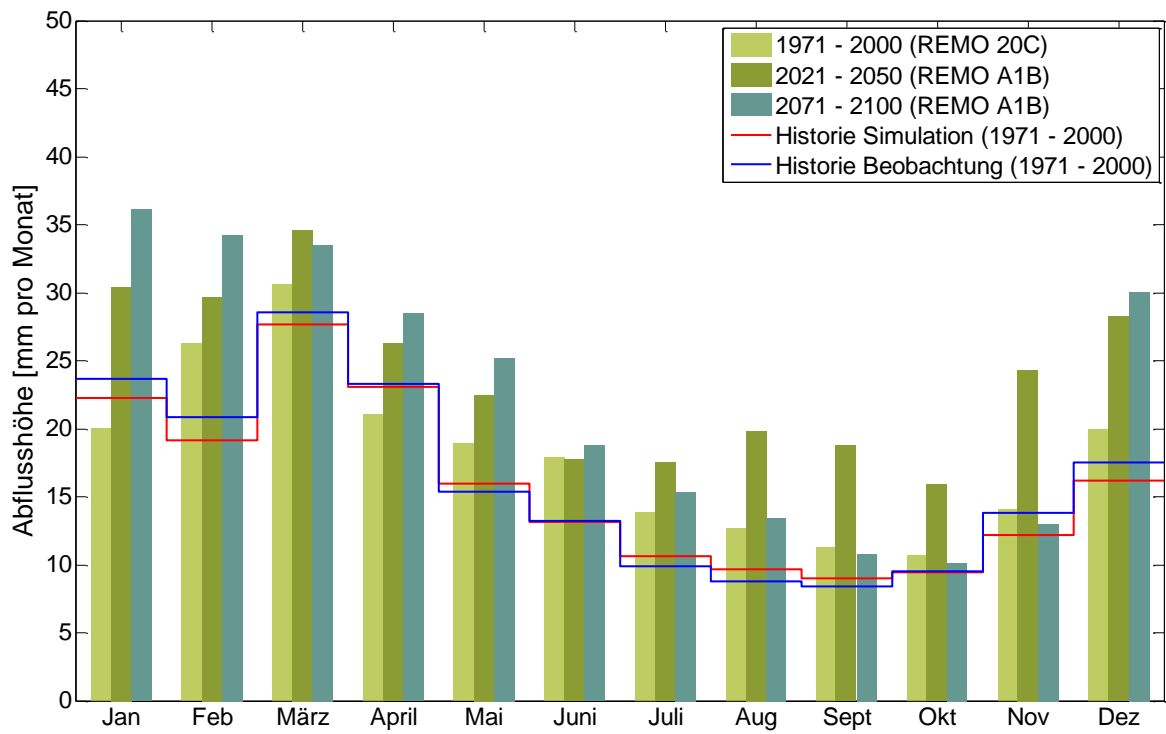
Northeim



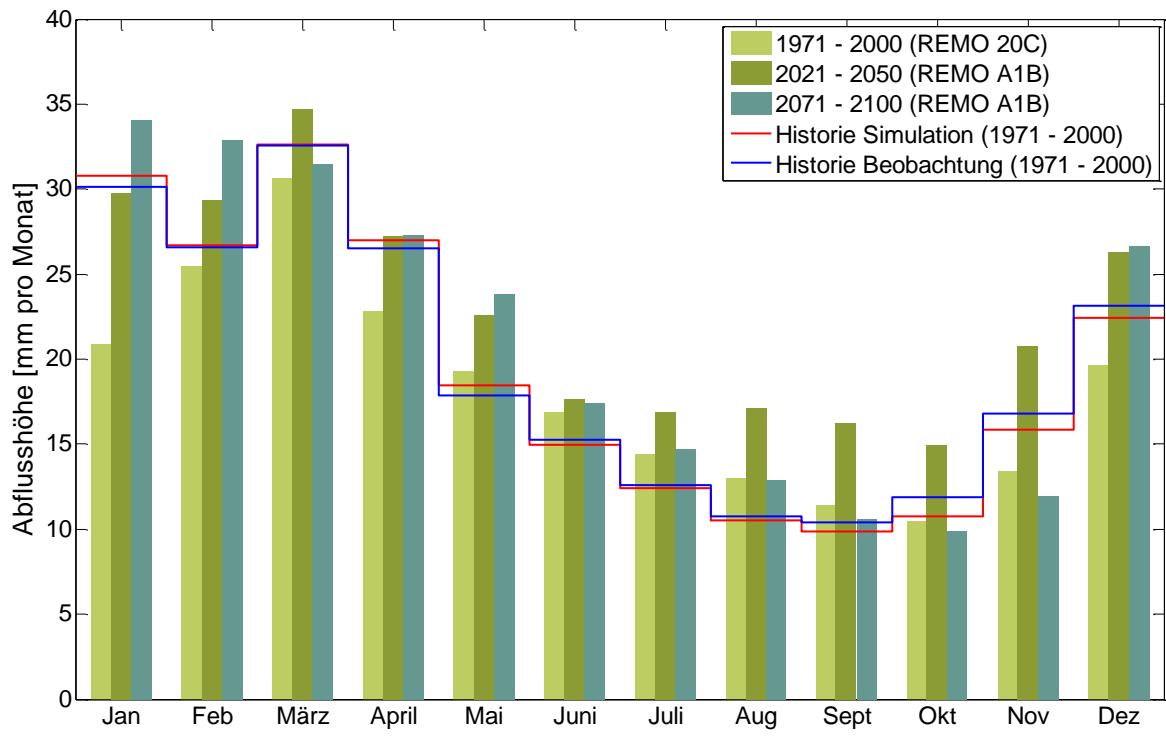
Ohrum



Poppenburg

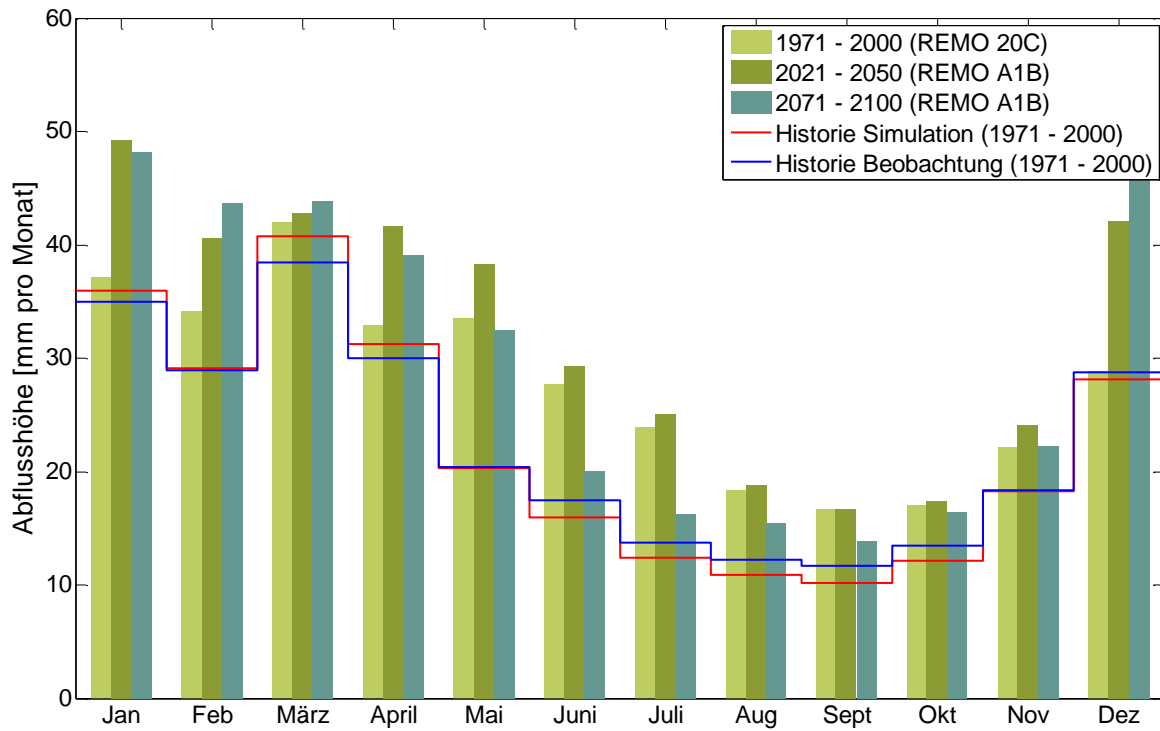


Groß Schwülper

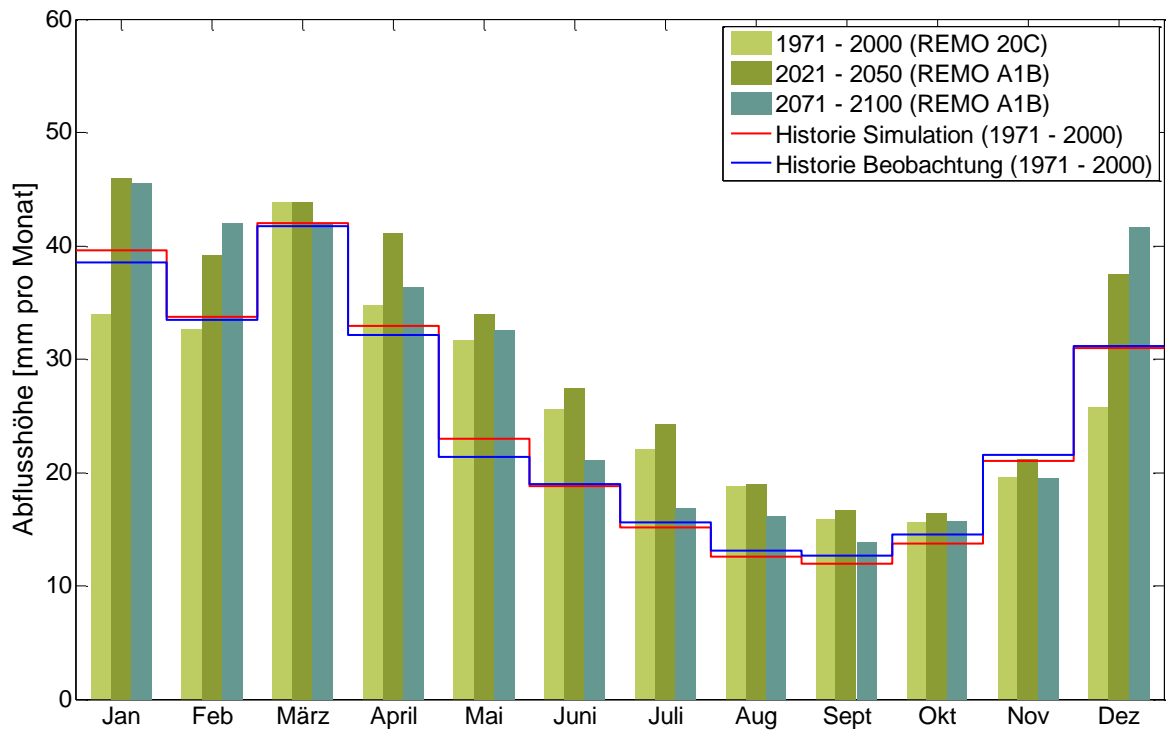


Rethem

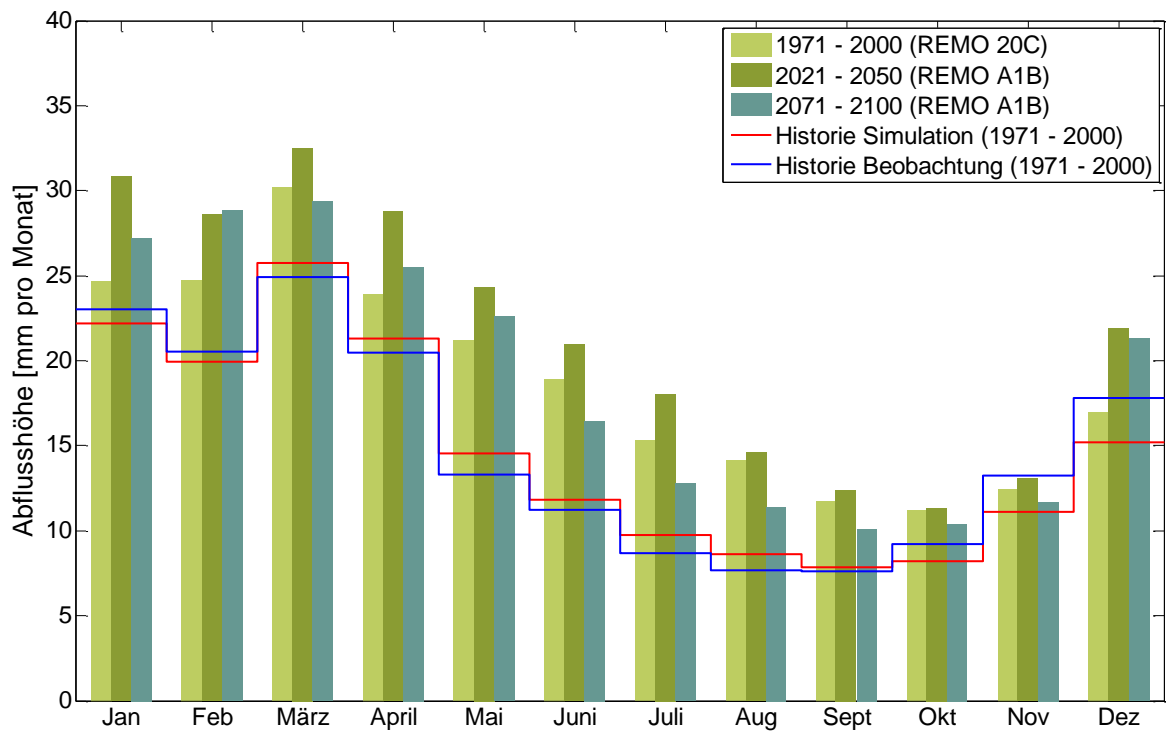
Anhang 21: Mittlere monatliche Abflusshöhen aus REMO-BFG für drei Zeiträume.



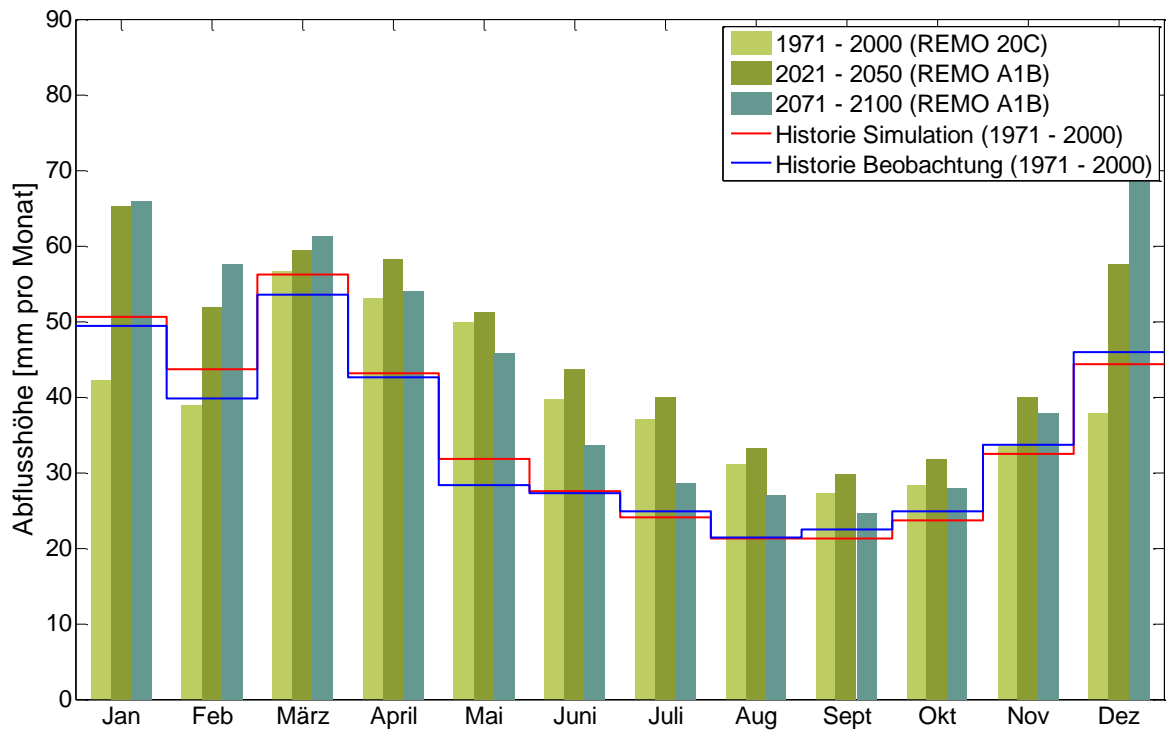
Heinde



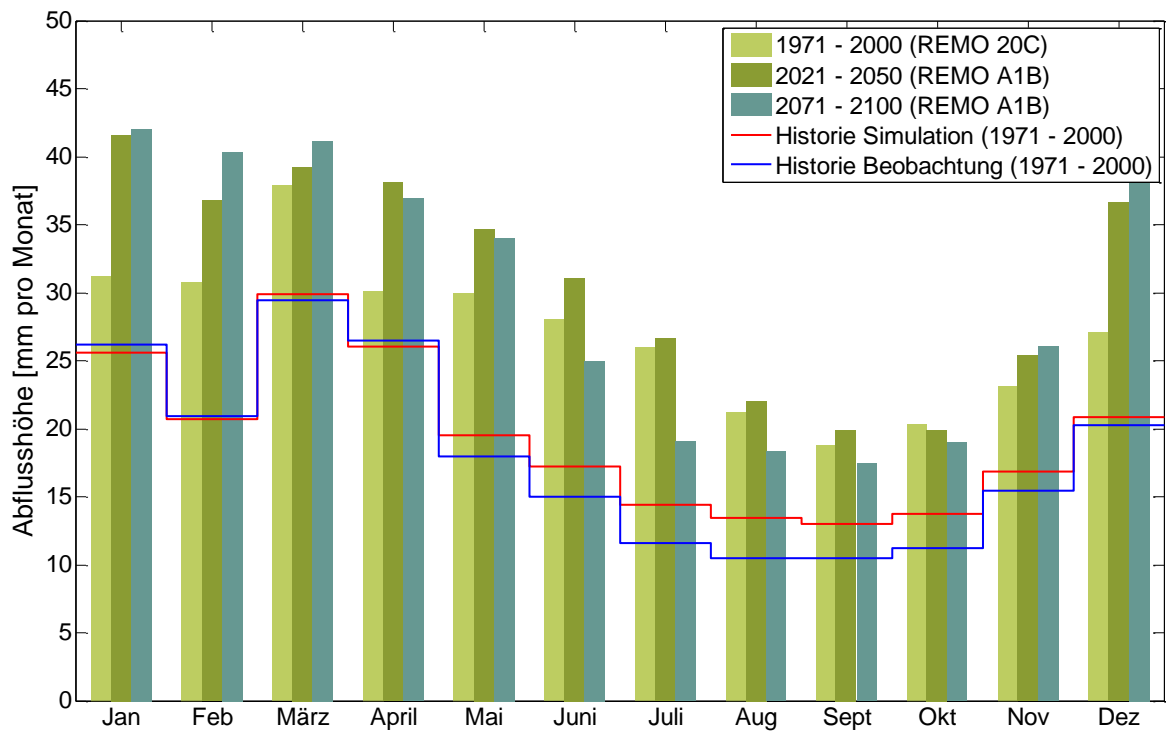
Herrenhausen



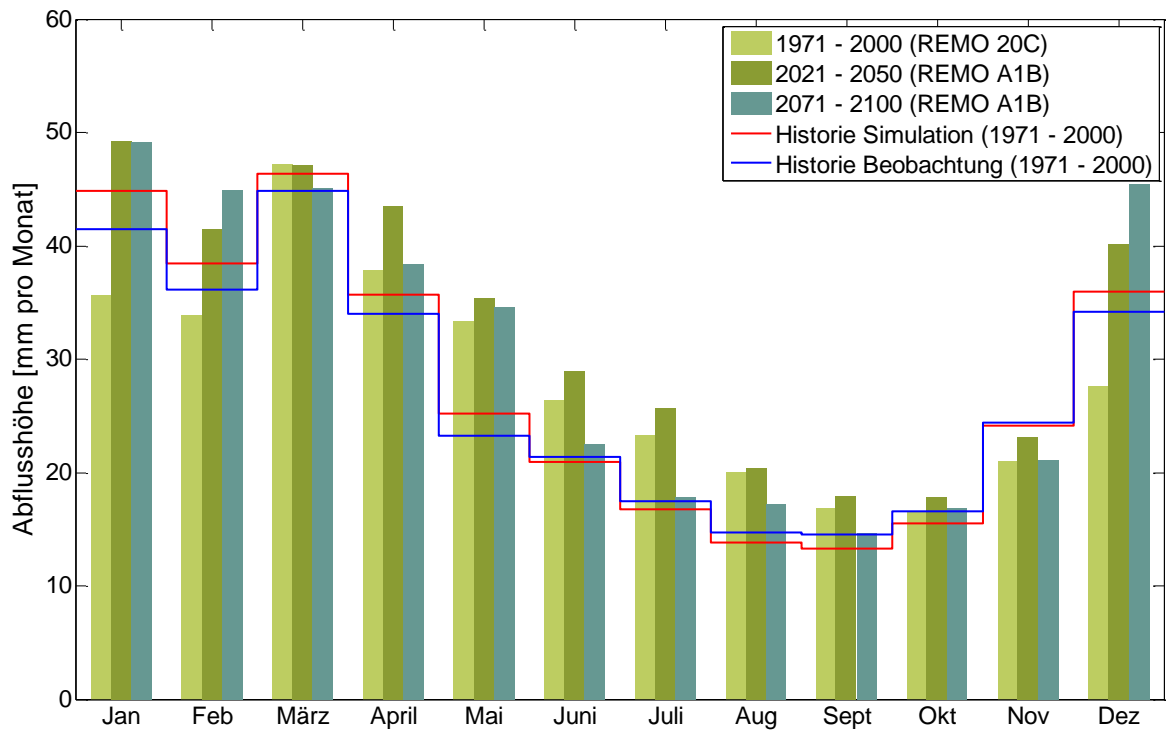
Marklendorf



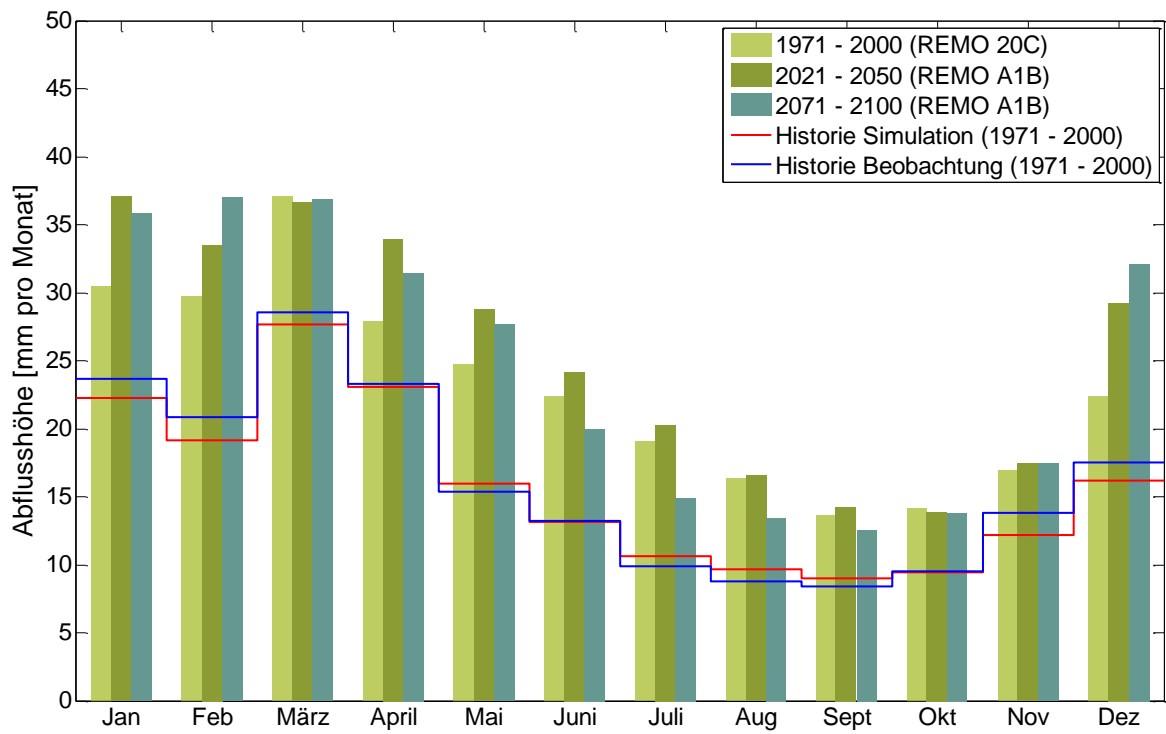
Northeim



Ohrum

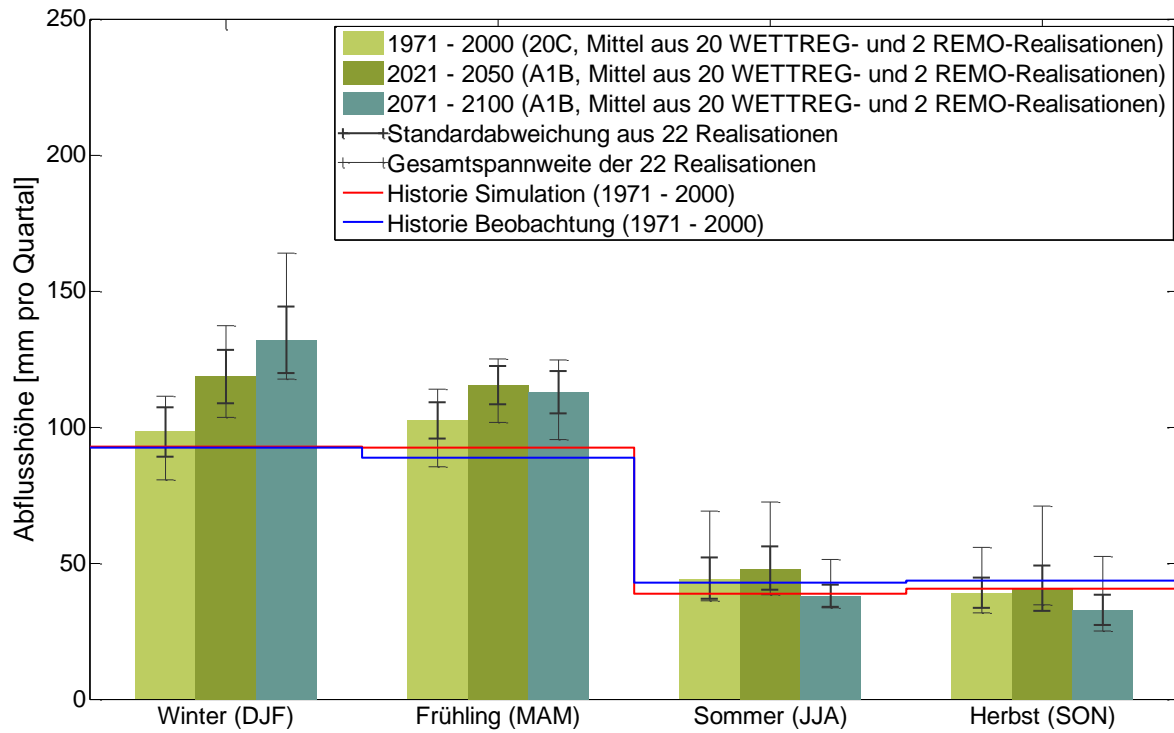


Poppenburg

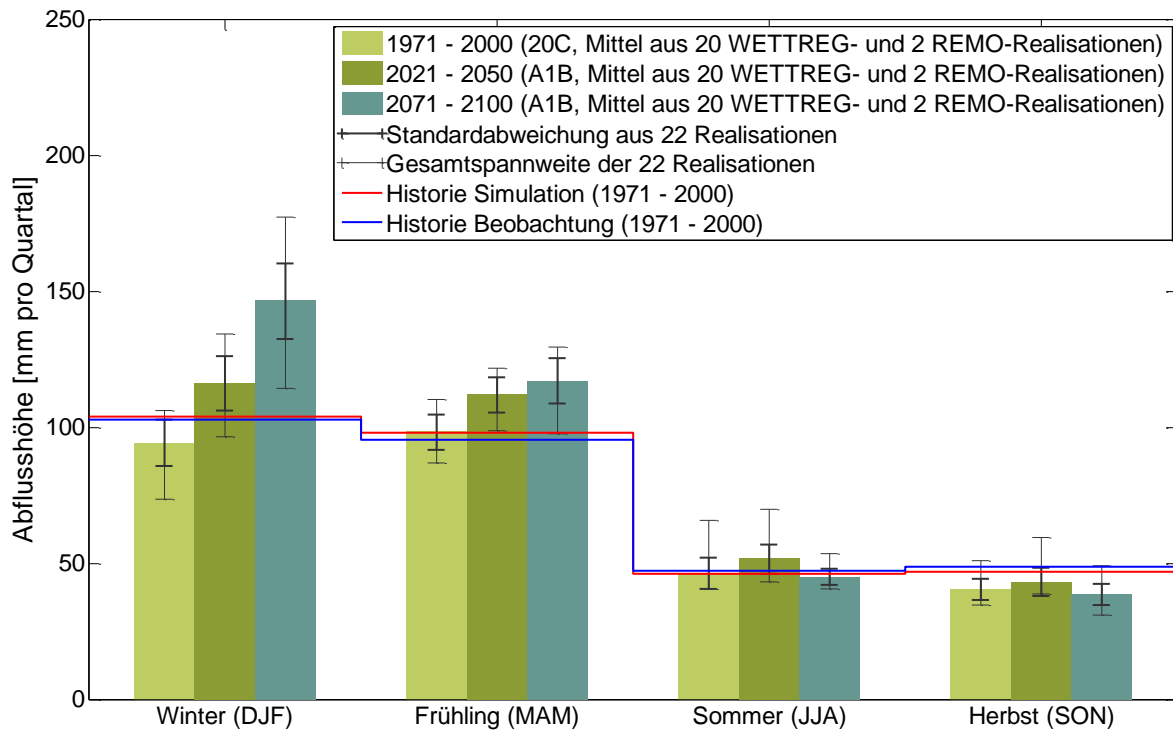


Groß Schwülper

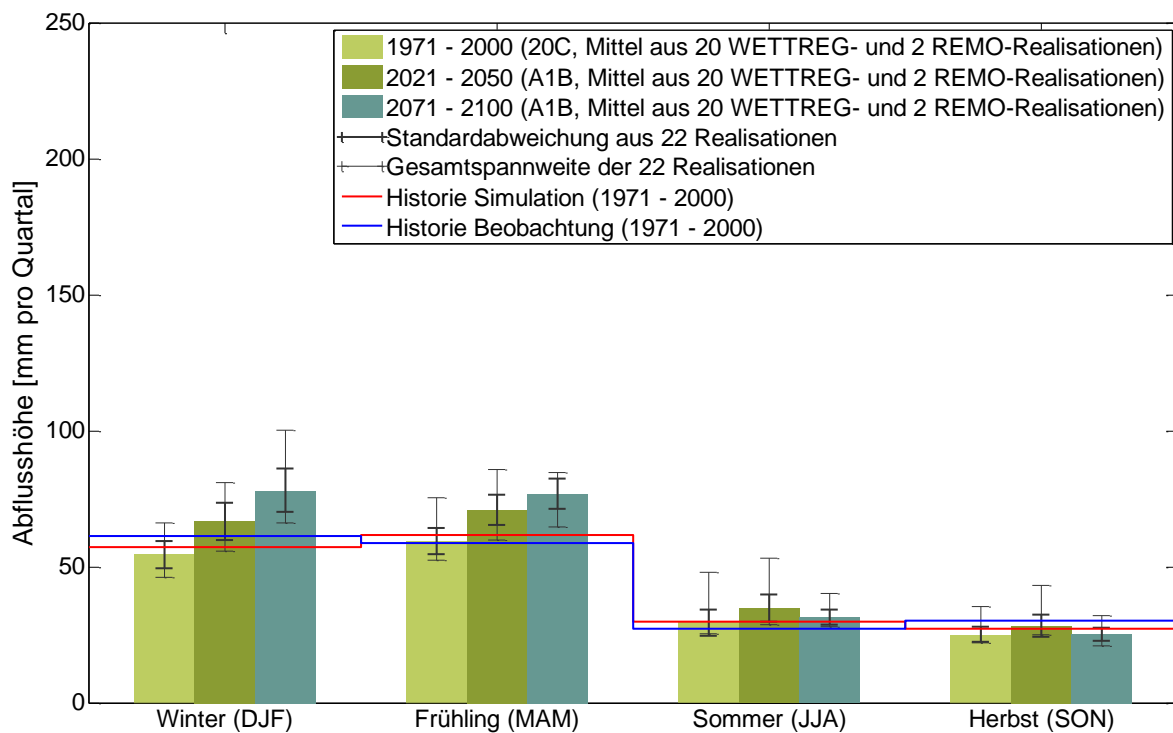
Anhang 22: Mittlere Abflusshöhen pro Quartal aus 20 WETTREG2006-Realisationen und 2 REMO-Läufen (UBA und BfG) für drei Zeiträume.



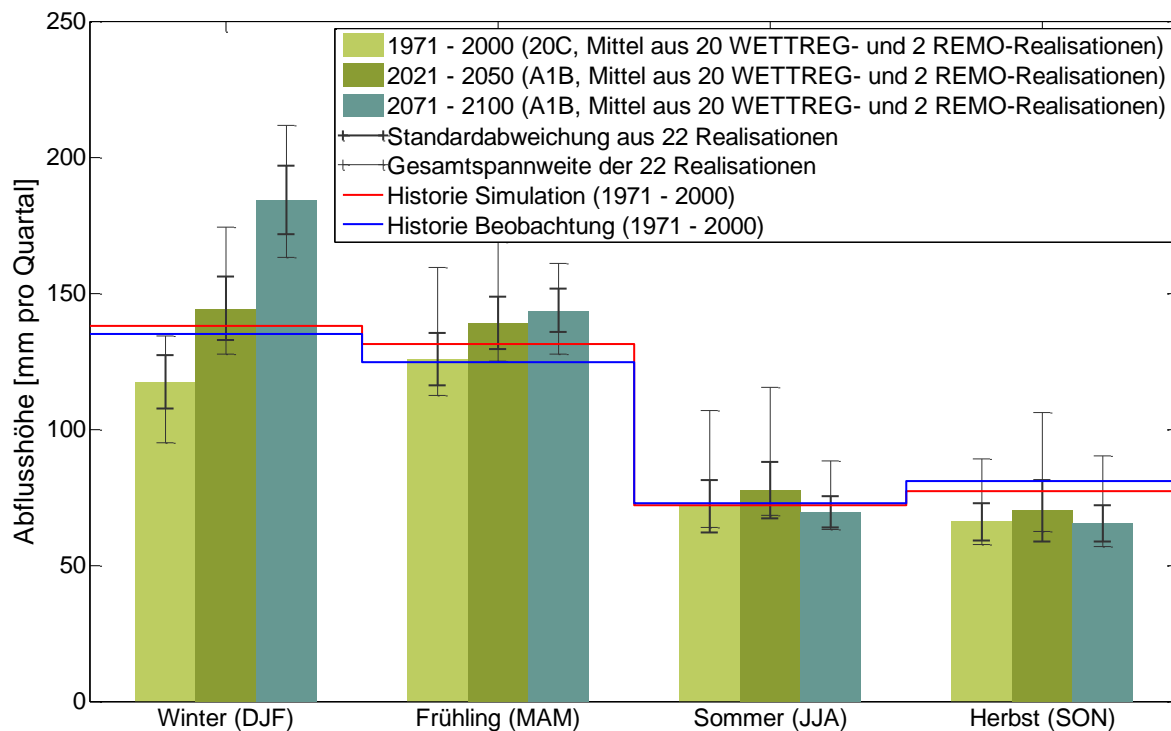
Heide



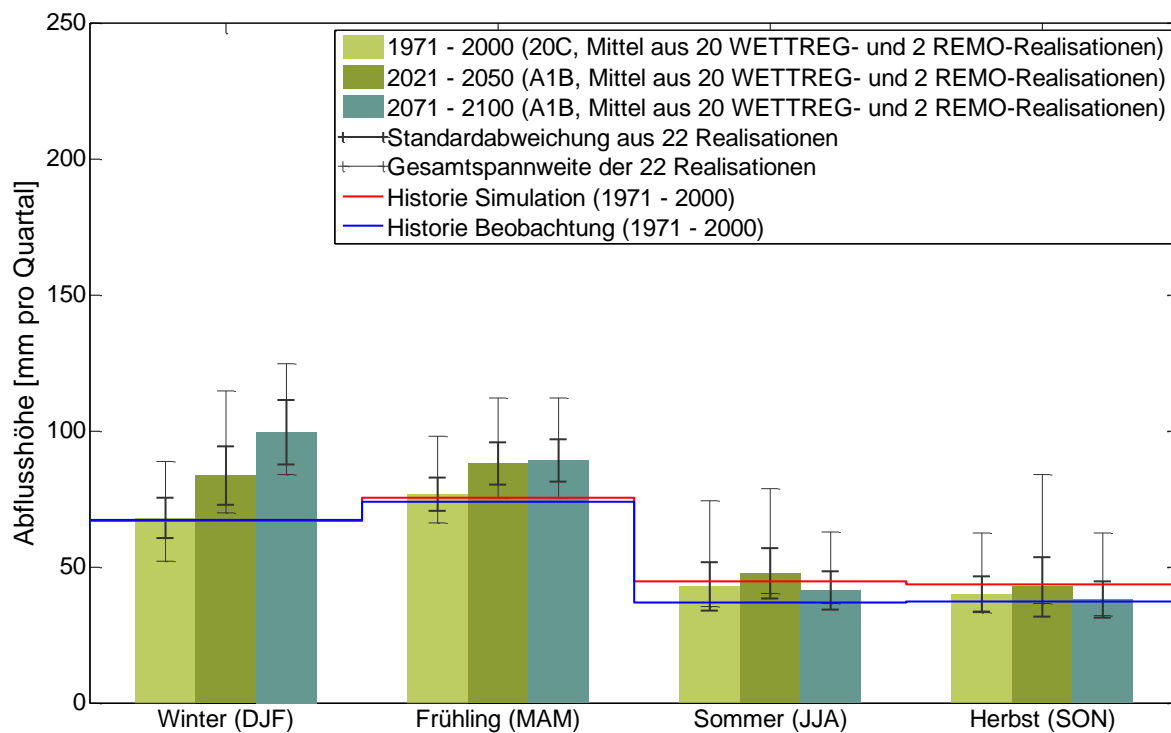
Herrenhausen



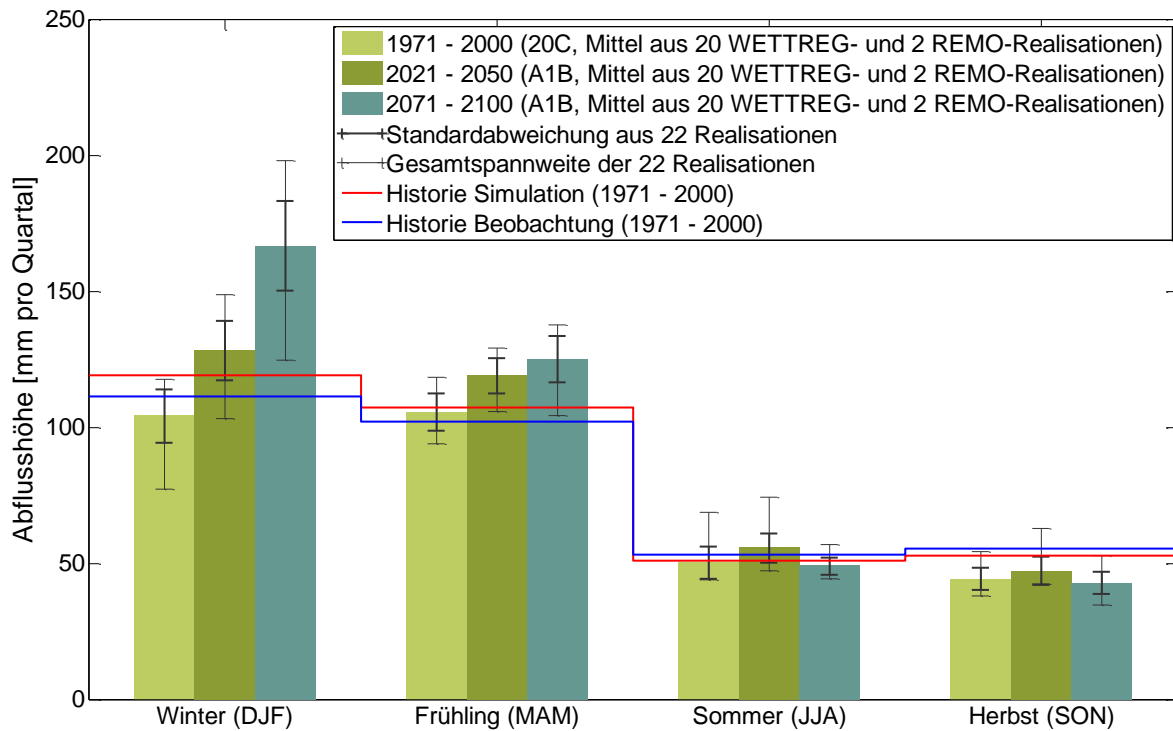
Marklendorf



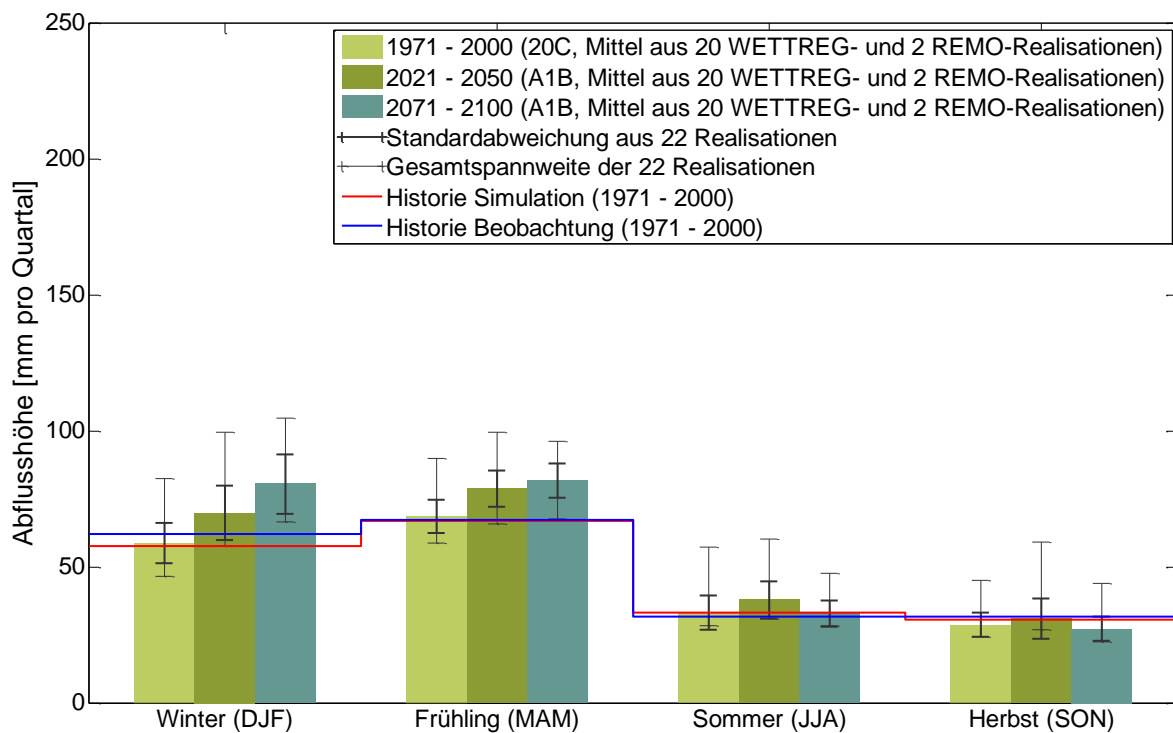
Northeim



Ohrum



Poppenburg



Groß Schwülper

Anhang 23: Mittlere Hochwasserabflüsse (MHQ) aus 20 WETTREG2006-Realisationen und 2 REMO-Läufen (UBA und BfG) für drei Zeiträume, Angaben in m³ s⁻¹.

Jahr	Beobachtung 1971-2000	WETTREG			REMO BfG			REMO UBA		
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100
		Pegel								
Gr. Schwülper	57	60	66	73	81	83	81	78	82	92
Heinde	51	58	64	66	62	64	64	58	63	71
Herrnhäusen	221	224	253	284	223	257	243	205	224	249
Marklendorf	152	178	191	223	204	222	194	195	200	214
Northheim	90	67	77	89	84	98	102	86	92	107
Ohrum	29	32	37	41	44	50	50	43	53	59
Poppenburg	169	159	179	206	165	183	174	148	156	182
Rethem	396	446	504	575	470	522	475	441	464	508

Winter	Beobachtung 1971-2000	WETTREG			REMO BfG			REMO UBA		
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100
		Pegel								
Gr. Schwülper	56	58	63	71	75	78	74	75	71	85
Heinde	48	56	61	65	57	60	58	54	51	64
Herrnhäusen	221	219	247	282	217	250	228	197	205	231
Marklendorf	150	174	187	219	189	208	183	190	181	202
Northheim	87	65	75	89	80	93	99	80	83	101
Ohrum	28	30	36	41	37	45	45	38	43	51
Poppenburg	170	156	176	205	160	178	164	142	148	171
Rethem	394	438	494	567	452	505	449	428	433	478

Sommer	Beobachtung 1971-2000	WETTREG			REMO BfG			REMO UBA		
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100
		Pegel								
Gr. Schwülper	28	27	30	27	46	52	48	37	51	50
Heinde	22	23	27	23	32	37	38	29	42	34
Herrnhäusen	103	95	111	104	128	138	146	102	126	132
Marklendorf	70	77	86	86	121	136	117	85	115	117
Northheim	40	30	36	32	48	59	50	43	53	52
Ohrum	15	15	18	15	30	33	31	26	34	34
Poppenburg	77	67	80	74	85	100	104	72	85	94
Rethem	180	190	223	218	274	287	276	201	255	267

Anhang 24: Mittlere Hochwasserabflüsse (MHQ) aus 20 WETTREG2006-Realisationen und 2 REMO-Läufen (UBA und BfG) für drei Zeiträume in Relation zum entsprechenden Kontrolllauf (20C).

Jahr %	Beobachtung 1971-2000	WETTREG			REMO BfG			REMO UBA		
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100
		100%	109%	121%	100%	103%	100%	100%	100%	106%
Gr. Schwülper	100%	110%	114%	100%	104%	104%	100%	109%	123%	
Heinde	100%	113%	127%	100%	115%	109%	100%	109%	121%	
Herrnhäusen	100%	107%	125%	100%	109%	95%	100%	102%	110%	
Marklendorf	100%	114%	133%	100%	117%	121%	100%	107%	125%	
Northheim	100%	116%	129%	100%	112%	113%	100%	122%	137%	
Ohrum	100%	112%	129%	100%	111%	106%	100%	105%	123%	
Poppenburg	100%	113%	129%	100%	111%	101%	100%	105%	115%	
Rethem										

Winter %	Beobachtung 1971-2000	WETTREG			REMO BfG			REMO UBA		
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100
		100%	109%	123%	100%	104%	98%	100%	100%	95%
Gr. Schwülper	100%	109%	116%	100%	106%	102%	100%	94%	117%	
Heinde	100%	113%	128%	100%	116%	105%	100%	104%	117%	
Herrnhäusen	100%	107%	126%	100%	110%	97%	100%	95%	106%	
Marklendorf	100%	114%	136%	100%	115%	124%	100%	104%	127%	
Northheim	100%	117%	134%	100%	123%	122%	100%	114%	134%	
Ohrum	100%	112%	131%	100%	111%	102%	100%	104%	120%	
Poppenburg	100%	113%	129%	100%	112%	99%	100%	101%	112%	
Rethem										

Sommer %	Beobachtung 1971-2000	WETTREG			REMO BfG			REMO UBA		
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100
		100%	113%	102%	100%	111%	104%	100%	100%	137%
Gr. Schwülper	100%	116%	100%	100%	117%	119%	100%	145%	119%	
Heinde	100%	117%	109%	100%	108%	114%	100%	124%	129%	
Herrnhäusen	100%	112%	111%	100%	112%	96%	100%	135%	137%	
Marklendorf	100%	120%	107%	100%	123%	105%	100%	123%	120%	
Northheim	100%	116%	99%	100%	111%	105%	100%	130%	129%	
Ohrum	100%	118%	109%	100%	118%	123%	100%	118%	131%	
Poppenburg	100%	117%	114%	100%	105%	101%	100%	126%	133%	
Rethem										

Anhang 25: Vergleich der Hochwasserabflüsse verschiedener Zeiträume für die Referenzpegel.

Gesamtjahr

	Pegel	Gesamtjahr, Mittel aus 22 Realisationen				
		Z1 1971-2000	Z2 2021-2050	Z3 2071-2100	Beobachtung 1971-2000	Simulation 1971-2000
HQ5	Gr. Schwülper	86	92	99	81	80
	Heinde	79	85	87	68	68
	Herrenhausen	294	319	347	291	305
	Marklendorf	255	261	295	199	243
	Northeim	92	101	114	124	105
	Ohrum	46	52	57	42	47
	Poppenburg	205	221	247	227	234
	Rethem	610	656	727	536	622
HQ100	Gr. Schwülper	169	174	181	160	155
	Heinde	148	157	158	127	126
	Herrenhausen	531	548	571	526	553
	Marklendorf	508	487	545	358	473
	Northeim	169	178	191	237	198
	Ohrum	90	99	104	86	94
	Poppenburg	359	367	391	422	429
	Rethem	1157	1170	1262	1006	1154

Winter

	Pegel	Winter, Mittel aus 22 Realisationen				
		Z1	Z2	Z3	Beobachtung	Simulation
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	1971-2000
HQ5	Gr. Schwülper	84	89	97	80	78
	Heinde	77	82	86	67	69
	Herrenhausen	291	315	344	299	303
	Marklendorf	251	256	290	198	242
	Northeim	90	99	113	122	107
	Ohrum	44	51	55	42	45
	Poppenburg	203	219	245	236	233
	Rethem	604	648	717	537	620
HQ100	Gr. Schwülper	169	172	181	160	159
	Heinde	149	154	157	130	133
	Herrenhausen	536	549	570	560	554
	Marklendorf	508	485	538	359	476
	Northeim	169	176	193	237	207
	Ohrum	88	98	103	89	94
	Poppenburg	363	368	392	459	430
	Rethem	1160	1170	1253	1015	1156

Sommer

	Pegel	Sommer, Mittel aus 22 Realisationen				
		Z1	Z2	Z3	Beobachtung	Simulation
		1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	1971-2000
HQ5	Gr. Schwülper	41	47	44	43	41
	Heinde	36	43	38	36	35
	Herrenhausen	137	161	155	144	140
	Marklendorf	113	127	132	92	103
	Northeim	44	54	47	65	52
	Ohrum	24	28	25	21	27
	Poppenburg	95	114	109	122	103
	Rethem	273	317	324	240	257
HQ100	Gr. Schwülper	86	98	95	97	84
	Heinde	76	91	84	83	78
	Herrenhausen	270	320	318	279	287
	Marklendorf	227	251	279	165	195
	Northeim	85	108	92	151	112
	Ohrum	49	58	52	44	57
	Poppenburg	186	227	218	273	213
	Rethem	538	617	665	443	488

Anhang 26: Relative Änderung der Hochwasserabflüsse verschiedener Zeiträume bezogen auf den Zeitraum 1971-2000 (=100%) für die Referenzpegel.

Pegel	Gesamtjahr			Winter			Sommer		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
	1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100
HQ5	100%	106%	114%	100%	105%	115%	100%	114%	107%
Gr. Schwülper	100%	108%	111%	100%	106%	111%	100%	119%	106%
Heinde	100%	109%	118%	100%	108%	118%	100%	118%	114%
Herrenhausen	100%	102%	116%	100%	102%	115%	100%	112%	117%
Markendorf	100%	110%	124%	100%	110%	126%	100%	123%	108%
Northeim	100%	114%	123%	100%	115%	126%	100%	117%	103%
Ohrum	100%	108%	120%	100%	108%	121%	100%	120%	114%
Poppenburg	100%	108%	119%	100%	107%	119%	100%	116%	119%
Rethem	100%	102%	107%	100%	101%	107%	100%	115%	111%
HQ100	100%	106%	107%	100%	104%	105%	100%	120%	111%
Gr. Schwülper	100%	103%	108%	100%	102%	106%	100%	118%	118%
Heinde	100%	96%	107%	100%	96%	106%	100%	111%	123%
Herrenhausen	100%	105%	113%	100%	104%	114%	100%	127%	109%
Markendorf	100%	111%	116%	100%	111%	117%	100%	117%	105%
Northeim	100%	102%	109%	100%	101%	108%	100%	122%	118%
Ohrum	100%	101%	109%	100%	101%	108%	100%	115%	124%
Poppenburg	100%	101%	109%	100%	101%	108%	100%	115%	124%
Rethem	100%	101%	109%	100%	101%	108%	100%	115%	124%

Anhang 27: Hochwasserkenngrößen der Szenarien für die Pegel der Detailgebiete (Z1 = 1971-2000, Z2 = 2021-2050, Z3 = 2071-2100)

Derneburg / Nette		MHQ			HQ5			HQ100		
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Gesamtfahr	Beobachtung	28			49			88		
	REMO-BFG-20C	33	35	35	43	44	50	78	74	98
	REMO-UBA-20C	32	35	39	41	47	55	72	90	109
	WETTREG55-Derneburg-20C-03	21	28	31	29	33	40	54	50	71
	WETTREG55-Derneburg-20C-03-parallel	24	30	35	31	35	44	55	53	74
	WETTREG55-Derneburg-20C-13	25	30	28	31	39	37	51	68	66
	WETTREG55-Derneburg-20C-13-parallel	28	33	32	34	41	40	57	68	67
	WETTREG55-Derneburg-20C-18	27	30	34	36	40	47	66	74	89
	WETTREG55-Derneburg-20C-18-parallel	30	33	37	38	43	49	65	77	88
Winter	Beobachtung	27			46			85		
	REMO-BFG-20C	29	32	29	41	40	35	78	65	55
	REMO-UBA-20C	28	26	33	39	35	48	75	62	98
	WETTREG55-Derneburg-20C-03	20	26	30	28	33	39	53	53	68
	WETTREG55-Derneburg-20C-03-parallel	22	29	32	29	35	41	54	54	72
	WETTREG55-Derneburg-20C-13	23	27	27	30	36	36	54	64	67
	WETTREG55-Derneburg-20C-13-parallel	25	30	30	33	38	38	59	65	66
	WETTREG55-Derneburg-20C-18	23	27	32	32	38	44	60	74	84
	WETTREG55-Derneburg-20C-18-parallel	26	30	34	33	41	46	60	77	85
Sommer	Beobachtung	15			30			60		
	REMO-BFG-20C	22	24	28	30	34	44	58	68	101
	REMO-UBA-20C	22	29	27	29	44	41	52	92	90
	WETTREG55-Derneburg-20C-03	11	15	16	16	21	25	33	43	54
	WETTREG55-Derneburg-20C-03-parallel	14	18	21	20	25	30	40	47	59
	WETTREG55-Derneburg-20C-13	14	17	14	21	26	20	42	55	42
	WETTREG55-Derneburg-20C-13-parallel	18	21	18	24	30	26	46	58	52
	WETTREG55-Derneburg-20C-18	17	16	18	26	23	27	57	47	58
	WETTREG55-Derneburg-20C-18-parallel	20	19	21	29	26	30	60	49	60

Glentorf / Schunter		MHQ			HQ5			HQ100		
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Gesamtfahr	Beobachtung	13			21			37		
	REMO-BFG-20C	17	17	17	21	21	21	38	35	37
	REMO-UBA-20C	16	18	18	20	24	23	35	45	39
	WETTREG55-Glentorf-20C-03	11	12	13	15	15	17	28	27	32
	WETTREG55-Glentorf-20C-03-parallel	13	14	15	17	17	20	31	27	34
	WETTREG55-Glentorf-20C-13	11	13	13	14	18	17	26	32	32
	WETTREG55-Glentorf-20C-13-parallel	13	15	16	17	19	20	31	33	33
	WETTREG55-Glentorf-20C-18	13	13	14	17	19	19	30	36	36
	WETTREG55-Glentorf-20C-18-parallel	15	16	16	19	21	21	33	38	37
Winter	Beobachtung	13			20			38		
	REMO-BFG-20C	13	14	14	19	19	19	39	36	36
	REMO-UBA-20C	13	13	15	18	18	21	36	37	40
	WETTREG55-Glentorf-20C-03	8	10	12	12	14	16	25	27	31
	WETTREG55-Glentorf-20C-03-parallel	10	12	14	15	16	19	30	29	34
	WETTREG55-Glentorf-20C-13	9	11	11	12	16	16	24	31	31
	WETTREG55-Glentorf-20C-13-parallel	10	13	14	14	18	19	27	32	35
	WETTREG55-Glentorf-20C-18	10	12	13	14	18	18	28	37	36
	WETTREG55-Glentorf-20C-18-parallel	12	14	15	16	20	20	31	40	38
Sommer	Beobachtung	6			15			28		
	REMO-BFG-20C	13	13	14	17	17	18	32	30	33
	REMO-UBA-20C	12	15	14	16	22	18	31	44	32
	WETTREG55-Glentorf-20C-03	7	9	8	11	12	13	23	25	28
	WETTREG55-Glentorf-20C-03-parallel	10	10	10	13	14	15	26	26	31
	WETTREG55-Glentorf-20C-13	8	9	7	12	14	11	25	28	23
	WETTREG55-Glentorf-20C-13-parallel	10	12	9	15	16	13	30	31	27
	WETTREG55-Glentorf-20C-18	10	8	9	14	11	13	28	20	27
	WETTREG55-Glentorf-20C-18-parallel	13	10	10	17	14	15	31	25	28

Göttingen / Leine		MHQ			HQ5			HQ100		
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Gesamtfahr	Beobachtung	56			100			161		
	REMO-BFG-20C	54	65	64	78	97	101	157	207	224
	REMO-UBA-20C	49	50	71	75	74	119	164	154	282
	WETTREG55-Goettingen-20C-03	45	57	74	63	79	93	123	155	157
	WETTREG55-Goettingen-20C-03-parallel	55	65	85	76	87	104	146	161	166
	WETTREG55-Goettingen-20C-13	46	60	64	65	95	82	128	214	140
	WETTREG55-Goettingen-20C-13-parallel	53	70	78	74	103	98	144	214	165
	WETTREG55-Goettingen-20C-18	53	57	75	72	77	95	138	145	160
	WETTREG55-Goettingen-20C-18-parallel	61	66	82	83	87	100	159	159	161
Winter	Beobachtung	43			100			160		
	REMO-BFG-20C	45	43	46	70	61	70	153	123	151
	REMO-UBA-20C	36	37	52	54	59	84	116	135	193
	WETTREG55-Goettingen-20C-03	42	54	73	58	71	93	113	127	158
	WETTREG55-Goettingen-20C-03-parallel	52	62	84	72	81	103	141	144	169
	WETTREG55-Goettingen-20C-13	44	50	64	61	68	82	119	126	142
	WETTREG55-Goettingen-20C-13-parallel	51	62	77	72	82	98	144	148	168
	WETTREG55-Goettingen-20C-18	46	55	74	66	73	94	133	136	161
	WETTREG55-Goettingen-20C-18-parallel	55	63	82	79	85	100	159	159	160
Sommer	Beobachtung	35			58			116		
	REMO-BFG-20C	35	52	50	52	86	86	108	201	207
	REMO-UBA-20C	37	41	46	64	64	92	153	141	247
	WETTREG55-Goettingen-20C-03	20	27	25	34	49	39	82	126	85
	WETTREG55-Goettingen-20C-03-parallel	25	35	37	40	57	55	91	131	114
	WETTREG55-Goettingen-20C-13	22	32	23	36	69	35	85	196	72
	WETTREG55-Goettingen-20C-13-parallel	27	38	32	40	74	46	84	195	93
	WETTREG55-Goettingen-20C-18	26	30	31	43	50	48	98	117	103
	WETTREG55-Goettingen-20C-18-parallel	31	37	41	48	54	58	105	111	116

Pionierbrücke / Sieber		MHQ			HQ5			HQ100		
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Gesamtfahr	Beobachtung	22			31			55		
	REMO-BFG20C	16	21	27	19	26	37	30	45	72
	REMO-UBA-20C	20	27	28	28	38	44	56	77	96
	WETTREG55-Pionier-20C-03	14	17	17	18	21	22	30	34	39
	WETTREG55-Pionier-20C-03-parallel	21	21	22	26	25	26	44	40	41
	WETTREG55-Pionier-20C-13	16	16	16	18	21	20	28	39	33
	WETTREG55-Pionier-20C-13-parallel	22	22	21	27	28	26	46	51	41
	WETTREG55-Pionier-20C-18	15	16	18	18	20	23	28	34	37
	WETTREG55-Pionier-20C-18-parallel	20	22	24	24	28	31	40	47	55
Winter	Beobachtung	20			26			41		
	REMO-BFG20C	12	16	19	16	22	27	28	43	56
	REMO-UBA-20C	14	15	18	20	23	29	41	51	64
	WETTREG55-Pionier-20C-03	12	14	15	16	17	20	29	28	36
	WETTREG55-Pionier-20C-03-parallel	16	17	18	22	22	23	40	37	39
	WETTREG55-Pionier-20C-13	15	14	15	18	17	18	28	28	28
	WETTREG55-Pionier-20C-13-parallel	19	18	19	24	23	24	43	41	40
	WETTREG55-Pionier-20C-18	14	14	16	17	18	19	29	31	27
	WETTREG55-Pionier-20C-18-parallel	17	18	21	21	24	26	36	43	41
Sommer	Beobachtung	14			26			54		
	REMO-BFG20C	14	18	22	17	22	32	28	37	68
	REMO-UBA-20C	18	25	24	26	38	39	52	79	87
	WETTREG55-Pionier-20C-03	11	13	12	15	18	17	29	34	33
	WETTREG55-Pionier-20C-03-parallel	16	16	17	22	21	23	43	40	41
	WETTREG55-Pionier-20C-13	11	13	10	14	19	14	27	39	31
	WETTREG55-Pionier-20C-13-parallel	17	18	14	23	25	19	46	49	36
	WETTREG55-Pionier-20C-18	10	11	13	13	16	18	24	30	39
	WETTREG55-Pionier-20C-18-parallel	15	17	17	20	23	26	38	42	54

Reckershausen (Parallel-Kaskade für Stationen im Einzugsgebiet der Leine bis Reckershausen, nicht-parallelisierte Disaggregationen wie bei den Simulationen für Göttingen)

Reckershausen / Leine		MHQ			HQ5			HQ100		
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Gesamtfahr	Beobachtung	28			63			103		
	REMO-BFG-20C	33	39	39	46	60	62	91	132	139
	REMO-UBA-20C	29	28	44	43	42	77	87	91	187
	WETTREG55-Goettingen-20C-03	26	32	41	37	44	52	73	85	90
	WETTREG55-Goettingen-20C-13	28	33	36	39	52	46	77	115	77
	WETTREG55-Goettingen-20C-18	30	34	42	42	45	54	81	83	94
	WETTREG55-Reckershausen-20C-03-parallel	32	40	51	45	55	62	88	104	100
	WETTREG55-Reckershausen-20C-13-parallel	34	41	47	47	60	59	92	123	99
	WETTREG55-Reckershausen-20C-18-parallel	39	42	51	51	56	63	90	102	103
Winter	Beobachtung	23			62			102		
	REMO-BFG-20C	27	25	27	42	35	45	91	70	104
	REMO-UBA-20C	21	21	29	32	35	46	68	82	102
	WETTREG55-Goettingen-20C-03	25	31	41	36	42	52	71	77	90
	WETTREG55-Goettingen-20C-13	26	29	36	38	39	46	75	75	79
	WETTREG55-Goettingen-20C-18	27	33	41	40	44	53	82	83	93
	WETTREG55-Reckershausen-20C-03-parallel	30	39	49	42	54	61	83	101	101
	WETTREG55-Reckershausen-20C-13-parallel	32	36	46	46	51	59	93	99	100
	WETTREG55-Reckershausen-20C-18-parallel	37	40	51	50	54	62	94	102	102
Sommer	Beobachtung	16			36			75		
	REMO-BFG-20C	21	32	30	31	55	50	64	131	119
	REMO-UBA-20C	23	22	30	36	35	64	82	80	177
	WETTREG55-Goettingen-20C-03	11	16	15	18	27	24	44	65	51
	WETTREG55-Goettingen-20C-13	12	18	14	20	38	20	47	105	39
	WETTREG55-Goettingen-20C-18	14	16	18	21	24	28	47	53	64
	WETTREG55-Reckershausen-20C-03-parallel	15	22	22	24	33	32	58	72	65
	WETTREG55-Reckershausen-20C-13-parallel	17	23	20	24	41	26	47	103	49
	WETTREG55-Reckershausen-20C-18-parallel	21	21	25	30	31	36	60	65	75