

Klimafolgenstudie 2012

Wasser (Band 1)



Untersuchungen zu den Folgen des Klimawandels
in Sachsen-Anhalt



SACHSEN-ANHALT

Landesamt für Umweltschutz

Klimafolgenstudie 2012

Wasser (Band 1)

Bericht zur Untersuchung der Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt

im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt
unter fachlicher Begleitung des
Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt

Berichte des
Landesamtes für Umweltschutz
Sachsen-Anhalt

2013 – Heft 5 (Band 1)

In dieser Schriftenreihe erscheinen folgende Bände mit den Ergebnissen der beiden Untersuchungen zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt:

Die Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt Kurzfassungen der Studien 2009 und 2012	Heft 2/ 2013
Vulnerabilitätsstudie 2009 Bericht	Heft 3/ 2013 (Band 1)
Vulnerabilitätsstudie 2009 Anhang	Heft 3/ 2013 (Band 2)
Klimafolgenstudie 2012: Klimadiagnose und Klimaprojektion, Extremereignisse	Heft 4/ 2013
Klimafolgenstudie 2012: Wasser Bericht	Heft 5/ 2013 (Band 1)
Klimafolgenstudie 2012: Wasser Folgeuntersuchungen	Heft 5/ 2013 (Band 2)
Klimafolgenstudie 2012: Naturschutz	Heft 6/ 2013
Klimafolgenstudie 2012: Landwirtschaft	Heft 7/ 2013
Klimafolgenstudie 2012: Forstwirtschaft	Heft 8/ 2013
Klimafolgenstudie 2012: Anpassungsmaßnahmen	Heft 9/ 2013



Vorwort

Die Anpassung an den Klimawandel ist neben dem Klimaschutz die zweite Säule der Klimapolitik in Sachsen-Anhalt. Nach Einschätzung der großen Mehrheit von Wissenschaft und Politik ist der Klimawandel trotz aller Bemühungen um den Klimaschutz nicht aufzuhalten. Das belegen auch die in zwei Studien erhobenen Daten und Szenarien für Sachsen-Anhalt. Das Klima in unserem Bundesland wird sich voraussichtlich regional in unterschiedlicher Weise ändern. Folglich müssen auch die Auswirkungen auf verschiedene Landesteile und Sektoren differenziert betrachtet werden. Nur ein überlegtes Handeln in Gegenwart und Zukunft erspart vermeidbare, durch den Klimawandel verursachte Kosten. Deshalb wurde im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt vom Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 2009 eine Studie zum Klimawandel in Sachsen-Anhalt und der Verletzlichkeit gegenüber den Folgen des Klimawandels (**Vulnerabilitätsstudie**) durchgeführt. 2012 wurden in einer weiteren Studie (**Klimafolgenstudie 2012**) die Untersuchungen zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt unter Berücksichtigung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse, mit einem besonderen Fokus auf Extremereignisse, fortgeschrieben. Die Ergebnisse beider Studien sollen nun für die breite Öffentlichkeit zugänglich gemacht und deshalb in dieser Schriftenreihe publiziert werden.

Halle, 01.03.2013



Klaus Rehda
Präsident



Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt

Teilbericht Los 1.3: Wasser

Im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt
unter fachlicher Begleitung des
Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt

Vergabe 1.2-44761-02-2011

Bearbeiter dieses Teilberichts:

Dr. Bernd Pfützner, Dr. Beate Klöcking, M.Sc. A. Schumann, Dipl. Geogr. P. Hesse

Basierend auf der aktualisierten Fassung vom 29. November 2012

Ausführende:

Für den Abschnitt Wasser

Büro für Angewandte Hydrologie (BAH)

Köberlesteig 6

D-13156 Berlin

Disclaimer

Die in diesem Bericht gezeigten Darstellungen beruhen auf Basisdaten, die von Dritten erzeugt wurden (Reanalysen, globale Klimamodell-Szenariorechnungen und Beobachtungsdaten). Die Bearbeiter übernehmen keine Verantwortung oder Haftung für deren Qualitätskontrolle und geht bei der Anwendung ihrer Methoden und der Interpretation der Resultate von einer höchstmöglichen Qualität der Basisdaten aus.

Die mit den globalen Klimamodellen errechneten Treibhausgas-Szenarios basieren ihrerseits auf Szenarios der Entwicklung der Weltbevölkerung, der Wirtschaft und anderer Globalisierungsfaktoren, für deren Richtigkeit oder Eintreffen keine Garantie übernommen werden kann. Diese Annahmen entsprechen aber dem aktuellen Stand der Wissenschaft, so dass eine bestmögliche Eintreffens-Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann.

Somit gilt auch für die ausgelieferten Daten, dass deren Aussagekraft in Relation mit der Qualität der Basisdaten zu sehen ist. Die Resultate der angewandten Methoden sind nach bestem Wissen und Gewissen entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft gewonnen worden.

Dieser Teilbericht sollte so zitiert werden: B. PFÜTZNER, B. KLÖCKING, A. SCHUMANN, P. HESSE, 2012: Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Teilbericht Los 1.3: Wasser. Büro für Angewandte Hydrologie im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).

Kurzfassung

Im Rahmen des Vorhabens *Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt* werden in einem Gesamt-Bericht drei aufeinander aufbauende Themenbereiche mit Bezug zu Klima, Klimawandel und Klimafolgen vorgestellt. Dieser Teilbericht beinhaltet das unten fett hervorgehobene Los 1.3

1. Analyse des gegenwärtigen und zukünftigen mittleren Klimazustands (Los 1.1). Bestimmung und Interpretation der zukünftigen Entwicklung von Klimaextremen (Los 1.2).
Ausführende: Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH.
2. **Analyse der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in der Region Sachsen-Anhalt. Dazu werden Aussagen, die möglichst lokal differenzierbar sind, zum quasi-natürlichen Wasserdargebot und seiner klimabedingten Veränderungen getroffen.**
Ausführende: **Büro für Angewandte Hydrologie.**
3. Analyse der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Ökosysteme in der Region Sachsen-Anhalt. Hier wird ein besonderes Augenmerk auf die zukünftigen Lebensbedingungen von Arten, die als schutzwürdig und gefährdet kategorisiert werden, gelegt.
Ausführende: biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH.

Dieser Teilbericht zu Los 1.3 wird ergänzt durch eine auf ihn bezogene umfangreiche Bibliographie.

Inhaltsverzeichnis

I	Los 1.3: Wasser	1
1	Veranlassung und Zielstellung	3
2	Daten und Methoden	5
2.1	Modellgrundlagen	5
2.2	Datengrundlagen	9
2.3	Basisparametrisierung des Modells	12
2.4	Modellierungsstrategie	14
2.5	Festlegung der zu betrachtenden Landschaftsräume	16
3	Bodenwasserhaushalt und Vegetation	19
3.1	Festlegung der repräsentativen Standorttypen	19
3.2	Parametrisierung	26
3.2.1	Böden und Grundwasserflurabstände	26
3.2.2	Phänologie und Bewirtschaftung	26
3.3	Simulation des Bodenwasserhaushalts	28
3.3.1	Modellvalidierung	28
3.3.2	Modellierung unter Szenariobedingungen	28
3.4	Ergebnisse	31
3.4.1	Klimatische Bedingungen	31
3.4.2	Häufigkeit und Intensität von Abflussbildungsereignissen	34
3.4.3	Häufigkeit und Dauer von landwirtschaftlichen Dürreperioden	37
3.4.4	Häufigkeit und Dauer von Sättigungsperioden	38
3.4.5	Detailuntersuchungen für ausgewählte Bodentypen	39
4	Gebietswasserhaushalt und Abflussverhältnisse	57
4.1	Auswahl der Referenzgebiete und Kurzcharakteristik	57
4.1.1	Übersicht	57
4.1.2	Biese (Altmark und Drömling)	61
4.1.3	Rossel (Elbetal und glazialer Osten)	64
4.1.4	Holtemme (Harz)	67

Inhaltsverzeichnis

4.1.5	Aller (Schwarzerdegebiet)	70
4.1.6	Querne/Weida (Schwarzerderegion im Regenschatten des Harzes) .	73
4.2	Parametrisierung der Gebietsmodelle	76
4.3	Ergebnisse: Klimafolgen für die Gebietshydrologie	80
4.3.1	Darstellungsweise	80
4.3.2	Biese (Altmark und Drömling)	83
4.3.3	Rossel (Elbetal und glazialer Osten)	89
4.3.4	Holtemme (Harz)	93
4.3.5	Aller (Schwarzerderegion)	98
4.3.6	Querne/Weida (Schwarzerderegion im Regenschatten des Harzes) .	103
4.3.7	Vergleich der Landschaftsräume	107
5	Abschätzung der Unsicherheiten	121
5.1	Klimatische Eingangsgrößen	121
5.2	Hydrologische Modellierung	125
6	Zusammenfassung	127
	Literaturverzeichnis	131
II	Anhänge	.1
A	Datenquellen und verwendete Unterlagen	A.1
B	Ergänzende Tabellen – Bodenwasserhaushalt und Vegetation	B.1
C	Verzeichnisse der Begriffe, Akronyme, Abbildungen und Tabellen	C.1
	Akronyme	C.3
	Abbildungsverzeichnis	C.7
	Tabellenverzeichnis	C.14

Teil I

Los 1.3: Wasser

1 Veranlassung und Zielstellung

Der Sektor Wasser ist durch die teils jetzt schon zu beobachtenden, im Zusammenhang mit dem Klimawandel stehenden Phänomene betroffen. Welche Auswirkungen künftige Klimaänderungen haben werden, ist Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen. Ein Problem bei der Abschätzung der Auswirkungen zukünftiger Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt einer Region sind das Zusammentreffen unterschiedlichster Unsicherheiten bei der Modellierung:

- a) Unsicherheit der Klimaszenarien
- b) Unsicherheit der Daten (z.B. Boden, Landnutzung, ober- und insbesondere unterirdische Einzugsgebietsgrenzen)
- c) Unsicherheit der Modellansätze zur Beschreibung des Wasser- und Stoffhaushaltes
- d) Adaptionsprozesse (anthropogen über Management und neue Züchtungen, aber auch in Form von Selbstregulierungsprozessen).

In der Studie „Klimawandel in Sachsen-Anhalt - Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels“ des PIK (KROPP et al., 2009) wurde auf die im BMBF-Forschungsprojekt GLOWA-Elbe erstellte Datenbasis zurückgegriffen, die auf deutschland- und europaweit verfügbaren Datengrundlagen basiert. Daraus resultiert eine gewisse Unsicherheit bezüglich der räumlichen Auflösung, auf die in dieser Studie hingewiesen wird: „Abschließend ist es wichtig zu erwähnen, dass aufgrund . . . der verwendeten Daten nur großräumige und allenfalls regionale Aussagen getroffen werden können.“

Die hier vorgestellte Untersuchung baut auf der Nutzung des im Auftrag des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft für Sachsen-Anhalt durch das BAH erstellte ökohydrologische Modell ArcEGMO-ST auf, das den Wasserhaushalt und das hydrologische Regime der Gewässer in Sachsen-Anhalt räumlich hochauflösend für den Zeitraum 1971 bis 2003 abbildet. Sie orientiert auf regionale, möglichst lokal differenzierbare Aussagen, arbeitet also gegenüber der PIK-Studie eine Maßstabebene höher aufgelöst.

Ziel der Modellierung ist die Abbildung des natürlichen Wasserdargebotes und seiner klimabedingten Veränderungen. Anthropogene Überprägungen des natürlichen Abflussregimes durch bilanzverändernde Maßnahmen (Einleitungen, Entnahmen, Überleitungen, Grundwasserhebungen in Bergbaugebieten etc.) werden nicht erfasst.

2 Daten und Methoden

2.1 Modellgrundlagen

Grundlage für die hier durchgeführten Modelluntersuchungen war das hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO. ArcEGMO (PFÜTZNER, 2002; BECKER et al., 2002) ist eine hydrologische Toolbox, mit der alle wesentlichen Komponenten des Gebietswasserhaushaltes von den Wechselbeziehungen zwischen Atmosphäre-Vegetation-Boden bis hin zu den ober- und unterirdischen Abflusskonzentrationsprozessen bei Berücksichtigung von anthropogenen Steuerungen und natürlichen Störungen beschrieben werden können. Je nach Datenverfügbarkeit, Anwendungsmaßstab und Fragestellung können adäquate Teilprozessmodelle zu einem Gebietsmodell verknüpft werden. Eine ausführliche Modellbeschreibung inklusive diverser Anwendungsbeispiele findet sich unter www.arcegmo.de.

Die Berechnung der Grundwasserneubildung erfolgt in diesem Projekt mit dem ökohydrologischen Abflussbildungsmodul PSCN. Dieses Modell entstand durch die Kopplung verschiedener Wachstumsmodelle für Wald- und landwirtschaftliche Flächen mit einem detaillierten Bodenmodell und erlaubt somit die Simulation der saisonal wechselnden Wirkung der Vegetation auf den Landschaftswasserhaushalt. Durch die Nachschaltung des auf dem Lithofazieskonzept in Kombination mit dem Differenzganglinienverfahren beruhenden Moduls SLOWCOMP (SCHWARZE et al., 2004) wird eine plausible Aufteilung der unterirdischen Abflusskomponenten ermöglicht (Abbildung 2.1). Die Perkolation wird hierbei als Grundwasserneubildung in eine schnelle und eine langsame Komponente aufgeteilt. Diese Abflusskomponenten repräsentieren verschiedene Fließwege: den schnellen Fließweg in Zersatz-, Störungs- und Zerrüttungszonen und den langsamen Fließweg in Klüften und Poren.

Als treibende klimatische Größen werden Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung in täglicher Auflösung verwendet, die durch die in ArcEGMO integrierten Regionalisierungsverfahren aus den Stationsdaten für jedes simulierte Raumelement berechnet werden.

Das Modell unterscheidet zwischen folgenden Abflusskomponenten, die in ihrer räumlichen und zeitlichen Genese simuliert und ausgewertet werden können:

- Oberflächenabfluss von nicht an das Kanalnetz angeschlossenen versiegelten und unversiegelten Flächen,
- Kanalisationsabfluss von versiegelten und teilversiegelten Flächen (Siedlungs-, Industrie- und Verkehrsflächen), unterteilt in Misch- und Trennkanalisationsabfluss,

- hypodermischer Abfluss aus der Bodenzone (Interflow über geneigten Stauhorizonten),
- Drainabfluss,
- schnelle Grundwasserkomponente RG1,
- langsame Grundwasserkomponente RG2,
- Nassflächenabfluss (-zehrung) RGN.

ArcEGMO-PSCN enthält vier unterschiedliche Vegetationsmodelle, die sich den zwei Gruppen „gesteuerte Modelle“ und „Feedback-Modelle“ zuordnen lassen. Für makro-skalige Wasserhaushaltssimulationen wie z.B. der WH-Studie Sachsen-Anhalt (BAH, 2007) bzw. Modellanwendungen für bekannte Vegetationsverläufe haben sich die beiden, über zeitvariable Randbedingungen (vorgegebene Zeitfunktionen der Entwicklung phänologischer Kennwerte) gesteuerten Modellansätze bewährt. Sind jedoch Szenariosimulationen oder die Abbildung nicht so gut beobachteter Standorte das Ziel der Modellanwendung, muss die Dynamik der Vegetationsdecke explizit in Abhängigkeit von der Witterung und den übrigen Standortbedingungen simuliert werden. Dafür stehen die beiden „Feedback-Modelle“ zur Verfügung. Neben dem Einsatz des Waldwachstumsmodells 4C (LASCH et al., 2005) hat sich ein generisches Wachstumsmodell auf der Basis eines Wärmesummenansatzes zur Simulation der phänologischen Entwicklung bewährt (BECKER et al., 2005). Mit diesem Modell lassen sich auch die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit von den aktuellen Standortbedingungen und somit auch die Ertragsauswirkungen des Klimawandels auf den Ertrag für verschiedene Böden berechnen. Es handelt sich hierbei um eine vereinfachte Version des EPIC-Wachstumsmodells (WILLIAMS et al., 1989), wie sie auch in SWAT2000/2005 (NEITSCH et al., 2005) enthalten ist.

Die phänologische Modellierung folgt der sogenannten „Heat Unit Theory“. Diese beruht auf der Annahme, dass das Wachstum der Vegetation vor allem von der Temperatur gesteuert wird (BOSWELL, 1926). Bei jeder Pflanze muss eine festgelegte Basistemperatur erreicht werden, bevor das Wachstum beginnt. Über dieser Schwellentemperatur beschleunigt sich das Wachstum mit steigenden Temperaturen bis zu einer Optimaltemperatur. Steigt die Tagesmitteltemperatur über die Optimaltemperatur, verlangsamt sich das Wachstum bis zu einer Maximaltemperatur, oberhalb derer schließlich das Wachstum endet. Eine „Heat Unit“ (HU) ist dabei die Differenz aus der Mitteltemperatur eines bestimmten Tages und der pflanzenspezifischen Minimaltemperatur. Die Ausbildung bestimmter phänologischer Stadien erfolgt anhand pflanzenspezifischer kumulierter HU. Das Pflanzenwachstum erfolgt direkt proportional zur zugehörigen HU, begrenzt durch Stressbedingungen (Temperatur, Wasser-, Nährstoffmangel). Eine zentrale Stellung kommt dabei der Entwicklung des Blattflächenindex (LAI) zu. Alle übrigen Vegetationsgrößen (Biomasse, Ertrag, Wurzeltiefe, etc.) sowie die potenzielle Nährstoff- und Wasseraufnahme werden direkt oder indirekt in Abhängigkeit vom LAI berechnet.

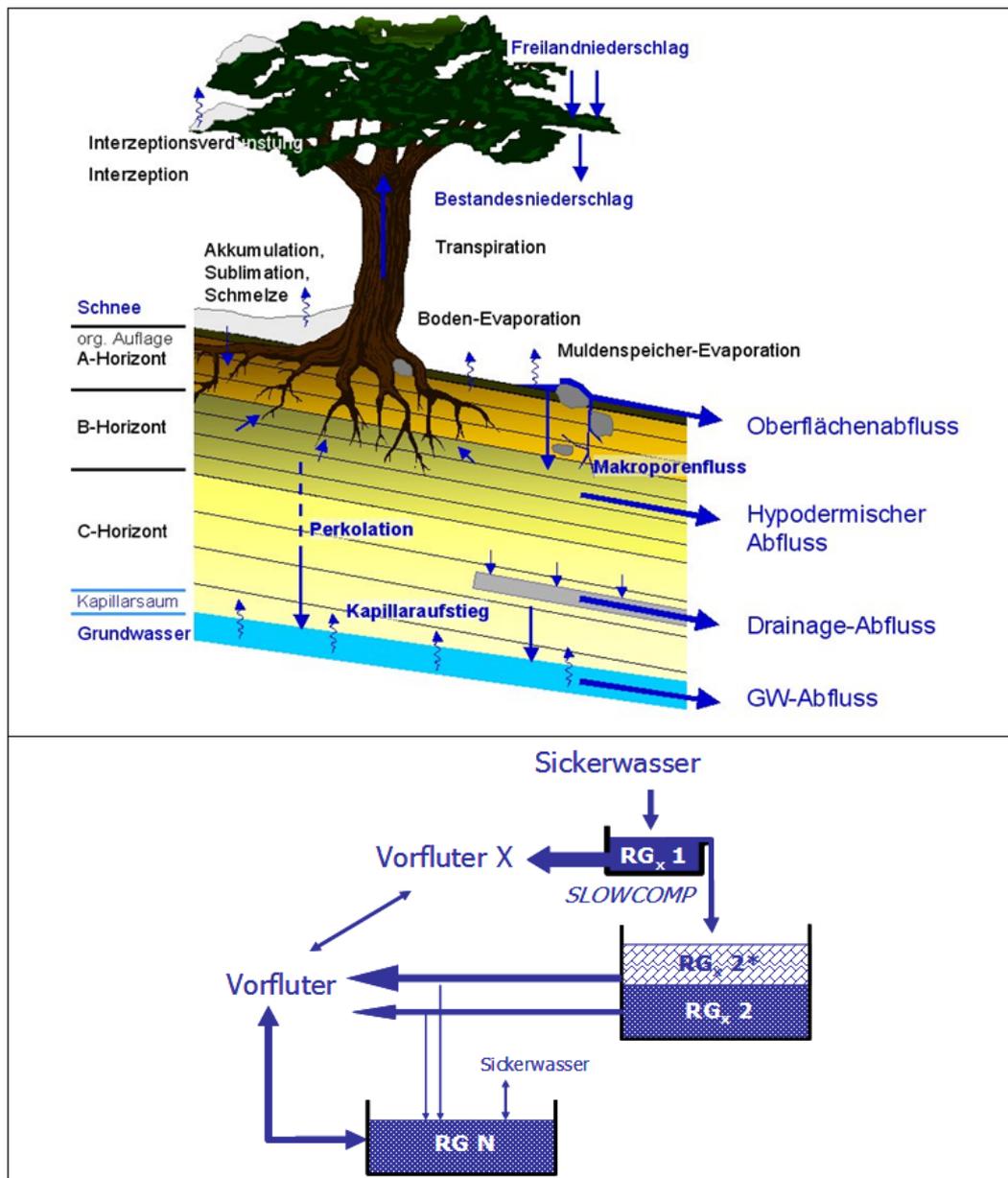


Abbildung 2.1: Simulation der Abflussbildung im Modul PSCN (oben) und nachgeschaltetes Einzel-linearspeichermodell der Abbildung der lateralen unterirdischen Flüsse (unten)

Bei den mehrjährigen bzw. den Winterfruchtarten erfolgt die Berücksichtigung der Vegetationspause im Winter bei Unterschreitung einer minimalen (sortenu-nabhängigen) Tageslänge T_D , die sich aus der kürzesten Tageslänge im Jahr für einen Standort plus einem vom Längengrad abhängigen Summanden ergibt.

Die Simulation der primär lateral gerichteten Prozesse untergliedert sich in die Modellierung der Konzentration des Oberflächenabflusses, der Grundwasserdyn-amik sowie der Abflussprozesse in den oberirdischen Gewässern. Letztere werden durch systemhydrologische Ansätze (Speicher-kaskaden, Kalinin-Miljukov-Verfahren von ROSEMANN und VEDRAL, 1971) auf Basis der Fließgewässerab-

schnitte und der diesen zugeordneten Teileinzugsgebieten modelliert. Insbesondere in größeren Gebieten mit der Möglichkeit, über Pegelmessreihen eine Modellkalibrierung vorzunehmen, haben sich hierfür Speicheransätze bewährt. Diese werden u. a. über die Länge und das Gefälle des Vorfluters als maßgebende und leicht aus GIS-Daten ableitbare Eigenschaften für die sich ausbildende Abflussdynamik parametrisiert.

Für die Simulation der Konzentration des Landoberflächenabflusses zum Vorfluter wird die kinematische Welle angewendet. Dieser Ansatz beschreibt die Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der aktuellen Effektivniederschlagshöhe, dem Geländegefälle und der Oberflächenrauheit (abhängig von der Flächennutzung).

Die Grundwasserkomponente wird über mehrere Einzelinearspeicher in einem Einzugsgebiet erfasst, die in Abhängigkeit von der Oberflächenmorphologie und ihrer Entfernung zum Vorfluter, vor allem aber in Abhängigkeit von der Hydrogeologie (Lithofazieskonzept – SCHWARZE et al., 2004) ein unterschiedliches Zeitverhalten aufweisen. Eine Beschreibung der einzelnen Teilmodelle gibt PFÜTZNER (2002).

2.2 Datengrundlagen

Das dieser Untersuchung zugrunde liegende Modell ArcEGMO-ST wurde in den Jahren 2005 bis 2007 erstellt. Gemäß der damaligen Zielstellung, hydrologische Grundlagen für die Umsetzung der WRRL zu liefern, wurde das Modell flächendeckend für das Land Sachsen-Anhalt aufgebaut und so ergänzt, dass wesentliche Oberflächenwasserkörper (OWK) im Zuständigkeitsbereich von Sachsen-Anhalt mit erfasst werden. Das Modellgebiet beträgt in etwa 27 000 km², von denen ca. 5 500 km² außerhalb Sachsen-Anhalts, d. h. in Sachsen, Thüringen, Brandenburg und Niedersachsen, liegen.

Abb. 2.2 zeigt das Modellgebiet mit den Oberflächenwasserkörpern und der für die Modellierung verwendeten Gliederung in oberirdische Einzugsgebiete.

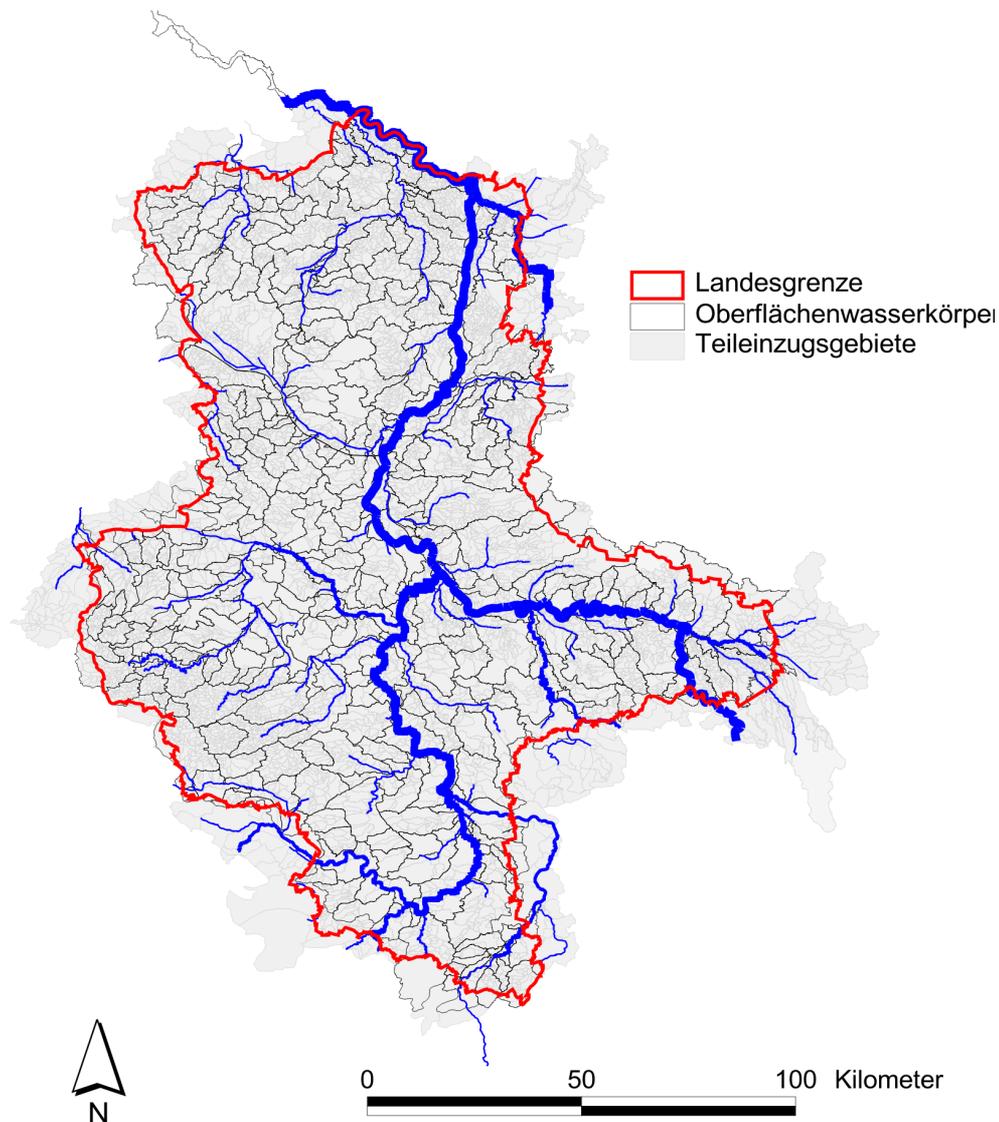


Abbildung 2.2: Teileinzugsgebiete und Oberflächenwasserkörper im Modellgebiet

Die dem Modell ArcEGMO-ST zu Grunde liegende Datenbasis beinhaltet für Sachsen-Anhalt die auf Landesebene verfügbaren (Stand 2007), räumlich und inhaltlich fundiertesten Daten (Tabelle 2.1). Die Aussagegenauigkeit dieser Daten bzw. ihre Auflösung liegt im Maßstab 1:50 000 und ist damit für Aussagen im Landesmaßstab sehr hoch. Dadurch werden Unsicherheiten in den Modellaussagen gemindert, die sich aus den Datenunsicherheiten ergeben.

Tabelle 2.1: Verwendete Datengrundlagen – Quellenangaben s. Kap. 6 ArcEGMO-ST

Datenart/-typ	Sachsen-Anhalt	Brandenburg	Thüringen	Sachsen	Niedersachsen
Höhenmodell	DGM10	DGM25, DGM des U.S. Geological Survey			
Boden	VBK50, BÜK200	BÜK200, BÜK300 oder BÜK1000			
Landnutzung	CIR ST	CIR BB	CIR T	CIR SN	ATKIS CORINE
Hydrogeologie	HÜk400	Hydrogeologische Übersichtskarten, Karten der GW-Leiterverteilungen, Karten der GW-Verhältnisse			
Gewässernetz und Einzugsgebiete			DLM 25 W		
Hintergrundinformation			TK10 bis TK50		

Für die angrenzenden Bundesländer musste teilweise auf geringer aufgelöste Daten zurückgegriffen werden.

Diese Grundlagendaten wurden für die Modellierung zu einem vektordatenbasierten GIS-Datenmodell verknüpft, das aus den folgenden Komponenten besteht:

1. Elementarflächen (bzw. Hydrotope) als Verschneidung/Kombination von Boden- und Landnutzungsinformationen mit Gefälleklassen sowie den hydrologischen Teileinzugsgebieten. Jedem Hydrotop wurden topographische Informationen wie mittlere Höhe, mittleres Gefälle und Exposition anhand des DGMs zugeordnet (1,35 Mio. Einzelflächen mit einer mittleren Größe von 0,02 km² und einer Gesamtfläche von 26 864 km²);
2. oberirdische Teileinzugsgebiete, (insgesamt 9 529 Teilgebiete mit einer mittleren Fläche von 2.8 km²),
3. Fließgewässerabschnitte FGW inklusive Gewässerknoten zur Abbildung von Bauwerken etc. (insgesamt 23 507 Abschnitte einer Gesamtlänge von 20 208 km und einer mittleren Länge von 900 m)
4. meteorologischen Stationen (23 Klimastationen und 262 Regenmesser, Niederschlag vom DWD korrigiert), ergänzt in Absprache mit dem DWD

durch weitere 46 Stationen (10 Klimastationen, 36 Regenmesser), die vom DWD im Rahmen des BMBF-Hochwasserforschungsprojektes „Extreme Hochwasserabflüsse und Kumul-Schadenspotentiale im Bodegebiet“ zur Verdichtung der Datenbasis im Bodeeinzugsgebiet zur Verfügung gestellt wurden.

Eine ausführliche Darstellung der Datengrundlagen und deren Aufbau findet sich in den zitierten Projektberichten (BAH, 2006, 2007). Zu Beginn der aktuellen Bearbeitung wurde diese Datengrundlage aktualisiert, da in den letzten Jahren Datengrundlagen entstanden sind, deren Einbeziehung belastbarere Modellergebnisse erwarten lassen.

Dies betrifft Drainagedaten aus dem Projekt *„Überprüfung und Validierung der Dränflächen Sachsen-Anhalts“*; Projektbericht MISB (Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und Bodenschutz) im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt

und Grundwasserflurabstände aus dem Projekt

„Ausweisung vernässungsgefährdeter Bereiche in Sachsen-Anhalt“ ; Projektbericht FUGRO-HGN im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt

Beide Datengrundlagen liegen jetzt landesweit und in einer räumlichen Differenzierung vor, dass Aussagen ebenfalls für den Maßstabsbereich 1:50 000 und damit analog zum bisherigen Datenmodell möglich sind. Beide Datengrundlagen wurden in das GIS-Datenmodell ArcEGMO-ST eingepflegt.

Ebenfalls aktualisiert wurde die Parametrisierung für den SLOWCOMP-Ansatz, anhand dessen die Abflusskonzentration im Grundwasser über Einzellinearspeicher beschrieben wird (SCHWARZE, 2009).

Eine weitere Aktualisierung erfolgte für die meteorologische Datenbasis unter Nutzung der Klimadatenbank des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt. Wie beschrieben, umfasst die Klimadatenbasis im 2007er Modell den Zeitraum 1971 bis 2003 für insgesamt 331 Stationen. Diese Datenbasis wurde bis einschließlich 2010 aktualisiert und durch Einbeziehung der Daten von 1951 bis 1970 verlängert.

Insbesondere die Aktualisierung der Klimadaten bis 2010 erlaubt nun, auch Pegel in die Modellkalibrierung einzubeziehen, die erst vor wenigen Jahren eingerichtet worden sind.

2.3 Basisparametrisierung des Modells

Die Parameter des hydrologischen Modells ArcEGMO-PSCN werden programmintern aus dieser GIS-Datenbasis ermittelt. So dient das digitale Höhenmodell als Grundlage für die Ableitung von flächen- und punktbezogenen Höhenwerten (Modul Meteorologie), linien- und flächenbezogenen Gefällewerten (Abflusskonzentration im Gewässer und auf der Landoberfläche, Strahlungsbilanz) und von flächenbezogenen Werten der Hangausrichtung bzw. des Aspekts (Modul Meteorologie - Strahlungsbilanz). Abb. 2.3 zeigt die Höhenverhältnisse im Modellgebiet.

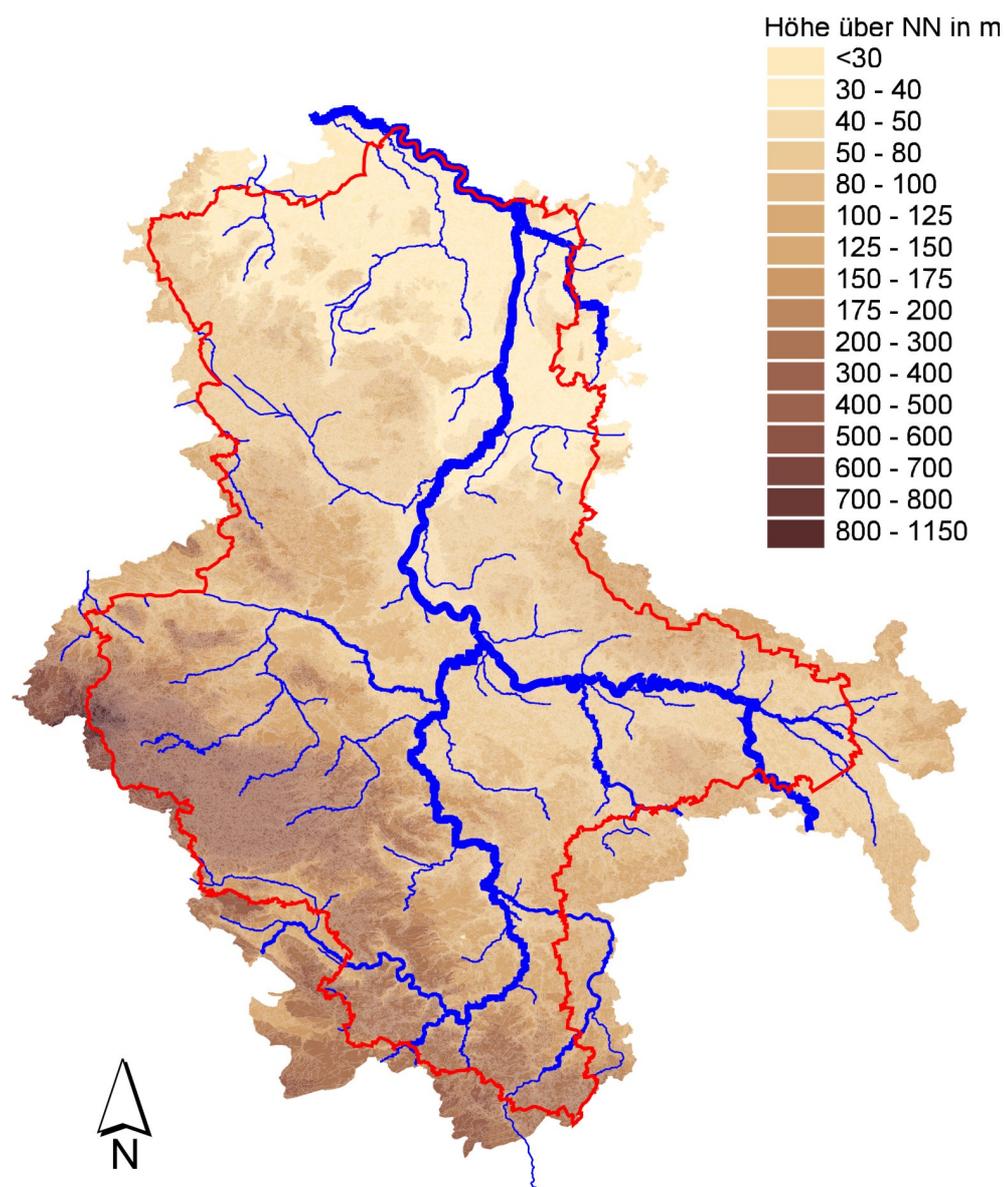


Abbildung 2.3: Höhenverhältnisse im Modellgebiet

Die Parametrisierung der Boden- und Nutzungsinformationen spielt eine zentrale Rolle innerhalb des Abflussbildungsmodells. Sie steuern die Grundwasserneubildung als Eingangsgröße in die Modellebene „Grundwasser“ und damit letztlich die Größe des Grundwasserzufflusses in die Fließgewässer. Sie steuern aber auch die Simulation der Infiltration und damit die Höhe des Landoberflächenabflusses als Eingangsgröße in die Modellebene „Direktabfluss“.

Die Datengrundlage für die Berücksichtigung der Landnutzung im Modellgebiet ist die CIR-luftbildgestützte Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung Sachsen-Anhalts.

Abb. 2.4 zeigt die vorherrschende Flächennutzung im Modellgebiet. Es dominieren die landwirtschaftlichen Nutzflächen mit 53 %. Etwa ein Viertel der

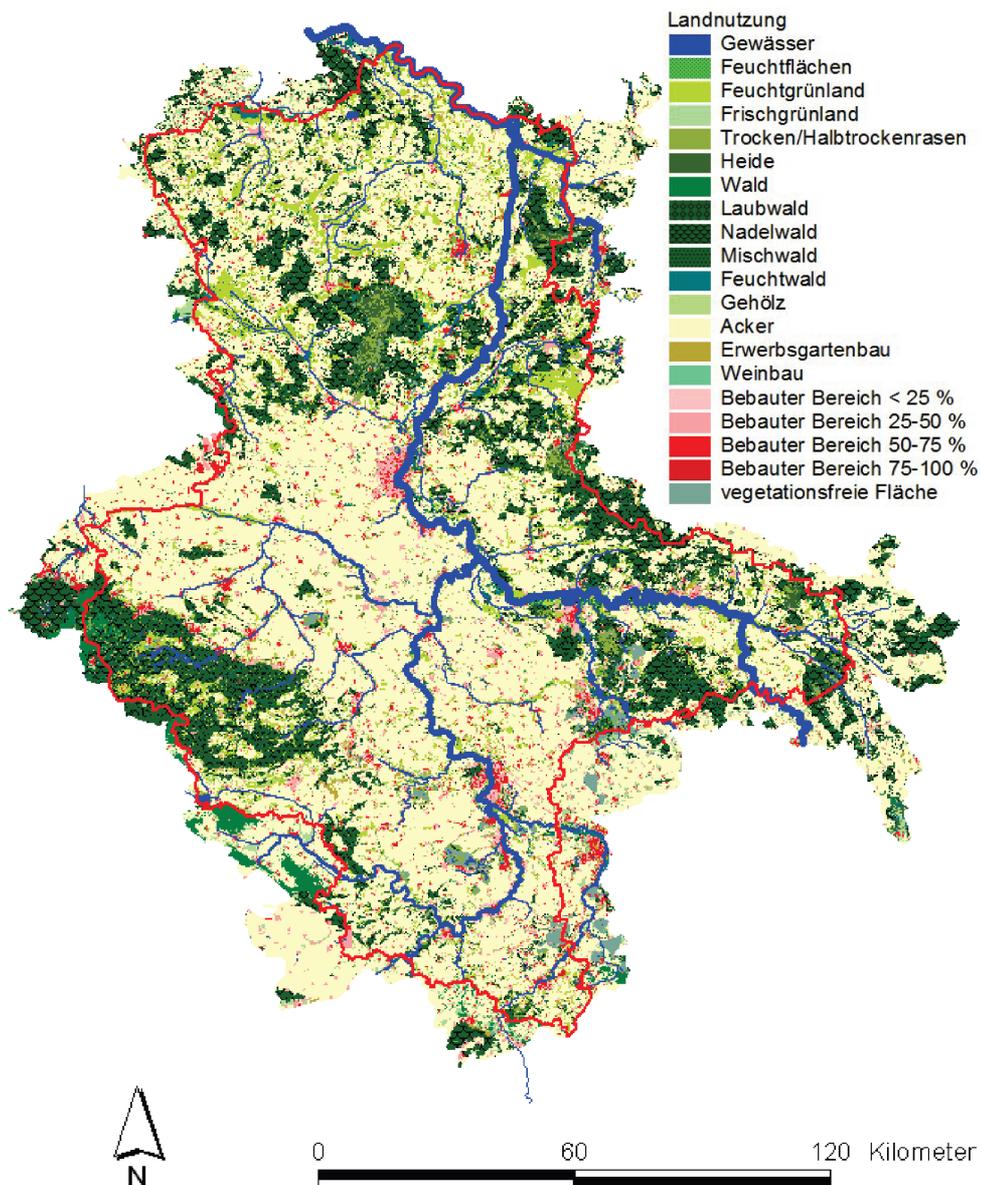


Abbildung 2.4: Landnutzung im Modellgebiet

Gesamtfläche besteht aus Wald, während der Grünlandanteil bei 15 % liegt.

Zur Charakterisierung der pedologischen Verhältnisse im Gebiet wurden für die hier verwendete 2007er Bodendatenbasis verschiedene, teils nur lokal verfügbare Datenbestände wie die Stadtbodenkarte Halle und die Kippenbodenkarte genutzt, um die damals noch vorhandenen Defizite in der VBK50 (vorläufige Bodenkarte M 1:50 000 als Vorläufer der BÜK50) auszugleichen.

Für die Parametrisierung des Bodenwasserhaushaltsmodells wurden die 5 700 Leitbodenprofile genutzt. Diese umfassen jeweils max. 7 Bodenschichten (Horizonte), die wiederum über ihre Mächtigkeit, Lagerungsdichte, Humus- und Skelettanteil, die hydraulische Leitfähigkeit und ihre Porosität (permanenter Welkepunkt, Feldkapazität und Gesamtporenvolumen) charakterisiert werden.

2.4 Modellierungsstrategie

Die notwendigen Modelluntersuchungen wurden räumlich und inhaltlich genet in verschiedenen Maßstabsebenen (Flussgebiete und Einzelstandorte) durchgeführt:

1. Detaillierte Bodenwasserhaushalts- und Vegetationsmodellierungen für repräsentative Standorttypen (Klima, Boden, Landnutzung)
2. Abflusssimulationen für repräsentative Einzugsgebiete für Landschaftsräume in Sachsen-Anhalt zur Modellkalibrierung und -validierung und zur detaillierten Analyse der NW- und HW-Kennwerte, des innerjährlichen Ganges usw.

Die Bearbeitung in den einzelnen Maßstabsebenen gliederte sich jeweils in folgende Abschnitte:

- a) Auswahl repräsentativer Standorttypen bzw. Einzugsgebiete für typische Landschaftsräume in Sachsen-Anhalt,
- b) Parametrisierung des hydrologischen Modells und Modellvalidierung,
- c) Analyse des Ist-Zustandes, der die Simulationsergebnisse umfasst, die mit den beobachteten meteorologischen Eingangsdaten ermittelt wurden,
- d) Simulation hydrologischer Größen unter Einfluss des Klimawandels,
- e) Statistische Auswertung der Ergebnisse,
- f) Abschätzung der Unsicherheit der Simulationsergebnisse.

In die Kalibrierung und Validierung der Modelle (siehe Kapitel 4.2) wurde in Abhängigkeit von den verfügbaren Pegelständen der Zeitraum 1951–2010 einbezogen. Genutzt wurden dafür gemessene Klimadaten.

Die Analyse des Ist-Zustandes erfolgte für den Zeitraum 1971–2010, ebenfalls unter Einbeziehung der gemessenen Klimadaten. Die Jahre 1961 bis 1970 dienten als Einschwingphase für das Modell.

Für die Simulation hydrologischer Größen unter Einfluss des Klimawandels basierten die klimatischen Eingangsgrößen auf einem Modellergebnis, das auf das SRES-Szenario¹⁾ A1B des gekoppelten großräumigen Atmosphären-Ozean-Modells ECHAM5/MPI-OM zurückzuführen ist. Aus diesem erfolgte mit WETTREG2010 eine Regionalisierung auf die lokale Skala, wobei insgesamt 10 Realisierungen mit verschiedenen Verfahren erzeugt wurden (KREIENKAMP et al., 2010). Demnach bilden die Ergebnisse in diesem Bericht nur eine mögliche Entwicklung ab. Unter Nutzung anderer Klimamodelle, Szenarien oder Regionalisierungsverfahren würden sich möglicherweise andere Ergebnisse ergeben.

Auf der Basis der Ergebnisse der WETTREG-Simulationen wurden die Wasserhaushalts- und Abflussverhältnisse für den Zeitraum 1961 bis 2100 simuliert und für die vier Zeiträume:

- 1971–2000 (Referenzzustand)
- 2011–2040
- 2041–2070
- 2071–2100

ausgewertet. Simuliert wurden die jeweils 10 WETTREG2010-Realisierungen angetrieben mit der Klimaprojektion aufgrund des Szenarios A1B mit dem Modell ECHAM5/MPI-OM. Die Bewertung der Modellunsicherheiten erfolgte nach 3 Kriterien:

1. Wie sind die Abweichungen der Modellsimulationen für den Ist-Zustand für ausgewählte Abflussmessreihen an Pegeln, die als repräsentativ für die ausgewählten Landschaftsräume gelten können? Mit diesen Analysen wird der Fehler bzw. die Abbildungsunschärfe des hydrologischen Modells charakterisiert.
2. Wie sind die Abweichungen der Modellsimulationen für den Referenzzustand (basierend auf den Ergebnissen der WETTREG2010-Simulation) vom Ist-Zustand (basierend auf den gemessenen Klimadaten)? Diese Analysen werden für den Referenzzeitraum 1971–2000 durchgeführt. Auf diese Weise wird der Fehler bzw. die Abbildungsunschärfe des Modells für die Klimaregionalisierung (WETTREG2010) charakterisiert.
3. Wie stark streuen die Ergebnisse zwischen den einzelnen Realisierungen der Klimaprojektion? Diese Analysen beschreiben die Spannweite innerhalb der Klimaprojektion.

Im Vordergrund der Ergebnisauswertungen stehen aber Analysen zu den Änderungen in den drei zukünftigen Zeiträumen gegenüber dem Referenzzustand.

¹⁾Sonderbericht des IPCC: NAKIĆENović et al. (2000)

2.5 Festlegung der zu betrachtenden Landschaftsräume

Die gewählte Methodik - genestete Modelluntersuchungen für repräsentative Standorttypen (Klima, Boden, Landnutzung) und repräsentative Einzugsgebiete für charakteristische Landschaftsräume in Sachsen-Anhalt - erfordert eine Gliederung, die die gegebene Vielfalt in den möglichen Betrachtungsebenen (u. a. Boden, Klima, Geologie) angemessen widerspiegelt.

Grundlage für die hier genutzten Landschaftsräume waren die neun von SCHRÖDER (1997) verwendeten naturräumlichen Einheiten (Abb. 2.5), die zu den in Tab. 2.2 und Abb. 2.5 aufgeführten aus hydrologischer Sicht relevanten 5 Landschaftsräumen zusammengefasst wurden.

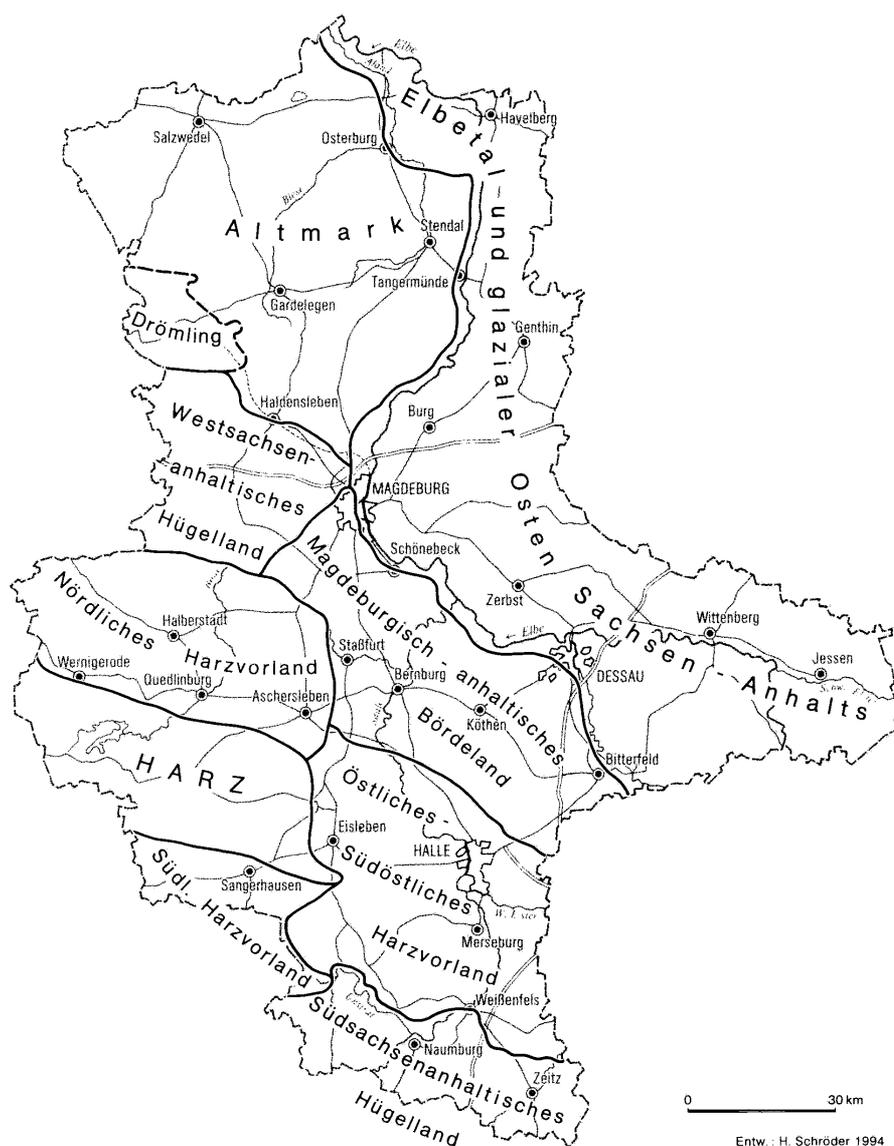


Abbildung 2.5: Naturräumliche Gliederung Sachsens-Anhalts (SCHRÖDER, 1997)

2.5 Festlegung der zu betrachtenden Landschaftsräume

Tabelle 2.2: Landschaftsraum und zugeordnete Naturräume

Landschaftsräume	Naturräume SCHRÖDER (1997)
Altmark und Drömling	
Elbetal und glazialer Osten	Elbeniederung, Dübener Heide, Fläming, Unteres Havelland)
Harz	Ober- und Unterharz und östlicher Harzabdachung
Schwarzerdegebiet	W.-Sachsenanhaltisches Hügelland, Magdeburgisch-anhaltisches Bördeland, Nördliches Harzvorland
Schwarzerderegion im Regenschatten des Harzes	Östliches, Südöstliches und Südliches Harzvorland, Südsachsenanhaltinisches Hügelland

3 Bodenwasserhaushalt und Vegetation

3.1 Festlegung der repräsentativen Standorttypen

Die Festlegung der repräsentativen Standorttypen für die in Tab. 2.2 aufgeführten Landschaftsräume Sachsen-Anhalts erfolgte gemeinsam mit den Fachbehörden des Landes Sachsen-Anhalt (LAGB, LAU, LLFG). In Erweiterung des ursprünglich geplanten Konzeptes auf der Basis der Boden-Klima-Räume nach ROSSBERG et al. (2007) wurden die Untersuchungsräume analog der von der LLFG und der Landgesellschaft Sachsen-Anhalt vorgeschlagenen Gliederung in Landwirtschaftliche Vergleichsgebiete (LVG) gewählt (Abb. 3.1).

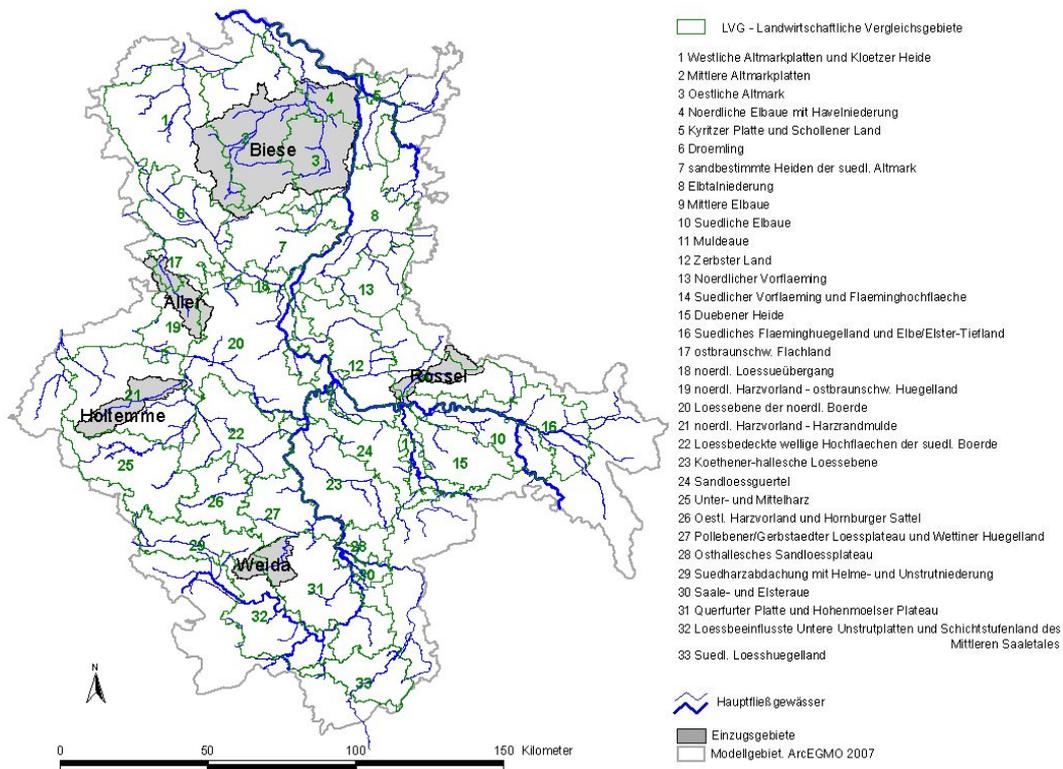


Abbildung 3.1: Landwirtschaftliche Vergleichsgebiete des Landes Sachsen-Anhalt und Referenzeinzugsgebiete

Nach Verschneidung dieser 33 LVG mit der räumlichen Datenbasis des Landesmodells ArcEGMO-ST erfolgte eine nutzungsspezifische Flächenstatistik bzgl. der Hauptbodenformen, der Höhenlage, Hangneigung und Hangausrichtung pro LVG. Dabei wurde zwischen Acker- und Grünlandflächen sowie forstlich genutzten Flächen unterschieden.

Pro LVG wurden anhand dieser Flächenstatistik durch das LAGB jeweils ein bis drei repräsentative Böden unter Acker-, Grünland und forstlicher Nutzung ausgewählt (s. Tabellenanhang Bodenwasserhaushalt). Besonders berücksichtigt wurden dabei die Böden der hydrologischen Referenzeinzugsgebiete, da hier anhand der parallel laufenden NA-Simulationen (Kapitel 4) eine Validierung der Untersuchungsergebnisse zum Bodenwasserhaushalt und der Sickerwasserbildung möglich ist. Die Zuordnung dieser Einzugsgebiete zu den Landschaftsräumen und den LVG gibt Tab. 3.1.

Außerdem wurden die in den FFH-Gebieten „Elbe-Aland Niederung“ und „Mahlpühler Fenn“ häufig vorkommenden Böden 1803–1863 (Gleye, Niedermoorböden, Braunerde-Podsol) in die Untersuchung mit aufgenommen (vgl. BIOTA-Bericht).

Für die Standorttypen wurden typische Flächennutzungen, unterteilt in die Hauptnutzungsarten Grünland, Acker und Forst, angenommen.

Anhand der Anbauspektren (Fruchtartenverteilung) in den LVG 2007–2009 wurde von der LLFG für jedes LVG eine zehngliedrige Fruchtfolge der Hauptfruchtarten auf den Ackerflächen erarbeitet (Tab. 3.2). Einbezogen wurden die Fruchtarten mit dem jeweils größten Flächenanteil:

WW - Winterweizen,

WR - Winterroggen,

WG - Wintergerste,

Ra - Winterraps,

M - Mais,

ZR - Zucker- und Futterrüben,

SG - Sommergetreide.

Die Festlegung der jeweiligen phänologischen Kennwerte und der Bewirtschaftungstermine erfolgte auf der Basis der Naturraumgruppen nach MEYNEN und SCHMITHÜSEN (1962) (vgl. Kapitel 3.2.2).

Tabelle 3.1: Zuordnung der Referenzeinzugsgebiete (EZG, s. Abbildung 3.1) zu den LVG und den Landschaftsräumen Sachsen-Anhalts

Landschaftsraum	EZG	Landwirtschaftliche Vergleichsgebiete
Altmark und Drömling	Biese	Westliche, mittlere und östliche Altmarkplatte (1–3) Nördliche Elbaue mit Havelniederung (4)
Elbetal und glazialer Osten Harz	Rosel Holtemme	Südlicher Vorflämung und Flämingshochfläche (14) Nördliches Harzvorland - Harzrandmulde (21)
Schwarzerdegebiet	Aller	Ostbraunschweiger Flachland (17) Nördl. Harzvorland - Ostbraunschw. Hügelland (19) Lößebene der nördlichen Börde (20)
Schwarzerderegion im Regenschatten des Harzes	Weida	Südharzabdachung mit Helme- und Unstrutniederung (29) Querfurter Platte und Hohenmöser Plateau (31) Lößbeeinflusste Untere Unstrutplatten und Schichtstufenland des Mittleren Saaletales (32)

Table 3.2: Zuordnung der LVG zu den Naturraumgruppen (NRG, s. Abbildung 3.4) in Sachsen-Anhalt mit je zehngliedriger Fruchtfolge

ID	LVG	NRG	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Westliche Altmarkplatten*	86	Ra	WW	ZR	M	WR	WG	Ra	WR	M	WR
2	Mittlere Altmarkplatten	86	Ra	WW	M	WR	WG	Ra	WR	M	WW	WR
3	Östliche Altmark	86	Ra	WW	M	WW	WG	Ra	WW	WR	M	WR
4	Nördliche Elbaue*	87	Ra	WW	M	WW	WG	Ra	WW	M	WW	WR
5	Kyritzer Platte*	62	WR	WR	M	WW	WR	M	WR	WR	SG	M
6	Drömling	86	Ra	WW	M	WR	WR	M	WR	WR	WG	WR
7	Heiden der südl. Altmark*	87	Ra	WW	M	WR	WR	M	WR	WR	WG	WR
8	Elbtalniederung	88	Ra	WW	M	WW	WR	Ra	WR	M	WG	WR
9	Mittlere Elbaue	88	Ra	WW	ZR	M	WW	WR	Ra	WW	WW	WG
10	Südliche Elbaue	85	Ra	WW	M	WW	WR	Ra	WW	WG	M	WW
11	Mulde	85	Ra	WW	WR	M	WW	WG	Ra	WW	WR	WG
12	Zerbster Land	88	Ra	WR	M	WW	WR	Ra	WW	WR	WG	WW
13	Nördlicher Vorfläming	85	Ra	WR	M	WR	WR	M	WW	WR	WG	WR
14	Südlicher Vorfläming*	62	Ra	WR	M	WR	WR	Ra	WW	WR	WG	WR
15	Dübener Heide	51	Ra	WR	M	WR	WR	M	WW	WR	WG	WR
16	Elbe/Elster-Tiefenland*	50	Ra	WR	M	WR	WR	M	WW	WR	WG	WR
17	Ostbraunsch. Flachland*	51	Ra	WW	ZR	M	WW	WR	Ra	WW	WG	WR
18	Nördlicher Lößübergang	50	Ra	WW	ZR	M	WW	WR	Ra	WW	WG	WW
19	Nördliches Harzvorland*	50	Ra	WW	WW	ZR	M	WW	WW	WG	WW	WW
20	Lößebene d. nördl. Börde	38	Ra	WW	WW	ZR	M	WW	WG	Ra	WW	WW
21	Nördliches Harzvorland*	50	Ra	WW	WW	ZR	M	WW	WG	Ra	WW	WW
22	Lößbedeckte wellige Hochflächen der südlichen Börde	48	Ra	WW	WW	ZR	M	WW	WG	Ra	WW	WW
23	Köthener-Hallesche Lößebene	46	Ra	WW	WW	ZR	M	WW	WG	Ra	WW	WW
24	Sandlößgürtel	46	Ra	WW	WW	WG	M	WW	WG	Ra	WW	WR
25	Unter- und Mittelharz	87	Ra	WW	WW	WG	Ra	WW	WW	WG	WR	SG
26	Östliches Harzvorland*	87	Ra	WW	WR	M	WW	WW	WG	Ra	WW	SG
27	Lößplateau und Wettiner Hügelland*	88	Ra	WW	WW	ZR	M	WW	WW	Ra	WW	WG
28	Osthallesches Sandlößplateau	85	Ra	WW	WW	WG	ZR	SG	WW	Ra	WW	WW
29	Helme-/Unstrutniederung*	86	Ra	WW	M	WW	WW	Ra	WW	WG	Ra	WW
30	Saale- und Elsteraue	86	Ra	WW	ZR	M	WG	WW	SG	Ra	WW	WG
31	Querfurter Platte*	88	Ra	WW	ZR	M	WW	WW	WG	Ra	WW	WW
32	Untere Unstrutplatten und Schichtstufenland des Mittleren Saaletales*	88	Ra	WW	WW	WG	M	WW	WW	Ra	WW	SG
33	Südliches Lößhügelland	38	Ra	WW	WW	M	WW	WW	WG	Ra	WW	WG

* kompletter Name s. Abb. 3.1

Die Simulation des Wasserhaushalts der forstlich genutzten Böden erfolgte durch Zuordnung der LVG zu den Forstlichen Wuchsgebieten Sachsen-Anhalts (Tab. 3.3 auf Seite 23, Abb. 3.4 auf Seite 27). Pro LVG wurden entsprechend ihrer Lage in den Wuchsgebieten der derzeit dominierende Nadelholzbestandestyp (mittleres Umtriebsalter) und eine standortangepasste Laub- oder Mischwaldform berücksichtigt.

Aufgrund der unterschiedlichen Raumgliederung bei der Ausweisung der LVG und der forstlichen Wuchsgebiete konnte nicht immer eine exakte Zuordnung erfolgen. LVG an den Grenzen benachbarter Wuchsgebiete wurden dem Wuchsgebiet mit dem größten Flächenanteil zugeordnet.

Tabelle 3.3: Forstliche Wuchsgebiete mit Ausdehnung und Anzahl der Wuchsbezirke (WB) in Sachsen-Anhalt, Haupt-Bestandestypen und -zieltypen (IDSA - Landesschlüssel, TEI - Traubeneiche, HBU - Hainbuche)

IDSA	Wuchsgebiet	Fläche [km ²]	Anzahl WB	IVG	Bestandstyp	Bestandszieltyp
11	Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland	838	7	5	Kiefer(Stieleiche)	Blaubeer-TEI-Kiefernwald
13	Ostniedersächsisch-Altmarkisches Altmoränenland	3849	16	1, 2, 4, 6	Kiefer	Blaubeer-Buchen-Kiefernwald
14	Mittleres Nordostdeutsches Altmoränenland	5234	18	3, 7-13, 15, 16, 18, 24	Kiefer	Hainrispengras-HBU-Linden-Eichenwald
16	Hoher Fläming	601	3	14	Kiefer (Buche)	Hainrispengras-TEI-Buchenwald
21	Nordwestliches Harzvorland	1222	4	17, 19, 21	Kiefer, Buche (Eiche)	Perlgas-HBU-TEI-Buchenwald
22	Nordöstliche Harzvorländer	1914	4	22, 27	Buche, Eiche	Goldnessel-HBU-Linden-Traubeneichenwald
23	Sachsen-Anhaltinische Löß-Ebene	3529	7	20, 23, 29, 30, 31	Eiche	HBU-Linden-Traubeneichenwald
25	Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland	362	1	33	Buche, Eiche	Goldnessel-HBU-TEI-Buchenwald
30	Nördliche Randplatten des Thüringer Beckens	1297	7	29, 32	Eiche (Buche)	Goldnessel-HBU-Linden-Traubeneichenwald
40	Harz	1396	7	25, 26	Fichte (Buche)	Hainsimsen-Buchenwald

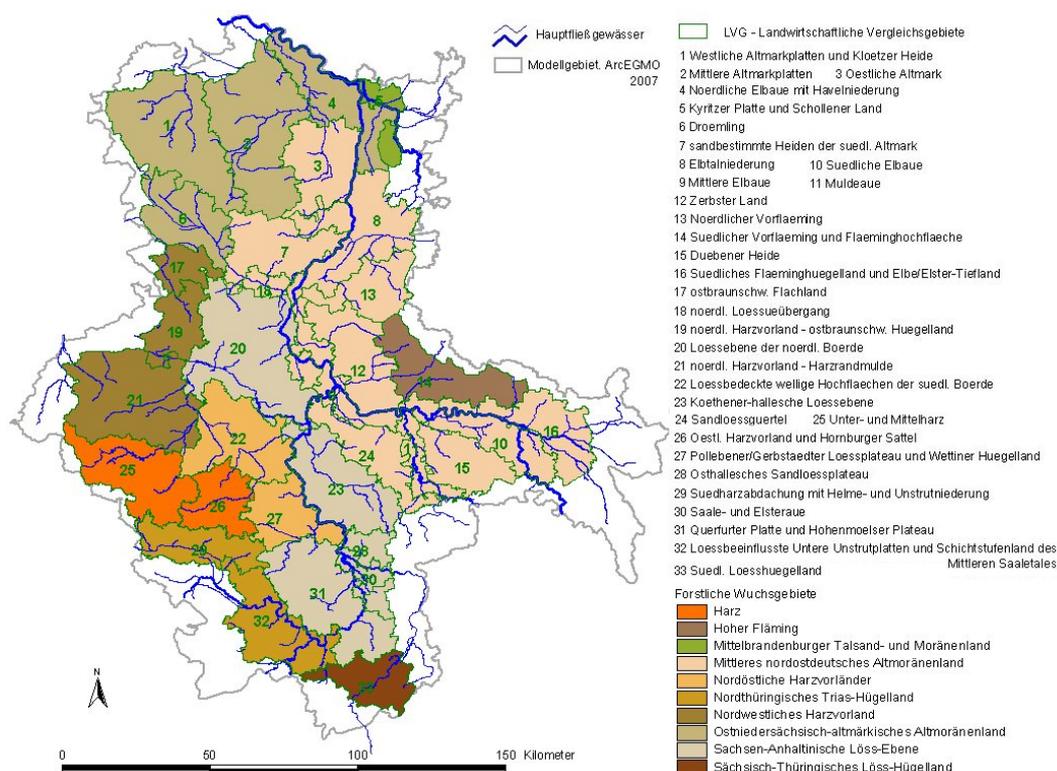


Abbildung 3.2: Zuordnung der Forstliche Wuchsgebiete im Land Sachsen-Anhalt zu den LVG

Insgesamt wurden so 222 Klima-Boden-Landnutzungskombinationen ausgewählt. Für die Beschreibung der meteorologischen Situation wird vom LVG-Mittel ausgegangen, wobei die landnutzungsspezifische Höhenlage berücksichtigt wird. Dadurch unterscheiden sich auch innerhalb eines LVG die untersuchten Hauptlandnutzungstypen hinsichtlich der klimatischen Bedingungen. Ackerbauliche Nutzung findet sich zumeist in mittleren Höhenlagen, forstliche Nutzung insbesondere in den steileren Hochlagen mit höheren Niederschlägen und geringeren Lufttemperaturen (s. WETTREG2010-Analysen im Kapitel 3.4.1). Die Tabellen im Anhang zeigen die LVG mit den nutzungsabhängigen mittleren topographischen Eigenschaften und den zugeordneten Böden.

Tab. 3.4 gibt einen Überblick über die berücksichtigten Bodentypen, über ihre räumlichen Verteilung entsprechend der Gliederung in LVG und ihre vorrangige Nutzung. Pro Bodentyp werden unterschiedliche Bodenformen in die Untersuchung einbezogen, teilweise mehrfach in unterschiedlichen LVG. Entsprechend der Häufigkeit ihres Vorkommens in Sachsen-Anhalt bekommen insbesondere Braunerde-Podsole, Braunerden, Schwarzerden, Podsol-Braunerden, Gleye und Auenböden einen hohen Stellenwert bei der Untersuchung. Diese Böden sind in Tab. 3.4 dunkel hinterlegt. Die semiterrestrischen, also grundwasserbeeinflusste Böden (Gleye und Auenböden) werden vorrangig als Grünland genutzt. Deren Modellierung erfordert eine angemessene Abbildung der Grundwasserflurabstände (GWFA).

3.1 Festlegung der repräsentativen Standorttypen

Tabelle 3.4: Klassifizierung der berücksichtigten Bodenformen und Verteilungsmatrix mit dominierenden Landnutzungen

Abteilung	Klasse	Typ	Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	Insgesamt	Bodenformen				
Terrestrische	Braunerden	BB	Braunerde	1																																						
		BB-LF	Braunerde-Fahlerde	1	2	3																																				
		BB-TT	Braunerde-Tschernosem	1	2	3																																				
	Podsole	BB-PP	Braunerde-Podsol	1	2	3	4	5		6	7	8																														
		PP-BB	Podsol-Braunerde		2																																					
	Lessives	PP	Fahlerde																																							
		LL	Parabraunerde																																							
	Ahr-C	RQ	Regosol				4																																			
		RR	Rendzina																																							
	Schwarzerden	RZ	Pararendzina																																							
TT		Tschernosem																																								
SS		Pseudogley																																								
SS-BB		Pseudogley-Braunerde																																								
Semiterrestrische	Auenböden	AB	Vega									9																														
		GG	Gley	1	2	3			6																																	
	Gleye	GG-AB	Gley-Vega																																							
		GG-AT	Gley-Tschernitza																																							
		GG-BB	Gley-Braunerde																																							
	Stauwasserböden	GG-SS	Gley-Pseudogley																																							
		GG-TT	Gley-Tschernosem																																							
Moore	Natürliche Moore	GM	Anmoorgley																																							
		FN	Niedermoor	1	2																																					

dominierende Landnutzung:
 Acker
 Grünland
 Forst
 FFH-relevantes Grünland

3.2 Parametrisierung

3.2.1 Böden und Grundwasserflurabstände

Die Parametrisierung der untersuchten Böden wurde aus den Angaben zu den Leitbodenprofilen der VBK50 (s. Kapitel 2.2) übernommen. In Hinblick auf eine bessere Vergleichbarkeit wurde jeweils von einem 2 m Profil ausgegangen. Dazu wurde die in der VBK50 angegebene Dicke der untersten Bodenschicht entsprechend angepasst. Ausgenommen wurden dabei nur felsunterlagerte Standorte.

Die Beschreibung der Grundwasserbeeinflussung erfolgte anhand der in der Bodenformendatenbank der VBK50 enthaltenen Angaben zum Schwankungsbereich des Grundwassers für die einzelnen Leitbodenprofile. Pro Bodeneinheit sind hier in Abhängigkeit von der Nutzung der mittlere Grundwasserhochstand (MHGW) und der mittlere Grundwassertiefstand (MNGW) angegeben. Die in die Untersuchung einbezogenen grundwasserbeeinflussten Böden wurden auf der Basis dieser Werte in zehn Klassen unterteilt. Für jede Klasse wurde ein mittlerer Jahresgang des Grundwasserflurabstandes zwischen dem MNGW in Absenkerungsperioden (Hoch- und Spätsommer) und dem MHGW in Zeiten geringer Flurabstände (Februar bis März) abgeleitet (Abb. 3.3).

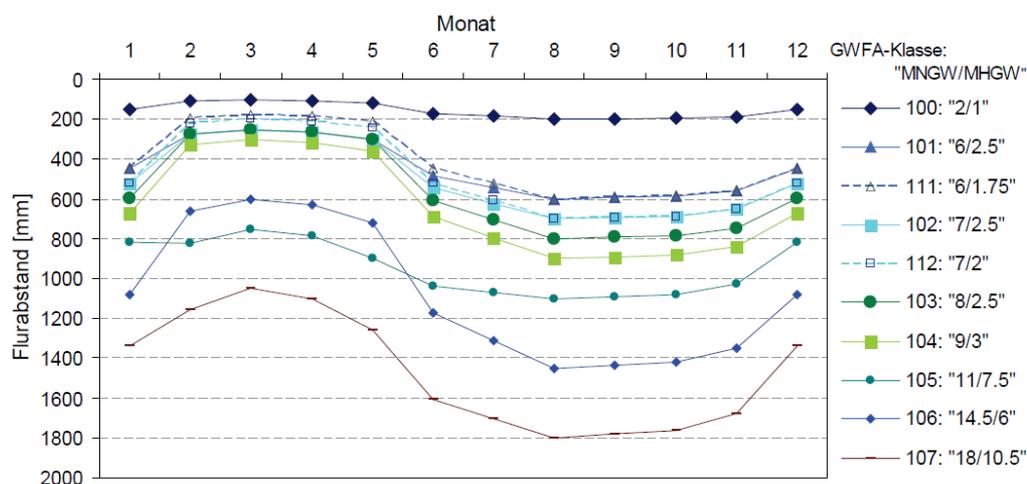


Abbildung 3.3: Synthetisierter Jahresgang des GWFA für 10 GWFA-Klassen (MNGW: mittlerer Grundwassertiefstand, MHGW: mittlerer Grundwasserhochstand)

3.2.2 Phänologie und Bewirtschaftung

Die Simulation der Vegetationsdynamik erfolgte mit einem generischen Ansatz in Abhängigkeit von den aktuellen Umweltbedingungen (vgl. Kapitel 2.1). Durch den breiten Einsatz dieses Vegetationsmodells stehen für fast alle Kulturarten geprüfte pflanzenspezifische Parametersätze zur Verfügung. Die vom USDA publizierte Parametersammlung (<http://www.brc.tamus.edu>) enthält u. a. die Daten für Winterweizen, Silomais, Winterroggen, Wintergerste und Sommergerste.

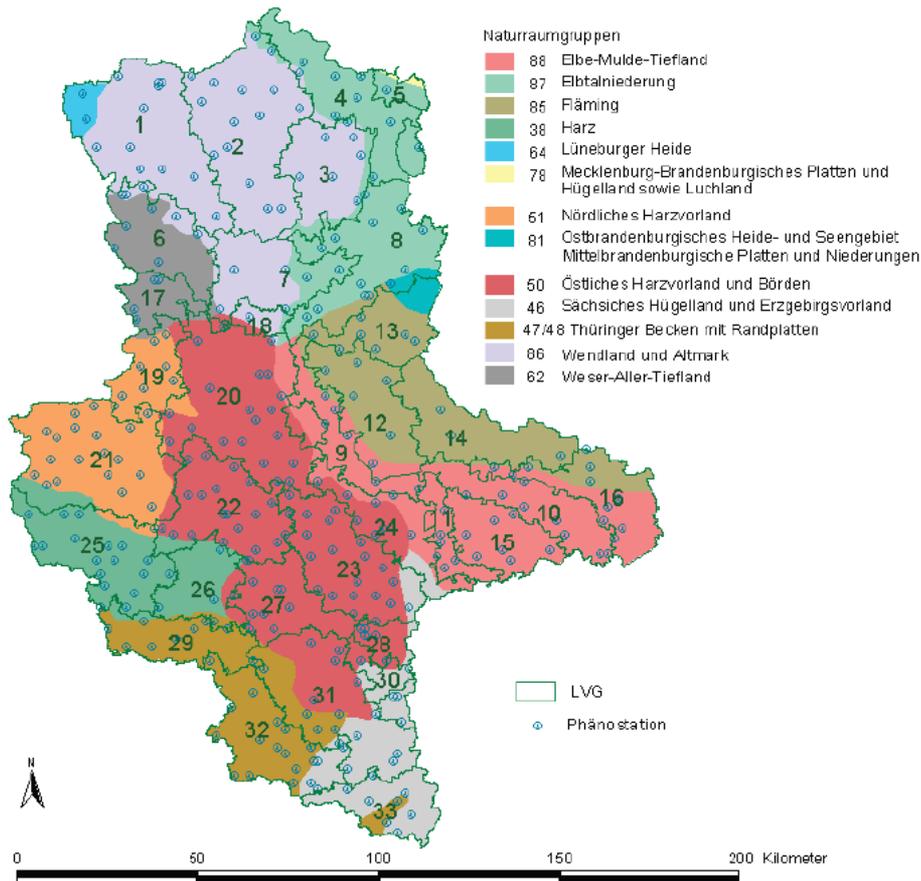


Abbildung 3.4: Phänologische Stationen und Naturraumgruppen in Sachsen-Anhalt

te. Jedoch ist eine Überprüfung dieser Parameter für die Standortbedingungen in Sachsen-Anhalt erforderlich. Außerdem müssen standortspezifisch für jede Fruchtart die erforderlichen Wärmeeinheiten (HU) bis zur Reife und die Basistermine zum gegenwärtigen Management erarbeitet werden.

Als Basis wurden hierfür die vom Deutschen Wetterdienst seit 1951 erhobenen Beobachtungsdaten des phänologischen Grundnetzes genutzt. Dieses besteht zurzeit aus ca. 1 300 aktiven Stationen. Das Programm der phänologischen Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes enthält 167 Phasen (Entwicklungsstadien). An ausgewählten Bäumen, Sträuchern und Stauden werden z.B. Blatentfaltung, Blüte, Fruchtreife und Laubverfärbung beobachtet; bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen werden neben ausgesuchten Entwicklungsstadien auch Daten zu Bestellung und Ernte erhoben²⁾.

Insgesamt standen für die untersuchten Fruchtarten Beobachtungsdaten für den Zeitraum 1991–2010 (Sommergetreide 1951–1991) an einer Vielzahl von phänologischen Beobachtungsstationen in Sachsen-Anhalt zur Verfügung (Abb. 3.4). Da sowohl Beobachtungszeitraum als auch das Fruchtartenspektrum

²⁾Siehe http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_phaenologie&activePage=&_nfls=false

an den einzelnen Stationen sehr unterschiedlich ist, wurden die Daten für die phänologischen Naturraumgruppen (NRG) nach MEYNEN und SCHMITHÜSEN (1962) zusammengefasst und fruchtartspezifisch analysiert. Durch Zuordnung der LVG zu den Naturraumgruppen konnten somit der mittlere Wärmebedarf als auch durchschnittliche Saat- und Erntetermine für die einzelnen Fruchtarten bestimmt werden.

Bei der Zuordnung der LVG zu den NRG wurde wie bei den Wuchsgebieten vorgegangen. LVG an den Grenzen benachbarter NRG wurden der NRG mit dem größten Flächenanteil zugeordnet (s. Tab. 3.2).

3.3 Simulation des Bodenwasserhaushalts

3.3.1 Modellvalidierung

Zur Analyse der bisherigen und zukünftigen Veränderungen des Bodenwasser- und Grundwasserhaushaltes der 222 Klima-Boden-Landnutzungskombinationen unter dem Einfluss des Klimawandels erfolgte eine deterministische, zeitlich hoch auflösende Modellierung (Tagesschritte) des Wasserhaushalts mit ArcEGMO-PSCN. Die Phänologie der Pflanzenbestände auf den forstwirtschaftlich und ackerbaulich genutzten Flächen wurde dabei mit dem dynamisch rückgekoppelten Pflanzenmodell VEGEN simuliert. Die Simulation des Wasserhaushaltes der Böden unter Grünland erfolgte mit einem statischen Vegetationsansatz ohne Berücksichtigung der Phänologie. Das bedeutet, dass hier die innerjährliche Veränderung der Durchwurzelungstiefe und der Biomasse vernachlässigt werden. Als maximale Durchwurzelungstiefe wurde 0.5 m angenommen.

Wasserhaushaltssimulationen in den Referenzgebieten (Tab. 3.2) auf der Basis der beobachteten Witterung dienten u. a. der Überprüfung der Vegetationsparametrisierung. In allen fünf Gebieten konnte mit der vorgenommenen Parametrisierung des PSCN-Modells eine gute Übereinstimmung zwischen beobachteten und simulierten Gewässerabflüssen erreicht werden (vgl. Kapitel 4.2). Daraus wird abgeleitet, dass die simulierten Verdunstungs- und Grundwasserneubildungsraten der für die dort vorkommenden Klima-Boden-Landnutzungskombinationen vertrauenswürdig für den Ist-Zustand (1971–2010) sind.

3.3.2 Modellierung unter Szenariobedingungen

Die Wasserhaushaltssimulation erfolgte mittels der Klimadaten, die sich aus den 10 Realisierungen auf der Basis von WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B ergaben. Ausgewertet wurden folgende vier Zeiträume für alle 10 Realisierungen:

- 1971–2000 (Referenzzustand)
- 2011–2040

- 2041–2070
- 2071–2100

Untersucht wurden die Veränderungen von Verdunstung, Bodenwasservorrat sowie der Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, laterale Abflüsse aus der Bodenzone und Sickerwasserbildung als Quelle der Grundwasserneubildung der drei Zukunftsperioden gegenüber dem Referenzzustand.

Es erfolgte eine Analyse der Ergebnisse hinsichtlich der

- Häufigkeit, Dauer und Intensität von Abflussbildungsereignissen (primär Grundwasserneubildung),
- Häufigkeit und Dauer von landwirtschaftlichen Dürreperioden (pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt der Hauptwurzelzone beträgt weniger als 30 % der nutzbaren Feldkapazität nFK),
- Häufigkeit und Dauer von Sättigungsperioden (Bodenwassergehalt der Hauptwurzelzone übersteigt 90 % der Feldkapazität FK).

Als Hauptwurzelzone wurde für landwirtschaftlich genutzte Flächen der oberste Bodenbereich bis zu einer Tiefe von 1 m, und für Forstflächen bis zur Tiefe von 1,5 m angenommen.

Aufgrund der unterschiedlichen Standortbedingungen für die Nutzungsformen hinsichtlich der topographischen (und damit klimatischen) Randbedingungen und der bewirtschafteten Böden auch innerhalb der LVG erfolgte die Auswertung getrennt für die drei Hauptnutzungsarten Acker, Grünland und Forst. Damit ist eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse für den jeweiligen Nutzungstyp gegeben.

Die Simulationsergebnisse liegen als Tageswerte der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten (Tab. 3.5) und den daraus abgeleiteten statistischen Kenngrößen und Mittelwerten für größere Zeitabschnitte pro Zukunftsperiode, Realisierung und Landnutzung vor.

Die Streuung der zehn Realisierungen der WETTREG2010-Simulation wird bei der Ergebnisdarstellung über die in der Statistik häufig als Streuungsmaße verwendeten Quartile (lat. „Viertelwerte“) erfasst. Quartile teilen eine der Größe nach geordnete Datenmenge in vier Teile. Der Abstand zwischen dem 1. und dem 3. Quartil wird als Interquartilabstand bezeichnet und umfasst 50 % der Verteilung (s. Skizze in Tab. 3.6 auf S. 31). Bei den folgenden Abbildungen in Kapitel 3.4 ist als Ergebnis für eine Periode immer der Median (d. h. das 2. Quartil) aus den 10 Klimarealisierungen dargestellt, teilweise ergänzt um die übrigen Quartile.

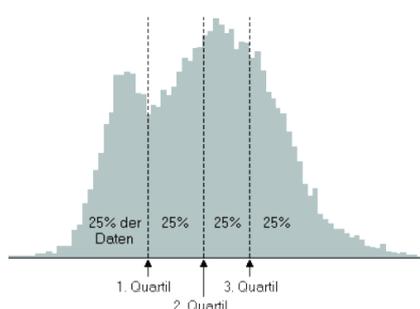
Tabelle 3.5: Ergebnisgrößen der Wasserhaushaltssimulation

Wasserhaushaltsgröße	Dimension	Kürzel / Dateierweiterung
Niederschlag	[mm/Zeitschritt]	pit
Lufttemperatur	[°C]	ep
Gras-Referenzverdunstung GRV	[mm/Zeitschritt]	epkor
potenzielle Verdunstung (nutzungsabhängig)	[mm/Zeitschritt]	er
reale Verdunstung	[mm/Zeitschritt]	AnFK100
Bodenfeuchte bis 1 m Tiefe (Hauptwurzelraum unter Acker) im Verhältnis zur nutzbaren Feldkapazität nFK	[%]	AnFK150
Bodenfeuchte bis 1,5 m Tiefe (Hauptwurzelraum unter Forst) im Verhältnis zur nFK	[%]	AFK100
Bodenfeuchte bis 1 m Tiefe (Hauptwurzelraum unter Acker) im Verhältnis zur Feldkapazität FK	[%]	AFK150
Bodenfeuchte bis 1,5 m Tiefe (Hauptwurzelraum Forst) im Verhältnis zur FK	[%]	
Landoberflächenabfluss	[mm/Zeitschritt]	ro
Zwischenabfluss	[mm/Zeitschritt]	inter
Sickerwasser	[mm/Zeitschritt]	gwn

Tabelle 3.6: Erklärung der Quartile

Quartil Beschreibung

- 0 Minimalwert
- 1 das untere Quartil (25%-Quantil)
- 2 Median (50%-Quantil)
- 3 das obere Quartil (75%-Quantil)
- 4 Maximalwert



3.4 Ergebnisse

3.4.1 Klimatische Bedingungen

Wie Abb. 3.5 für den Referenzzeitraum zeigt, bestehen hinsichtlich der mittleren Lufttemperaturen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Landwirtschaftlichen Vergleichsgebieten und den Nutzungsräumen innerhalb dieser LVG.

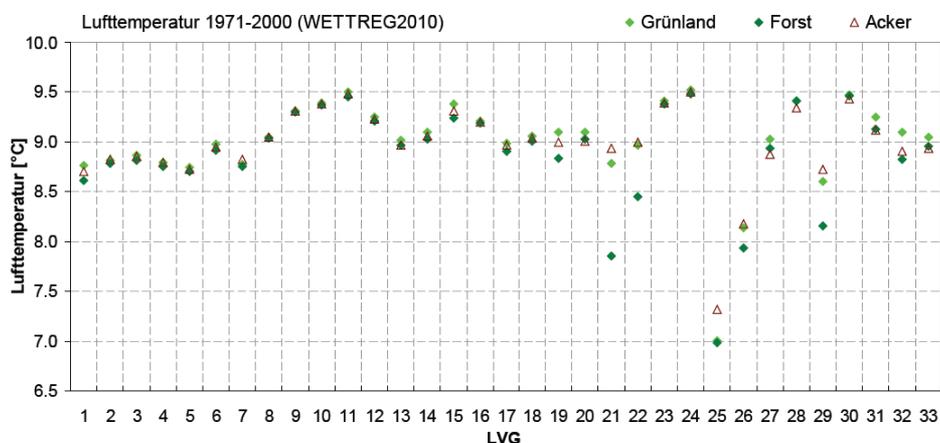


Abbildung 3.5: Jahresmittel der Lufttemperatur 1971–2000 (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete (LVG) und Nutzungsarten

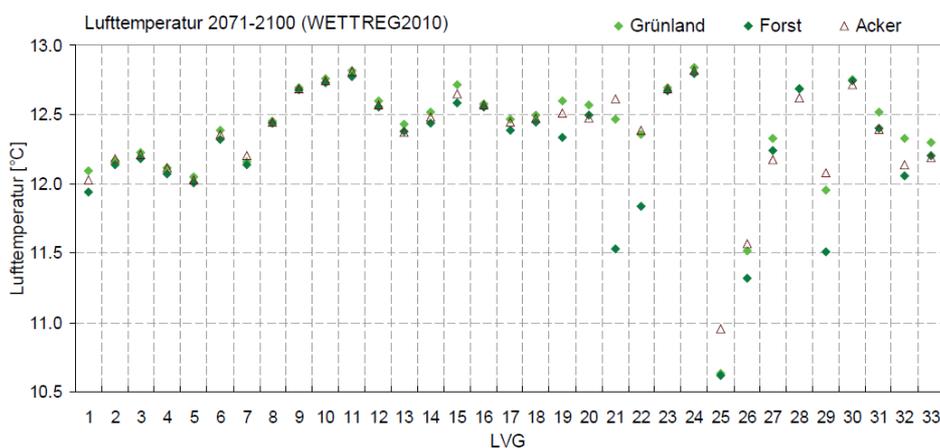


Abbildung 3.6: Jahresmittel der Lufttemperatur 2071–2100 (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete (LVG) und Nutzungsarten

Insbesondere in der Harzregion (LVG 21, 22, 25, 26, 29, vgl. Abb. 3.6) können die Lufttemperaturwerte der landwirtschaftlich genutzten Gebiete um bis zu 1 K über den Werten der Forstflächen in den Hochlagen liegen. Diese Unterschiede bleiben auch bei den insgesamt deutlich angestiegenen Temperaturen in der Periode 2071–2100 erhalten (Abb. 3.6).

Beim Niederschlag zeigt sich ein ähnliches Bild (Abb. 3.7, Abb. 3.8). Neben der Verringerung der mittleren Niederschlagsmengen um 17 bis 82 mm/a ist in der Periode 2071–2100 in vielen LVG auch eine Abnahme der Streuung der Niederschlagswerte aus den 10 WETTREG2010-Realisierungen festzustellen.

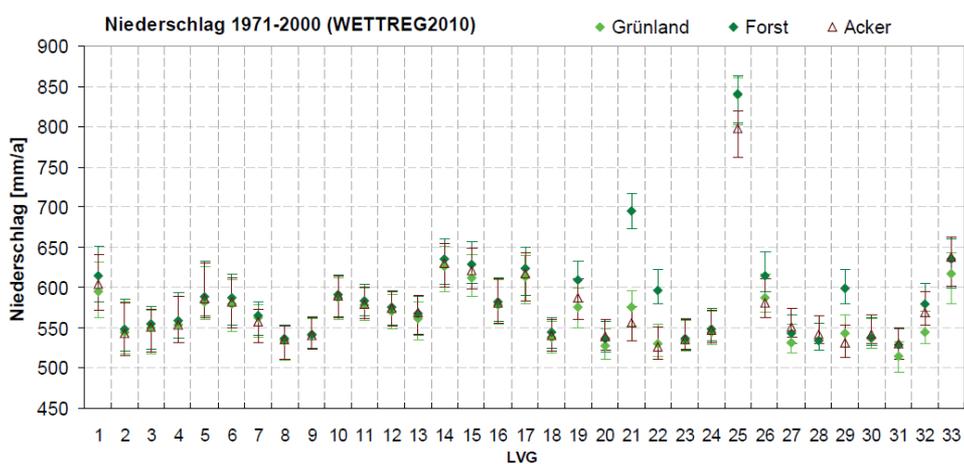


Abbildung 3.7: Jahresniederschlag 1971–2000 (Median, Minima und Maxima der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten

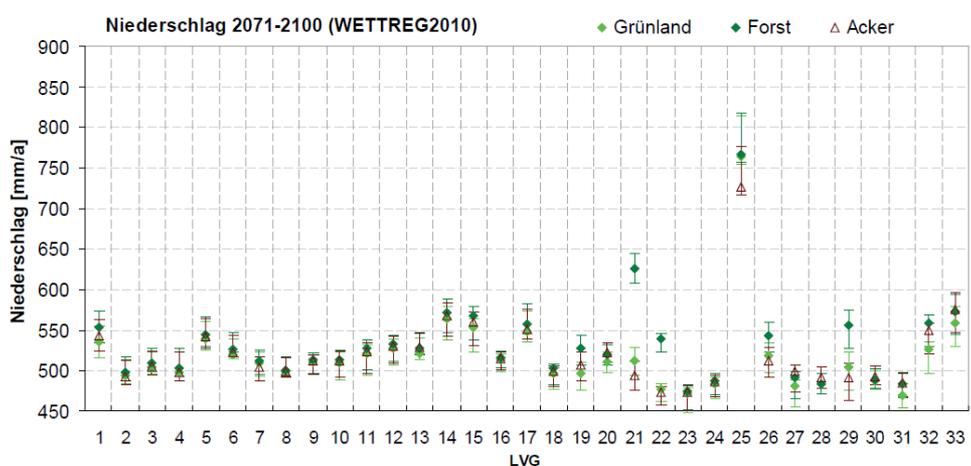


Abbildung 3.8: Jahresniederschlag 2071–2100 (Median, Minima und Maxima der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten

Eine häufig genutzte Kenngröße zur Charakterisierung der hydrometeorologischen Situation eines Gebietes ist die Klimatische Wasserbilanz (KWB). Sie wird aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration (hier

Gras-Referenzverdunstung nach Penman-Monteith, ATV-DVWK, 2002) zumeist auf Jahresbasis berechnet. Entsprechend der geringen Niederschläge ist schon in der Referenzperiode die KWB in fast allen LVG deutlich negativ (Abb. 3.9).

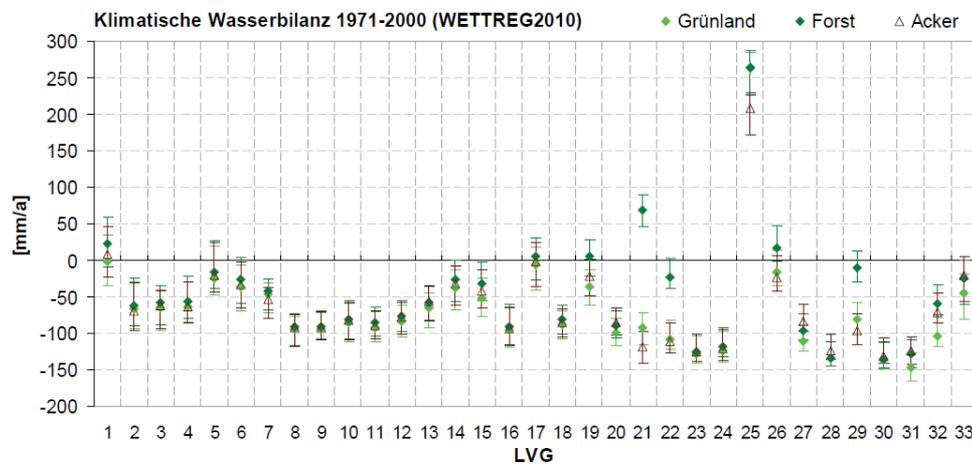


Abbildung 3.9: Klimatische Wasserbilanz 1971–2000 (Median, Minima und Maxima der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten

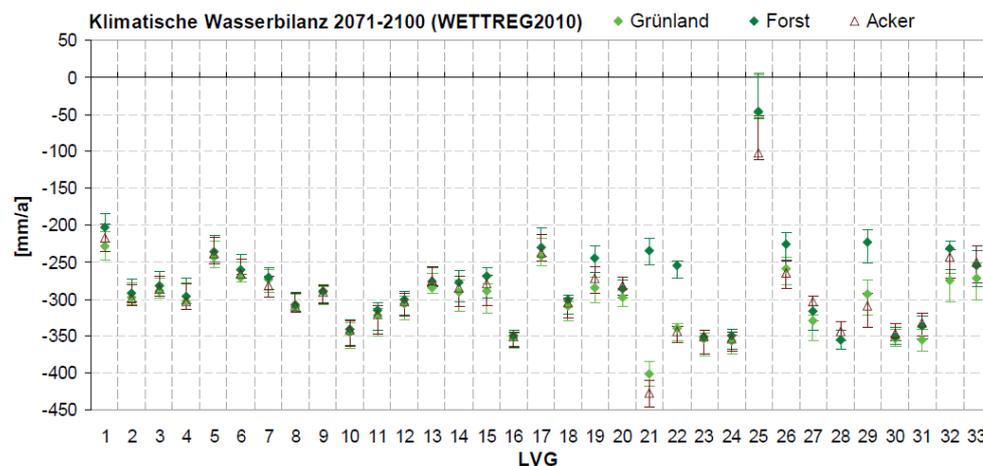


Abbildung 3.10: Klimatische Wasserbilanz 2071–2100 (Median, Minima und Maxima der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten

Unter Szenariobedingungen verschärft sich die Situation weiter, so dass für die Periode 2071–2100 für alle LVG bis auf den Unter- und Mittelharz (LVG 25) die simulierten Werte der KWB im Bereich -200 bis -400 mm/a liegen. Als besonders kritisch wird die hydrometeorologische Situation im Nördlichen Harzvorland/Harzrandmulde (LVG 21) simuliert. Hier sind wie im LVG 25 die Veränderungen im Vergleich zum Referenzzustand am größten (s. Abb. 3.11 und Abb. 3.12).

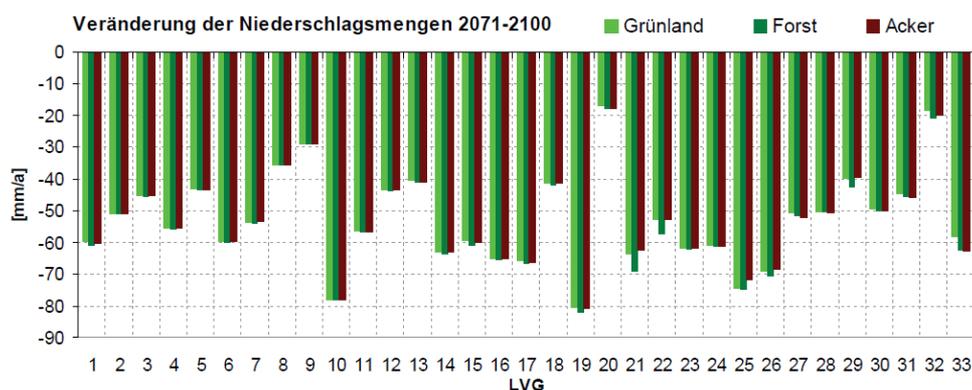


Abbildung 3.11: Veränderung der Niederschläge 2071–2100 im Vergleich zur Referenzsituation (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten

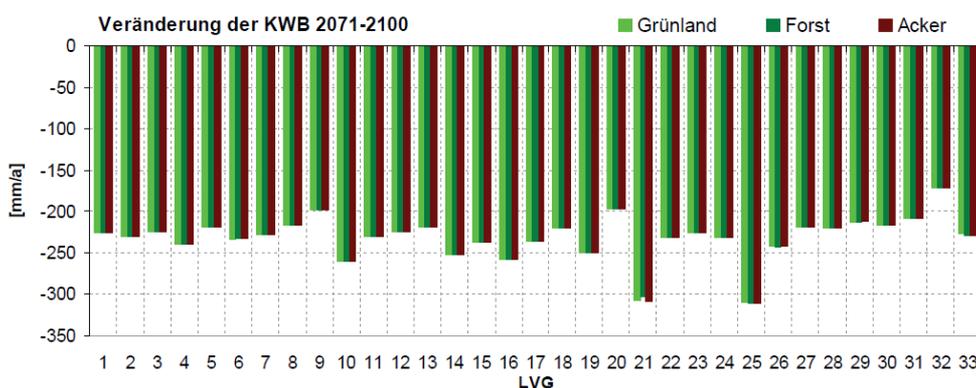


Abbildung 3.12: Veränderung der KWB 2071–2100 im Vergleich zur Referenzsituation (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten

3.4.2 Häufigkeit und Intensität von Abflussbildungsereignissen

Die Sickerwasserspenden auf den einzelnen Standortkombinationen hängen neben der Landnutzung von den hydraulischen Eigenschaften der Böden und den klimatischen Bedingungen ab. Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse für die 61 Flächen unter ackerbaulicher Nutzung (s. Tab. B.1 auf S. B.2) ausgewertet und grafisch veranschaulicht. Dabei erfolgt die Beschränkung auf Perioden 1971–2000 (Referenz) und 2071–2100. Die Ergebnisse für die übrigen Standortkombinationen und Perioden finden sich in analoger Form aufbereitet im Datenanhang. Unterschiede zwischen den einzelnen Landnutzungsformen für alle vier Klimaperioden werden anhand von Detailauswertungen für ausgewählte typische Böden Sachsen-Anhalts in Kapitel 3.4.5 untersucht.

Entsprechend der hydrometrologischen Bedingungen werden schon in der Referenzperiode recht geringe Sickerwasserspenden simuliert, wie Abb. 3.13 verdeutlicht. Die höchsten Werte ergeben sich in den Mittelgebirgsregionen mit den im Landesdurchschnitt vergleichbar hohen Niederschlägen (s. Abb. 3.8) unter Braunerden (B) und Lessives (L). In der Schwarzerderegion tritt unter den

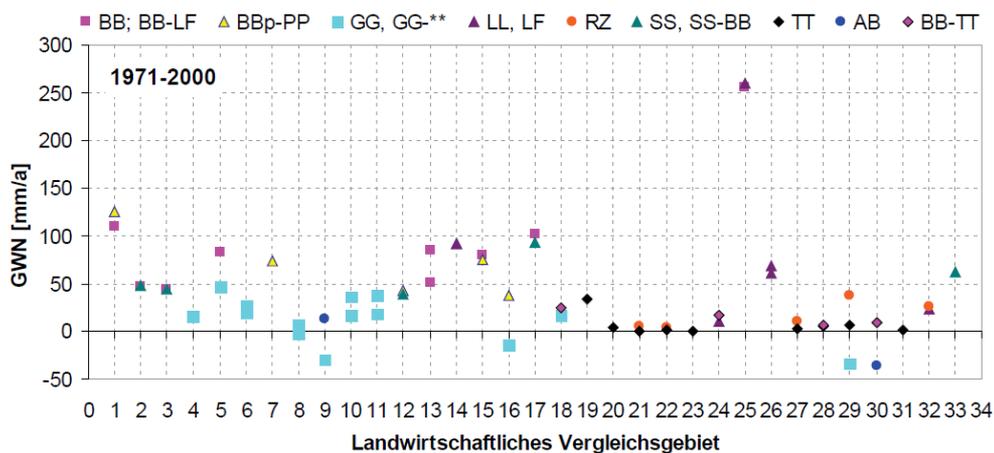


Abbildung 3.13: Sickerwasserspenden GWN 1971–2000 der untersuchten Ackerstandorte (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Bodentypen

hier dominierenden ackerbauliche genutzten Tschernosem (TT) und den Rendzinen (RZ, hier zumeist gekappte TT-Standorte) kaum noch eine Grundwasserneubildung auf. Die grundwasserbeeinflussten Gleye (GG) und Auenböden (AB) wirken auch in der Referenzperiode zumeist als Zehrstandorte. Unter der Annahme, dass die Grundwasserverhältnisse auch unter zukünftigen Szenariobedingungen konstant bleiben (s. Kapitel 3.2.1) kommt es auf diesen Standorten zu einem starken Anstieg der Grundwasserzehrung in der letzten Szenarioperiode, da kaum Limitierungen durch tiefe Grundwasserflurabstände gegeben sind (Abb. 3.15, Abb. 3.16).

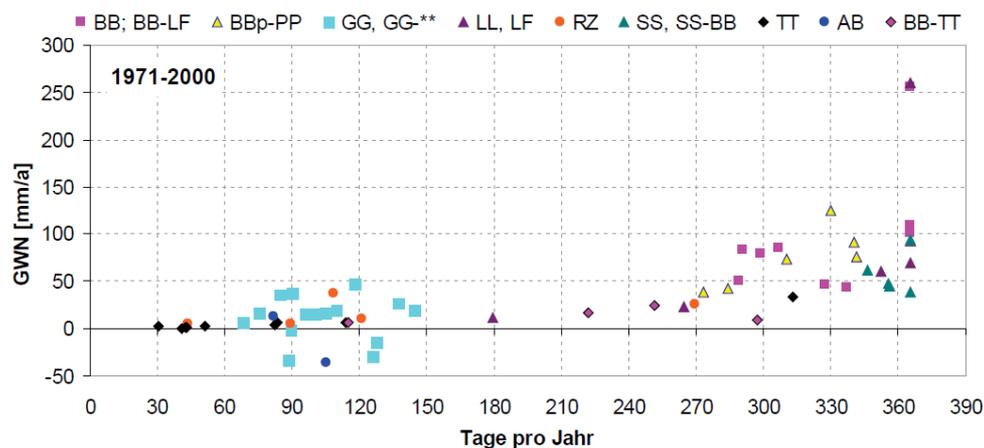


Abbildung 3.14: Zusammenhang zwischen Sickerwasserspenden GWN [mm/a] und Andauer der jeweiligen Sickerwasserperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (jeweils Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 1971–2000)

Im Gegensatz dazu fallen die absoluten Veränderungen auf den Schwarzerden nur gering aus, da es hier heute schon lange Perioden ohne Sickerwasserspenden gibt.

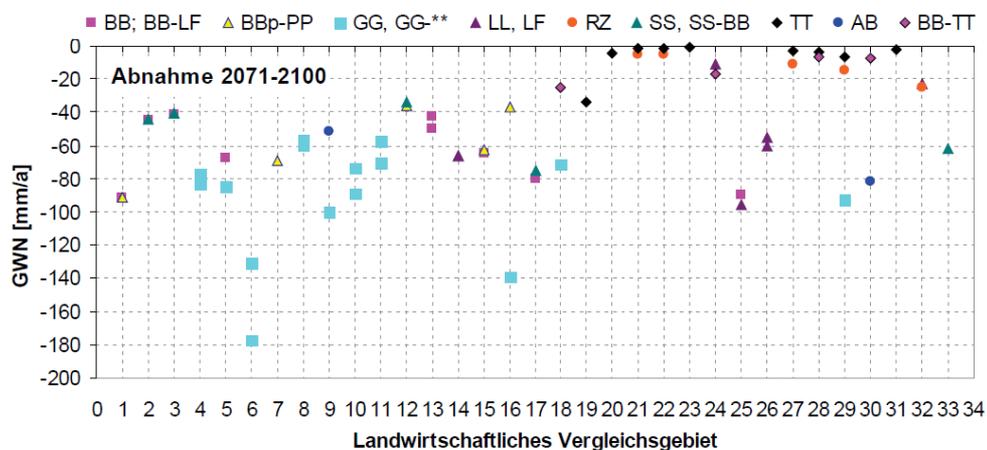


Abbildung 3.15: Abnahme der Sickerwasserspenden GWN 2071–2100 der untersuchten Ackerstandorte im Vergleich zur Referenzperiode (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Bodentypen

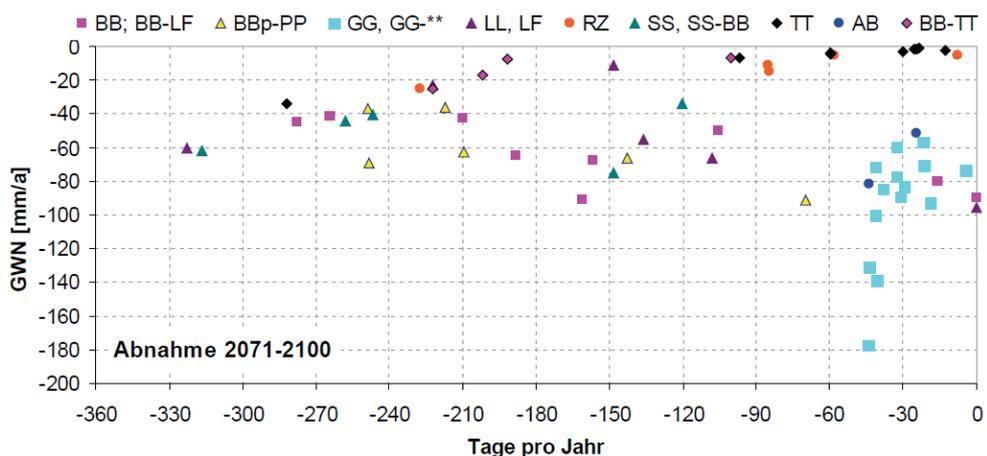


Abbildung 3.16: Abnahme der Sickerwasserspenden GWN und Länge der Abflussbildungsperioden 2071–2100 im Vergleich zur Referenzperiode (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Bodentypen auf den untersuchten Ackerstandorten

In Abb. 3.14 und Abb. 3.16 sind der Zusammenhang zwischen mittlerer Sickerwasserspende und der Dauer der Sickerwasserperioden in der Referenzperiode sowie die Veränderungen in der letzten Zukunftsperiode gegenüber dieser dargestellt. Starke Veränderungen hinsichtlich der Dauer und der jährlichen Sickerwasserspenden ergeben sich auch hier wieder besonders bei den gut durchlässigen Böden.

3.4.3 Häufigkeit und Dauer von landwirtschaftlichen Dürreperioden

Wie die folgenden Abbildungen verdeutlichen, besteht schon heute auf vielen Standorten Sachsen-Anhalts ein Dürreerisiko.

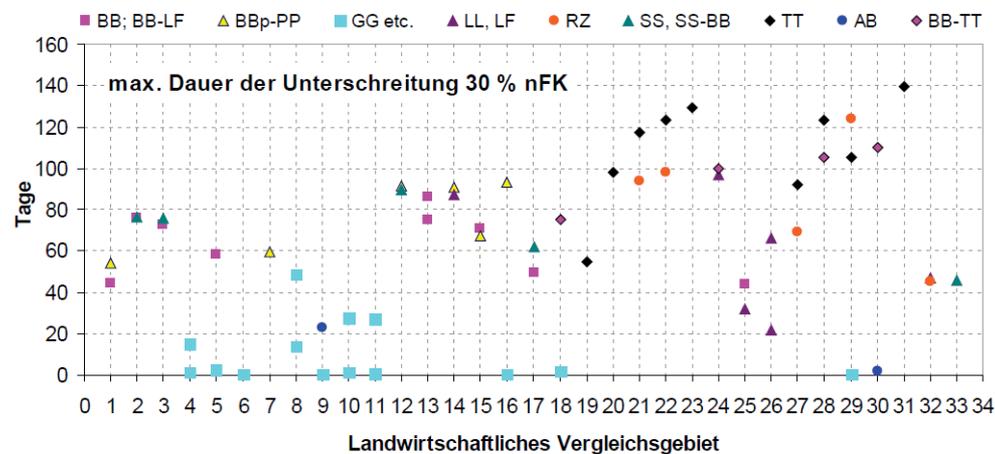


Abbildung 3.17: Dauer von Dürreperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 1971–2000)

Besonders auf den Schwarzerdeböden (TT) liegt entsprechend des Referenzzeitraums an mehr als 100 Tagen pro Jahr die Bodenfeuchte im Hauptwurzelraum (0–100 cm) unter 30 % der nutzbaren Feldkapazität (Abb. 3.17). In der letzten untersuchten Zukunftsperiode (2071–2100) wird sich diese Situation drastisch verschärfen (Abb. 3.18, Abb. 3.19). In einigen Regionen (z.B. IVG 21) wird ohne Zusatzwasser keine ausreichende Ackerproduktion mehr möglich sein.

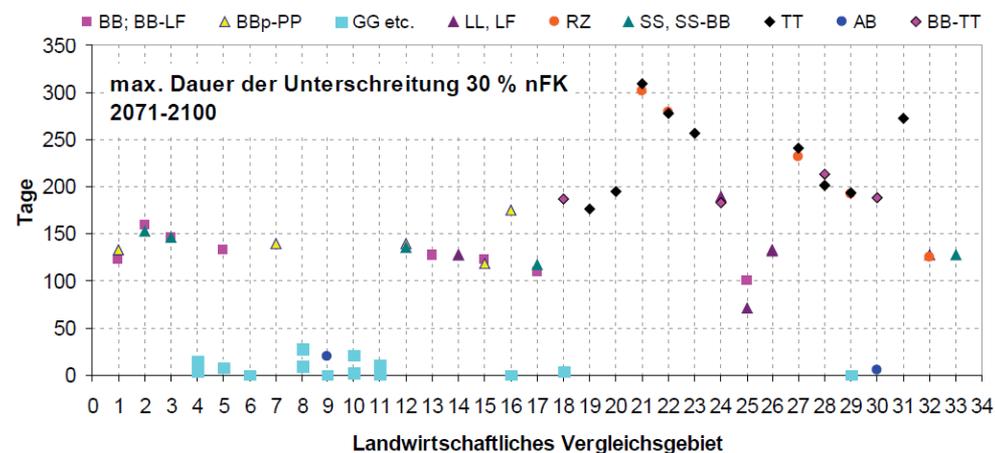


Abbildung 3.18: Dauer von Dürreperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 2071–2100)

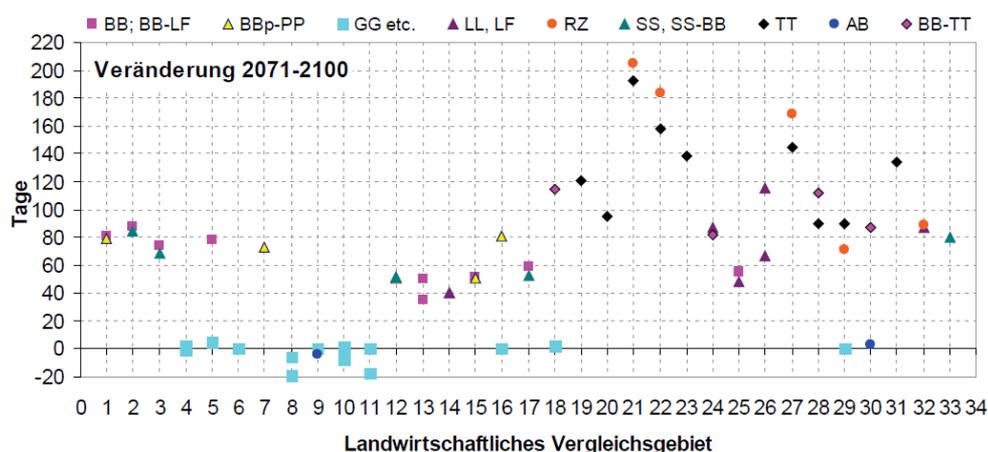


Abbildung 3.19: Änderung der Dauer von Dürreperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten 2071-2100 gegenüber 1971-2000

3.4.4 Häufigkeit und Dauer von Sättigungsperioden

Neben der Veränderung der Sickerwasserspenden und des Dürrierisikos war auch die Untersuchung von Häufigkeit und Dauer von Sättigungsperioden in der Zukunft Gegenstand der Untersuchungen. Als Sättigungsperiode bezeichnet man den Zeitraum, in dem der Bodenwassergehalt der Hauptwurzelzone 90 % der Feldkapazität übersteigt. In dieser Zeit ist ein Befahren der Flächen schwierig.

Eine zu hohe Bodenfeuchte ist heute besonders auf den grundwasserbeeinflussten Standorten ein Problem (Abb. 3.20). Diese Situation wird sich unter zukünftigen Szenariobedingungen nur wenig verbessern (Abb. 3.21, Abb. 3.22), wenn man von unveränderten Grundwasserflurabständen ausgeht (im Projektarbeitskreis festgelegte Randbedingung). Wie in den vorigen Kapiteln gezeigt wurde, muss aufgrund der abnehmenden GW-Neubildung in Zukunft von tieferen

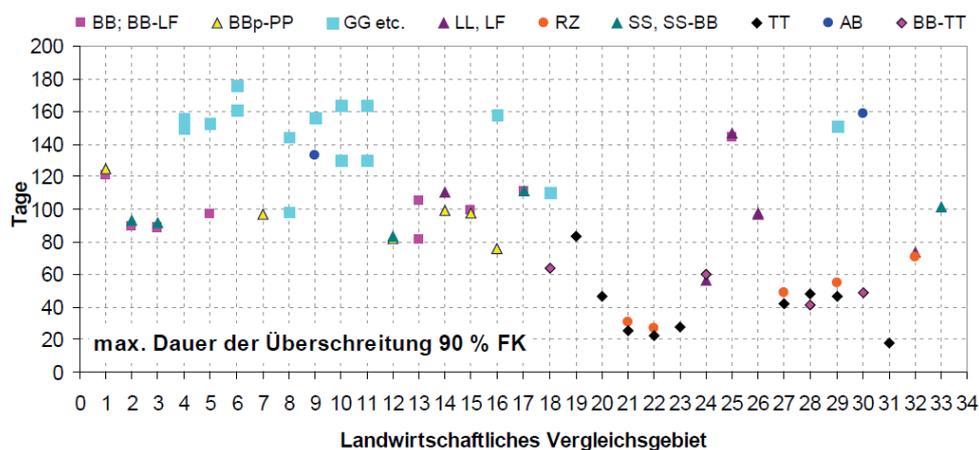


Abbildung 3.20: Dauer von Sättigungsperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 1971–2000)

Grundwasserstände auch auf den heute grundwasserbeeinflussten Standorten ausgegangen werden. Eine Quantifizierung ist jedoch nur im Rahmen einer gekoppelten GW-NA-Modellierung möglich, so dass es im Rahmen dieser Studie bei diesen relativ unsicheren Aussagen bzgl. von Sättigungsperioden bleiben muss.

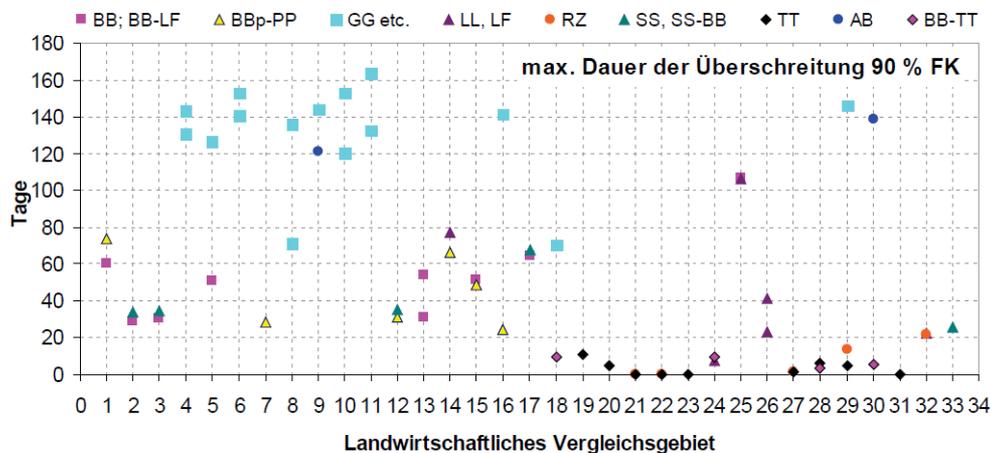


Abbildung 3.21: Dauer von Sättigungsperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 2071–2100)

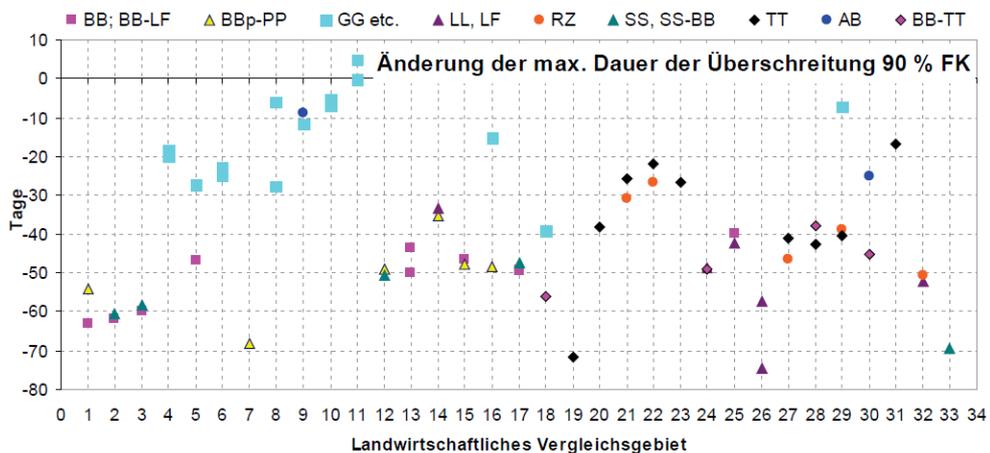


Abbildung 3.22: Änderung der Dauer von Sättigungsperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten 2071–2100 gegenüber 1971–2000

3.4.5 Detailuntersuchungen für ausgewählte Bodentypen

3.4.5.1 Auswahl

Anhand ausgewählter Standortkombinationen mit Vertretern der dominierenden Bodentypen in Sachsen-Anhalt sollen sowohl die Veränderungen in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Landnutzung, als auch die Änderungen in den vier untersuchten Zeitperioden veranschaulicht werden. Bei der Auswahl wurde

darauf geachtet, möglichst Standortkombinationen zu finden, die sich nur durch die Landnutzung unterscheiden, also innerhalb eines Landwirtschaftlichen Vergleichsgebietes liegen und die gleichen Böden aufweisen. Wie Tab. 3.7 auf S. 41 zeigt, ist das nicht für alle Böden gelungen. Jedoch konnten zumindest für die wichtigen Gruppen der semiterrestrischen Böden mit einer Gley-Vega (GG-AB) in den Südlichen Elbeauen (LVG 10) und der Schwarzerden (TT) mit einer Standortkombination in der Lößebene der nördlichen Börde (LVG 20) Beispiele gefunden werden, die mit Ausnahme der Nutzung die gleichen Randbedingungen aufweisen.

3.4.5.2 Semiterrestrische Böden (Gley-Vega)

Diese Standorte wirken schon heute überwiegend als Zehrflächen (vgl. Kapitel 3.4.2).

Bis auf die Ackerflächen mit ihren bewirtschaftungsbedingten Bracheperioden sind hier die mittleren Grundwasserneubildungsraten negativ (Abb. 3.23).

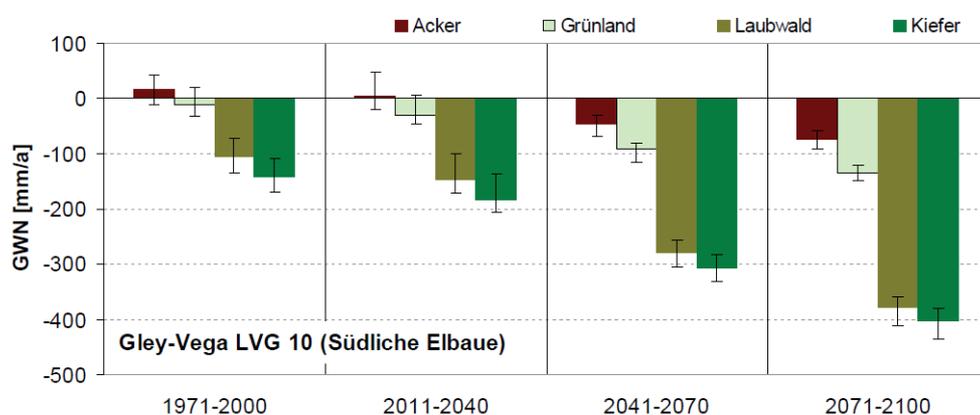


Abbildung 3.23: Sickerwasserspende (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung

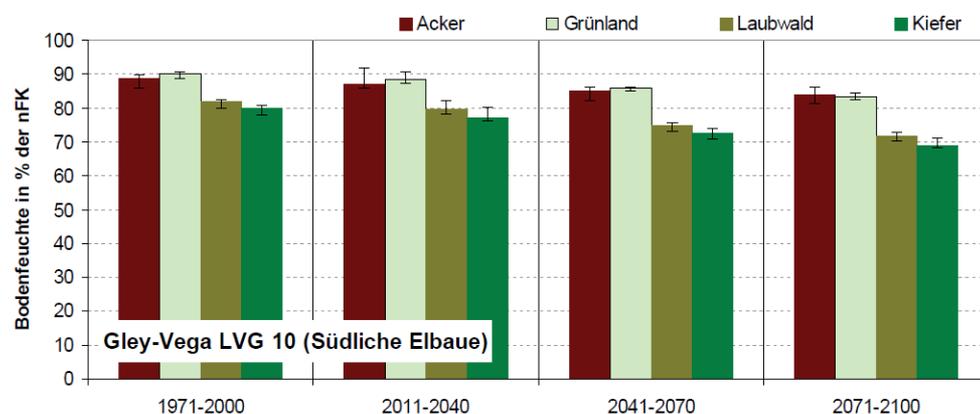


Abbildung 3.24: Mittlere Bodenfeuchte (Median mit Extrema pro Zeitperiode) in Abhängigkeit von der Nutzung

Tabelle 3.7: Ausgewählte Bodentypen, ID: Boden-ID, GWFA: Grundwasserflurabstand, Bodenparameter s. Tabelle Anhang-4

IVG	Name	Höhe [m.ü.NN]	Neigung [%]	Boden	Bodentyp	ID	GWFA [m]	EFL-ID	Nutzung
10	Südliche Elbaue	67,9	0,4	GG-AB: fo-1	GG-AB	1863	106*	88120071	Grünland
		72,8	1	GG-AB: fo-1	GG-AB	21863	106*	88140188	Kiefer
		70,9	0,3	GG-AB: fo-1	GG-AB	1863	106*	88140207	HBU-WLI-EI
14	Südlicher Vorflämung ...	114,5	1,4	BB: p-(v)s/fg-s	BB	22121	5	85140130	GKI-(BU)
								85140163	TEI-BU
13	Nördlicher Vorflämung	64,1	0,8	BB: p-s/fg-s	BB	2125	5	85150045	Acker
20	Lösebene der nördl. Börde	77,6	1,2	TT: p-u	TT	2201	4,5	50120081	Grünland
		91,7	1,8	TT: p-u	TT	22201	4,5	50140136	Kiefer
		95,7	1,2	TT: p-u	TT	2201	4,5	50140169	Eichen
33	Südliches Lößhügelland	207,2	3,6	SS: p-u/c-et	SS	2767	5	46120094	Grünland
		224,3	5,9	SS: p-u	SS	22763	4,5	46140149	BU-EI
		228	2,4	SS-BB: p-u	SS-BB	2725	4,5	46140182	FI-(BU)
14	Südlicher Vorflämung und Flämingshochfläche	100,3	1	BBp-PP: p-s/fg-s	BBp-PP	1815	5	85120075	Grünland
		107	1	BBp-PP: p-s/fg-(v)s	BBp-PP	1960	5	85150014	Acker
12	Zerbster Land	75,8	0,8	PP-BB: p-s/fg-s	PP-BB	21877	4,5	85140128	Kiefer
								85140161	HBU-WLI-EI

* s. Abb. 3.3

Durch den Grundwassereinfluss kann auf diesen Standorten die Vegetation zumeist ausreichend mit Wasser versorgt werden, d. h. die Bodenfeuchte der Hauptwurzelzone sinkt auch unter Szenariobedingungen nur selten auf kritische Werte ($< 30\%$ der nFK, Abb. 3.24, Abb. 3.28). Der Klimaeinfluss auf diese Kenngröße ist im Unterschied zur Grundwasserneubildung klein.

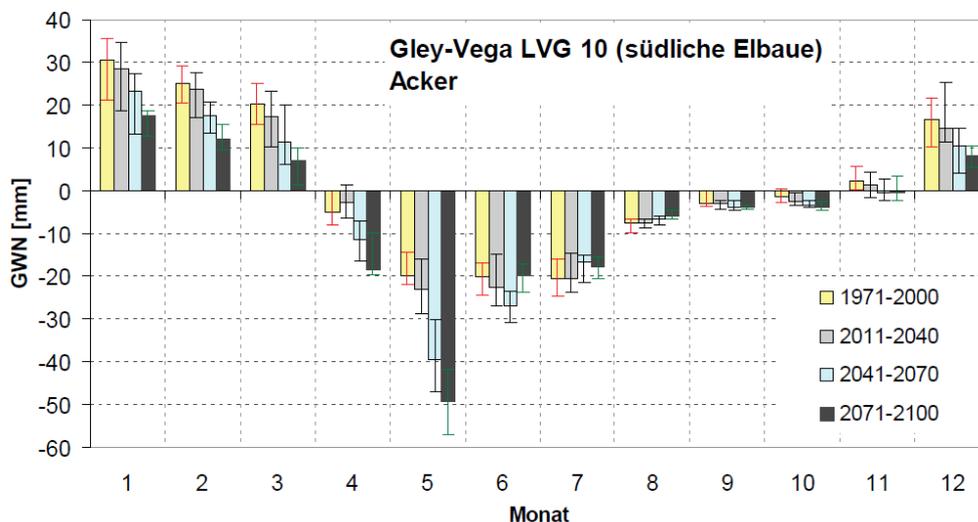


Abbildung 3.25: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema) einer Gley-Vega mit Ackernutzung

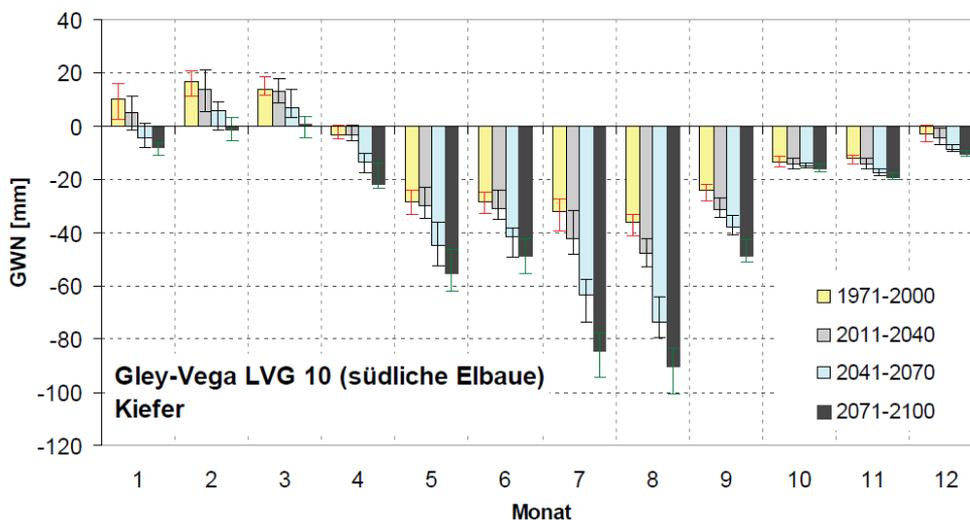


Abbildung 3.26: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema) einer Gley-Vega unter einem Kiefernbestand

Jedoch zeigt sich ein etwas kritischeres Bild, wenn das Verhältnis zwischen realer Verdunstung und potenzieller Verdunstung betrachtet wird (Abb. 3.29). In diesem Beispiel unter Ackernutzung wird deutlich, dass es ab der Periode 2041–2070 in der Hauptwachstumsperiode Juni schon zu einem Wasserdefizit kommt. Das Wurzelsystem ist noch nicht vollständig ausgebildet und kann den

tiefer sinkenden Kapillarsaum (Abb. 3.3) nicht mehr erreichen. Wassermangel in dieser Entwicklungsphase ist besonders kritisch, da mit Ertragseinbußen zu rechnen ist. Es ist also auch auf diesen Standorten ein Bewässerungsbedarf zur Ertragssicherung einzukalkulieren.

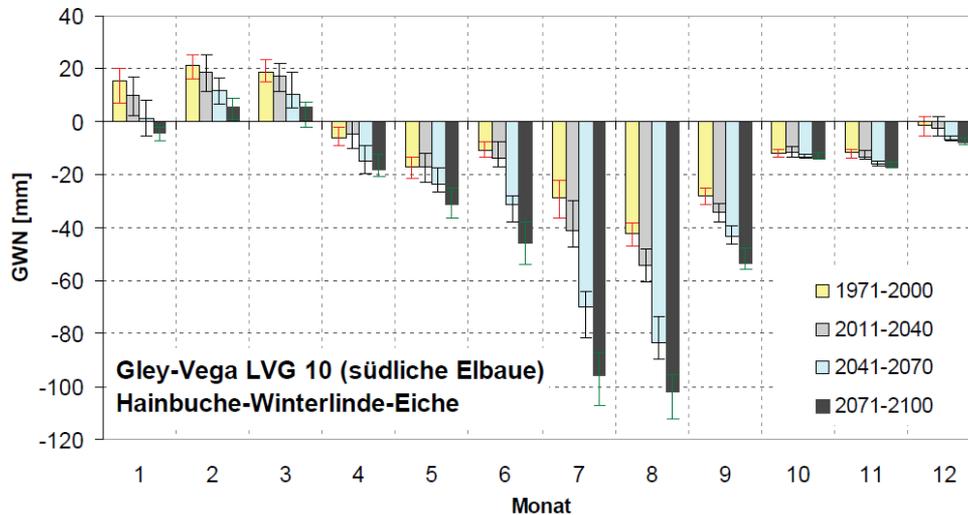


Abbildung 3.27: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspense (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema) einer Gley-Vega unter einem Laubwaldmischbestand

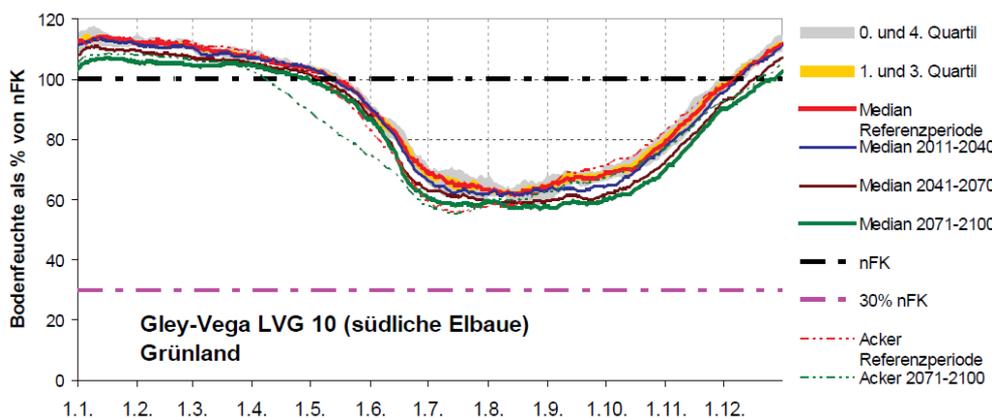


Abbildung 3.28: Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte unter Grünland und Acker auf Tagesbasis

Unter forstlicher Nutzung kommt es unter Szenariobedingungen zu einem starken Anstieg der Grundwasserzehrung. Insbesondere unter dem simulierten Kiefernbestand erfolgt im Jahresgang keine nennenswerte Sickerwasserbildung in der Periode 2071–2100 (Abb. 3.26). Unter einem Laubbestand wird zwar noch eine GW-Neubildungen im Februar/März simuliert, aber die Menge der GW-Zehrung in den übrigen Monaten überwiegt auch hier deutlich (Abb. 3.27). Auch wenn bei der Simulation der heutige mittlere Verlauf der Grundwasserstände in die Zukunft projiziert wurde (auf der Basis der simulierten geringeren GW-Neubildung im Gebietsmaßstab ist dann eigentlich von tieferen Grund-

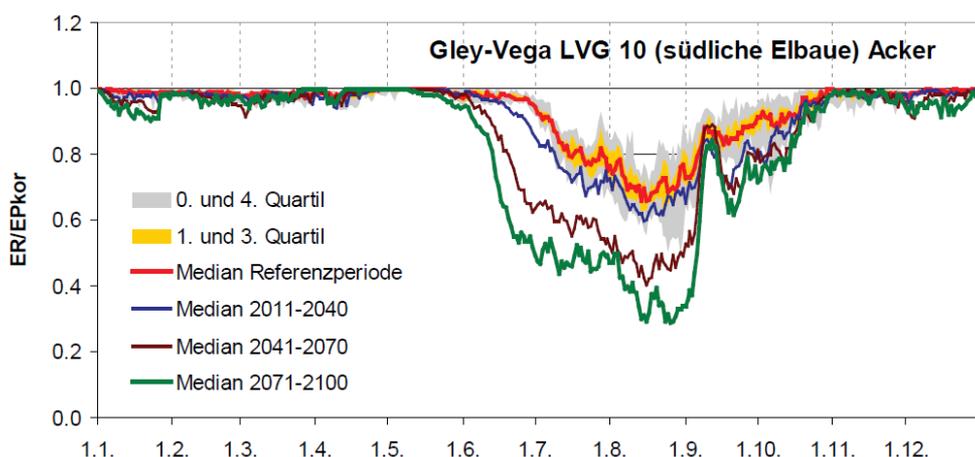


Abbildung 3.29: Verhältnis zwischen realer Verdunstung (ER) und potenzieller Verdunstung (EPkor) für die 4 Perioden unter Acker im innerjährlichen Verlauf

wasserständen auszugehen), ist damit zu rechnen dass auch in Zukunft in dieser Jahreszeit das Grundwasser durch kapillaren Aufstieg für Bäume verfügbar ist.

3.4.5.3 Stauwasserböden (Pseudogley)

Bei den Stauwasserböden zeigen sich deutliche nutzungsabhängige Unterschiede sowohl bei der Grundwasserneubildung als auch bei der Bodenfeuchte (Abb. 3.30, Abb. 3.31).

Aufgrund der geringen Leitfähigkeit sind die täglichen Sickerwasserspenden zwar nicht hoch, jedoch wird für die Referenzperiode fast durchgängig eine Abflussbildung simuliert (Abb. 3.32, Abb. 3.33). Unter Szenariobedingungen kommt es zu einer deutlichen Verringerung. In der letzten Periode erliegt unter Acker die Sickerwasserbildung. Für Forststandorte wird sogar eine geringe Grundwasserzehrung entsprechend der angenommenen maximalen Wurzeltiefe von 2 m und den in der KA 4 (AD-HOC-AG BODENKUNDE, 1995) angegebenen

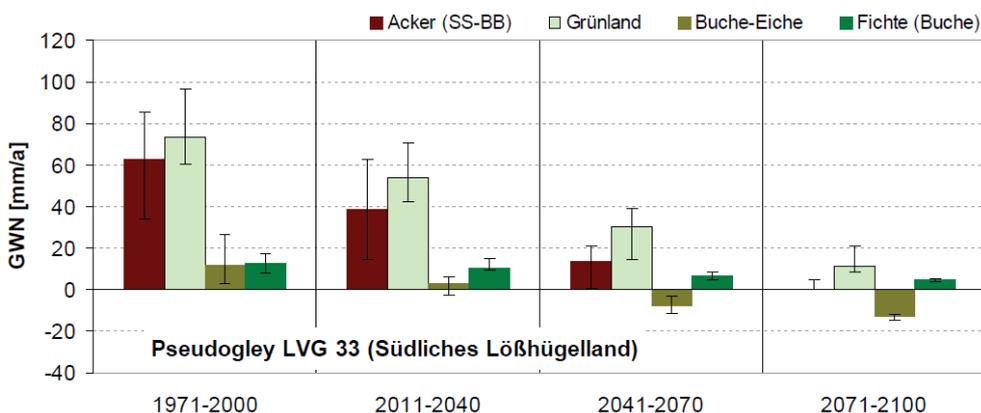


Abbildung 3.30: Sickerwasserspende eines Pseudogleys (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung

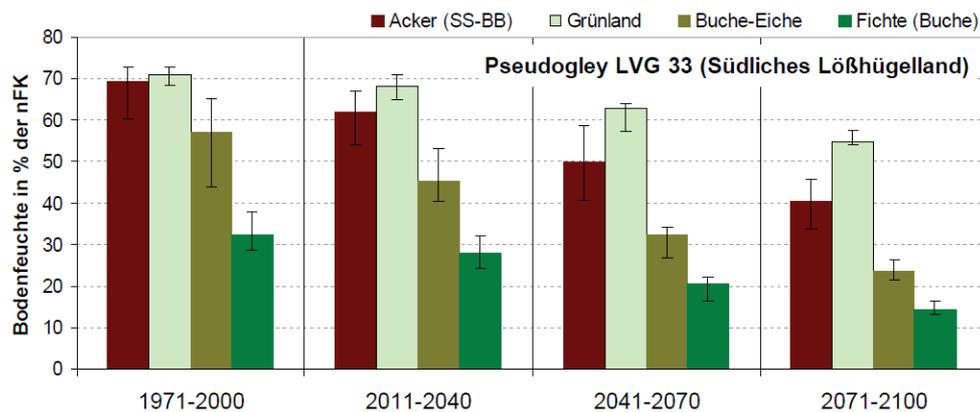


Abbildung 3.31: Mittlere Bodenfeuchte eines Pseudogleys (Median mit Extrema pro Zeitperiode) in Abhängigkeit von der Nutzung

kapillaren Aufstiegsraten für diese schluffig-tonigen Böden bei einem Grundwasserflurabstand von 4,5 m berechnet.

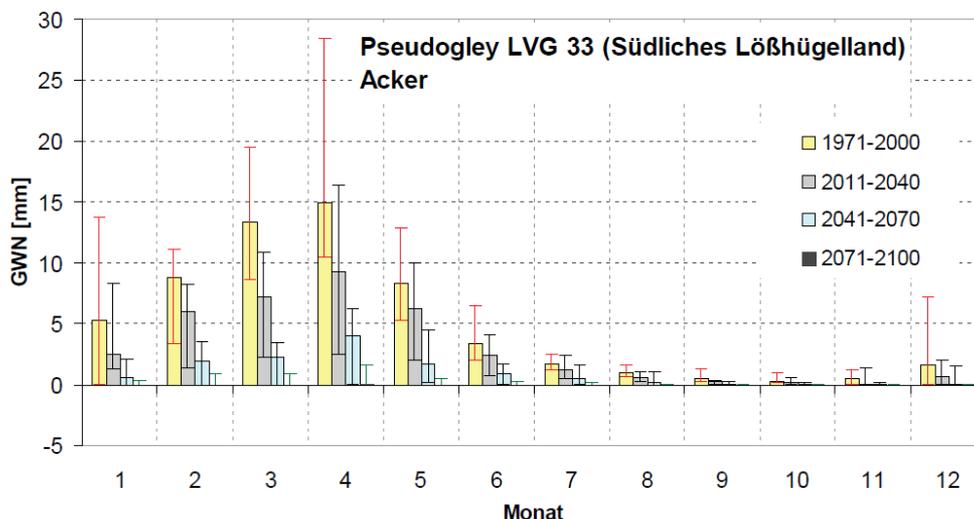


Abbildung 3.32: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspense eines Pseudogleys (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema)

Unter Acker steigt das Dürrerisiko (Abb. 3.34, Abb. 3.35). Wie bei den semiterrestrischen Böden kann es auf diesen Stauwasserböden zu Problemen bei der Bearbeitung durch Sättigung im Frühjahr kommen. Hinsichtlich dieses Sättigungsrisikos wird sich die Situation unter WETTREG2010-Szenariobedingungen deutlich verbessern (Abbildung 3.35).

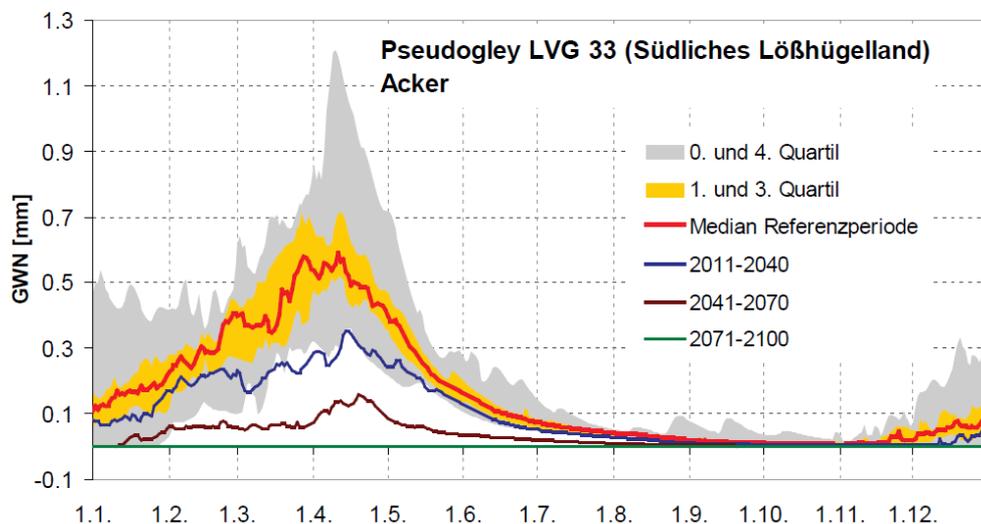


Abbildung 3.33: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Tagesbasis

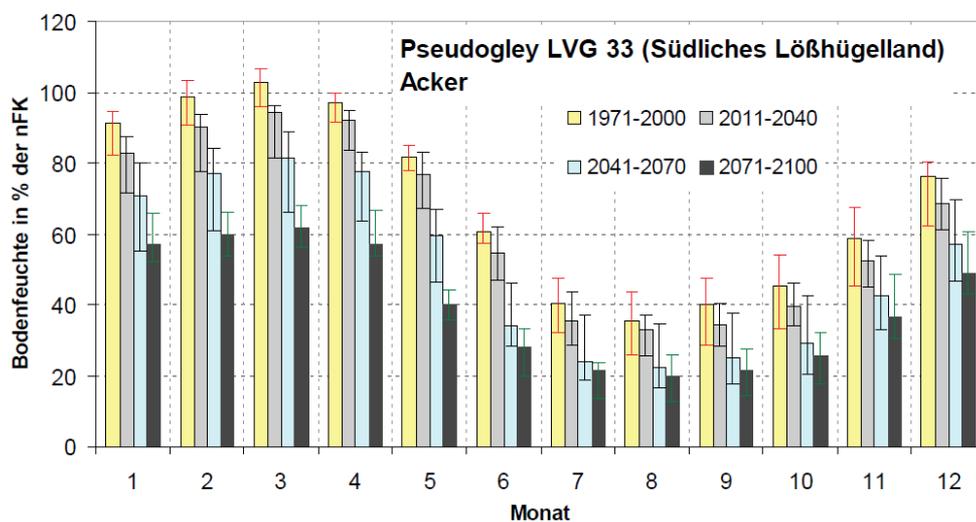


Abbildung 3.34: Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte auf Monatsbasis

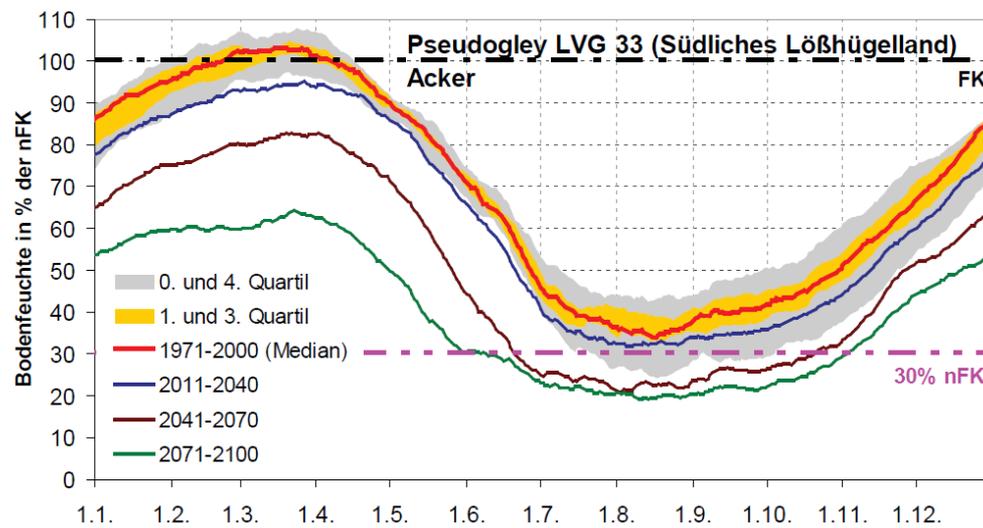


Abbildung 3.35: Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte eines Pseudogleys auf Tagesbasis mit Dürre-Grenzwert (30% nFK) und Feldkapazität FK

3.4.5.4 Schwarzerden (Tschernosem)

Schon heute sind die Schwarzerden in Sachsen-Anhalt durch ein hohes Dürrierisiko und geringe Sickerwasserraten gekennzeichnet (Abb. 3.13, Abb. 3.17). Bei den zugrunde gelegten Grundwasserflurabständen von 4,5 m wird unter den tiefwurzelnden Forststandorten sogar eine geringe Grundwasserzehrung entsprechend der durch die (AD-HOC-AG BODENKUNDE, 1995, 2005) angegebenen kapillaren Aufstiegsraten für diese schluffig-tonigen Böden (Bodenart Ut3 im C-Horizont) berechnet, die jedoch nicht den Verdunstungsbedarf deckt.

Diese Situation wird sich unter Szenariobedingungen verschärfen, wie die folgenden Abbildungen für die Lößebene der nördlichen Börde veranschaulichen.

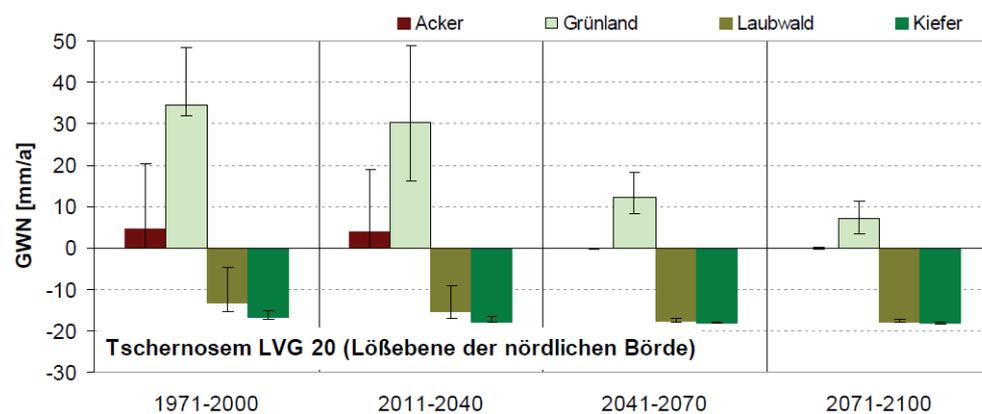


Abbildung 3.36: Sickerwasserspende eines Tschernosem (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung

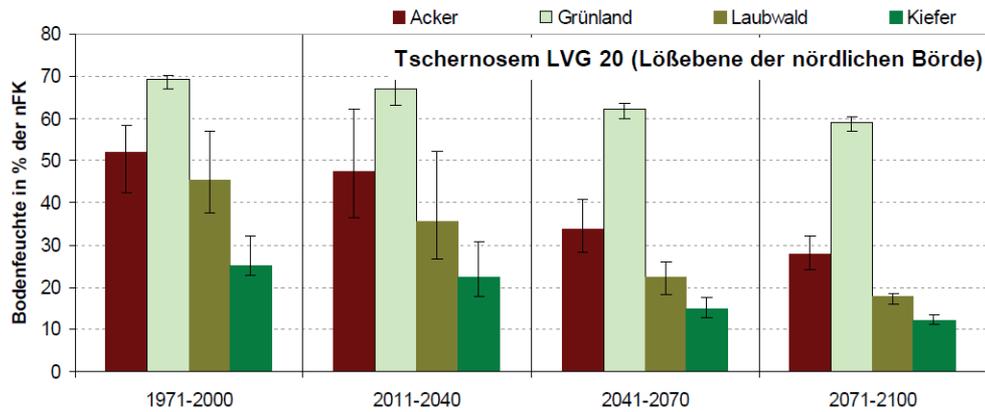


Abbildung 3.37: Mittlere Bodenfeuchte eines Tschernosem (Median mit Extrema pro Zeitperiode) in Abhängigkeit von der Nutzung

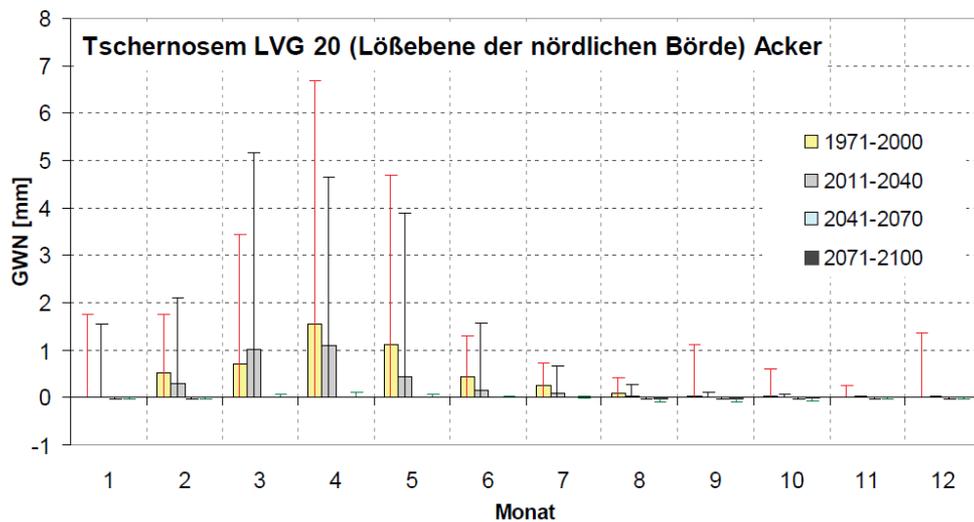


Abbildung 3.38: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspense (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema)

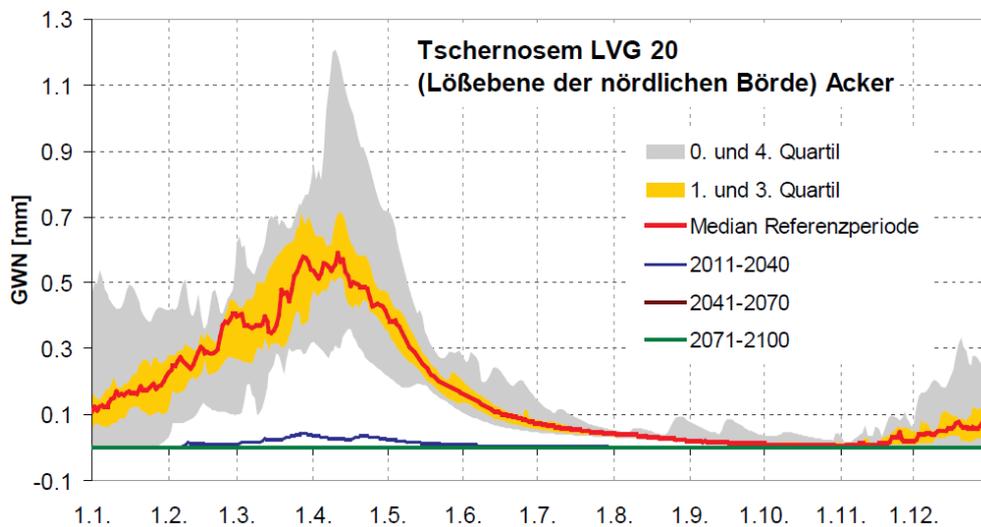


Abbildung 3.39: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Tagesbasis

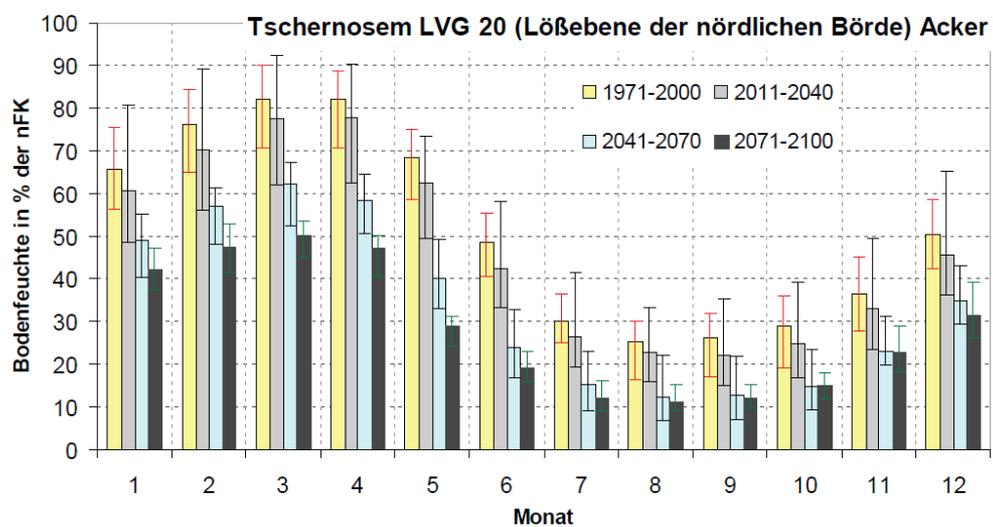


Abbildung 3.40: Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte auf Monatsbasis

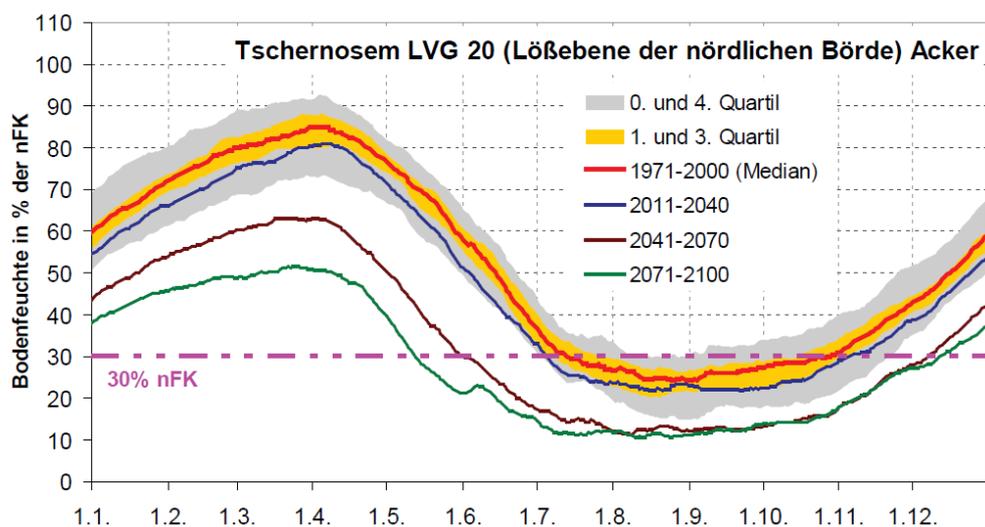


Abbildung 3.41: Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte eines Tschernosem auf Tagesbasis mit Dürregrenzwert (30% nFK)

3.4.5.5 Braunerden

Braunerden zeichnen sich zumeist durch eine geringe nutzbare Feldkapazität und eine hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit aus (vgl. Bodenparameter in Tab. B.4 auf S. B.5).

Deshalb wird für diese Böden ein stark ausgeprägter innerjährlicher Gang der Sickerwasserraten und der Bodenfeuchte simuliert. Das Dürrierisiko ist schon in der Referenzperiode hoch und wird sich unter Szenariobedingungen weiter verschärfen, wie die folgenden Bilder für einen Ackerstandort veranschaulichen.

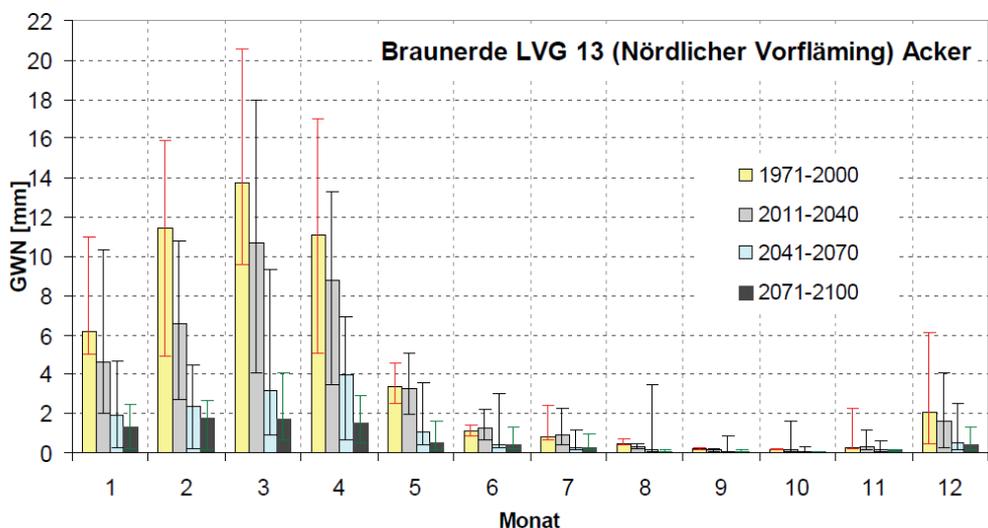


Abbildung 3.42: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspense einer Braunerde (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema)

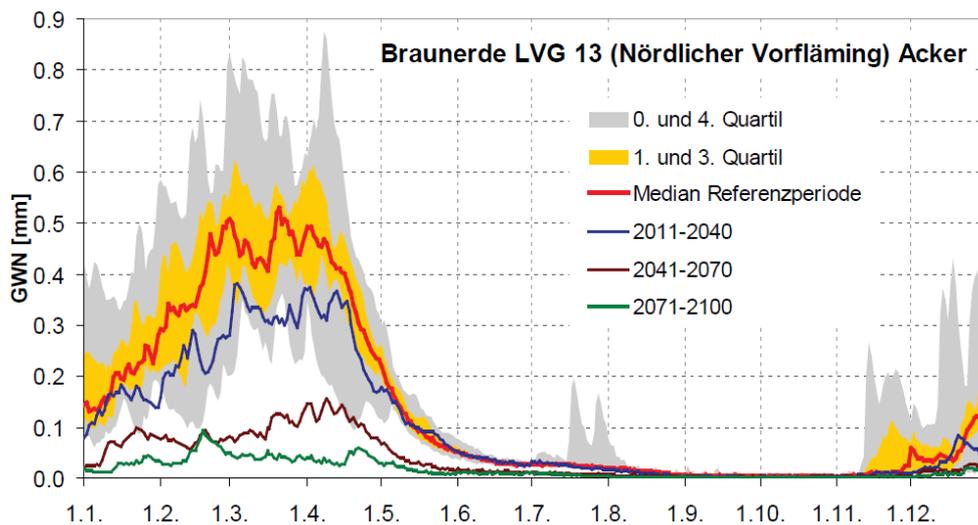


Abbildung 3.43: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Tagesbasis

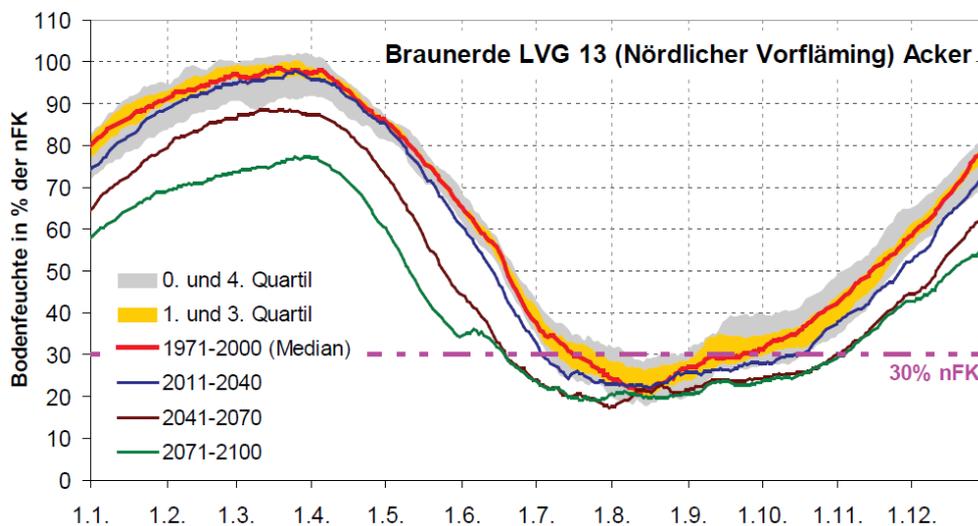


Abbildung 3.44: Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte einer Braunerde auf Tagesbasis mit Dürregrenzwert (30% nFK)

Im Bereich des Flämings (LVG 13 und 14) wurde kein Grünland auf Braunerde untersucht. Deshalb können in den folgenden Abbildungen nur Braunerdestandorte mit Acker und forstliche Nutzung hinsichtlich ihrer Reaktion auf den Klimawandel untersucht werden. Die Sickerwasserbildung unter Forst ist heute schon sehr gering und kommt ab der Periode 2041–2070 völlig zum Erliegen (Abb. 3.46).

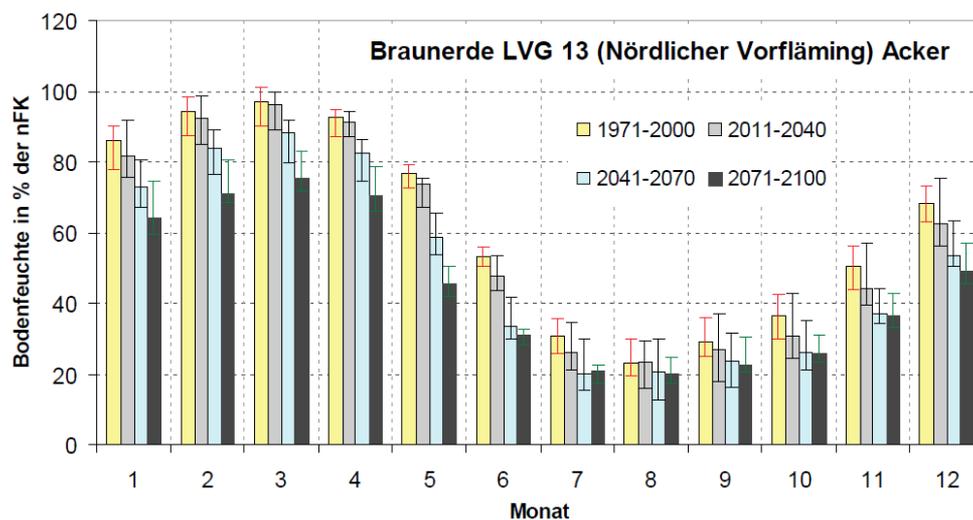


Abbildung 3.45: Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte auf Monatsbasis

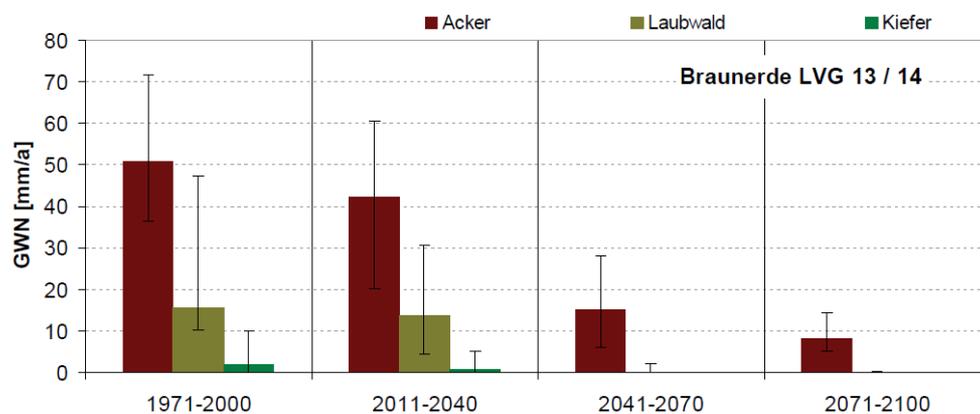


Abbildung 3.46: Sickerwasserspende von Braunerden in den LVG 13 und 14 (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung

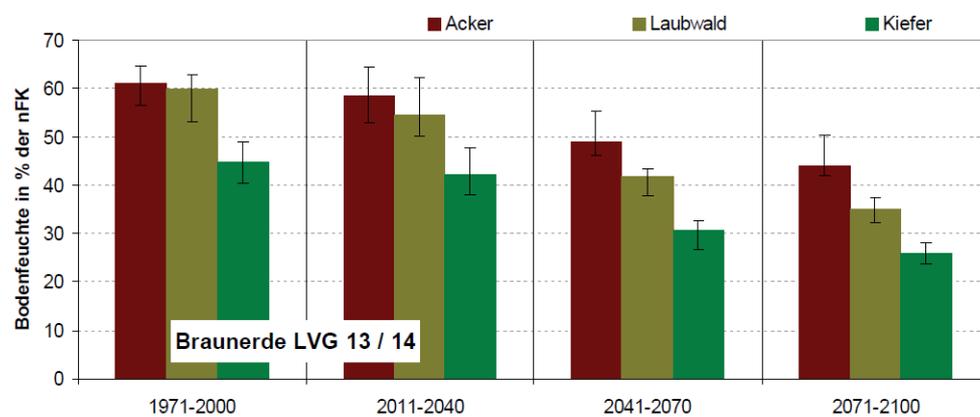


Abbildung 3.47: Mittlere Bodenfeuchte der ausgewählten Braunerden in den LVG 13 und 14 (Median mit Extrema pro Zeitperiode) in Abhängigkeit von der Nutzung

3.4.5.6 Podsole (Podsol-Braunerde)

Podsole und Podsol-Braunerden sind typische Waldböden (vgl. Tab. 3.4). Wie die folgenden Abbildungen für Vertreter dieses Bodentyps im Fläming und im Zerbscher Land zeigen, wird sowohl unter Kieferbeständen als auch unter Laubwald schon in der Referenzperiode kaum Sickerwasser gebildet. Die höchsten Sickerwasserraten werden unter Grünland aufgrund der geringeren Durchwurzelungstiefen simuliert. Jedoch muss bei der Bewertung der Ergebnisse in Abb. 3.48 und Abb. 3.49 beachtet werden, dass es sich hierbei um unterschiedliche Böden unter differierenden klimatischen Randbedingungen handelt (s. Tab. 3.7), so dass die berechneten Wasserhaushaltsgrößen unter den jeweiligen Nutzungsarten nur bedingt miteinander vergleichbar sind.

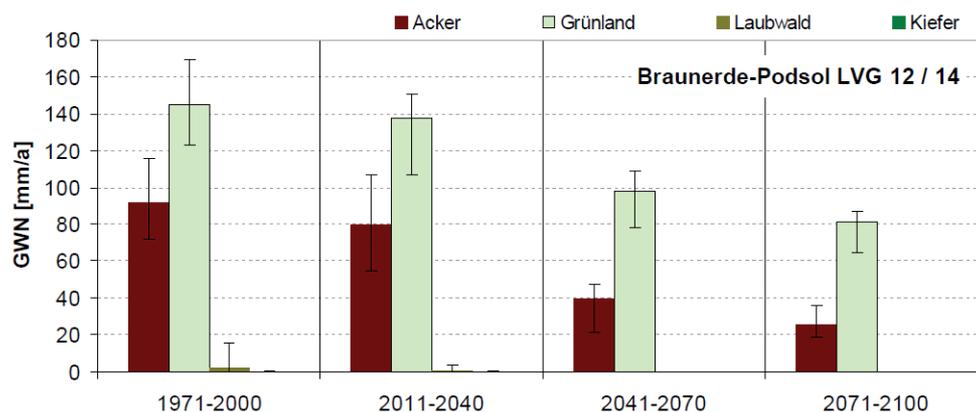


Abbildung 3.48: Sickerwasserspende (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung

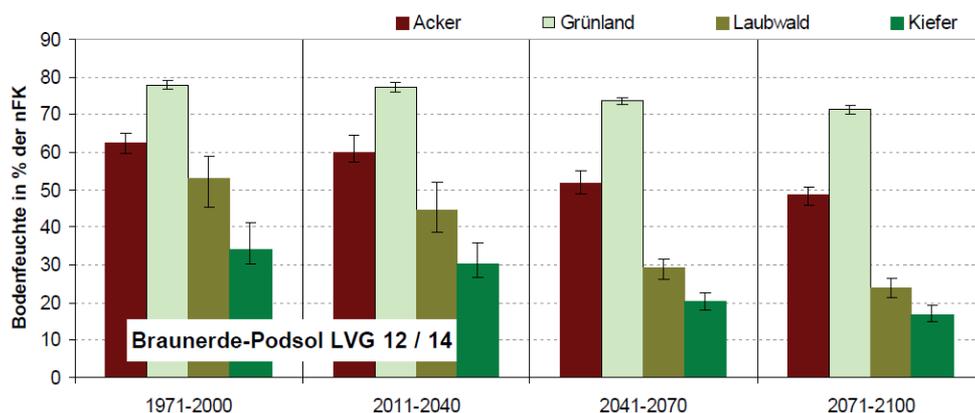


Abbildung 3.49: Mittlere Bodenfeuchte im Hauptwurzelraum (1/1.5 m) als Mediane mit Extrema pro Zeitperiode in Abhängigkeit von der Nutzung

Der ackerbaulich genutzte Proto-Braunerde-Podsol (BBp-PP, Sandrosterde) weist heute noch sehr hohe Sickerwasserspenden besonders in den Wintermonaten auf. Die Ergebnisse für die 10 WETTREG2010-Realisierungen streuen dabei stark. Jedoch wird schon für die erste Zukunftsperiode eine starke Abnahme der Sickerwasserspenden im Januar und Februar simuliert.

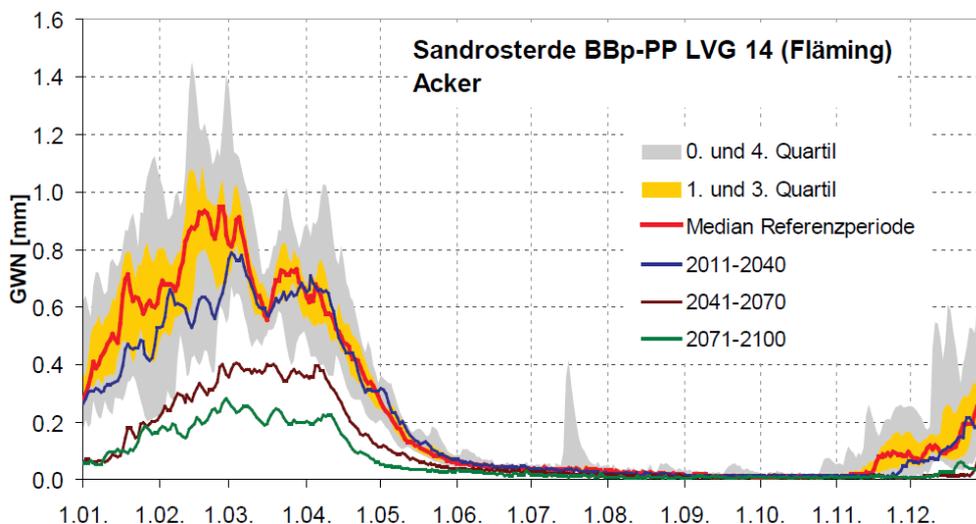


Abbildung 3.50: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Tagesbasis

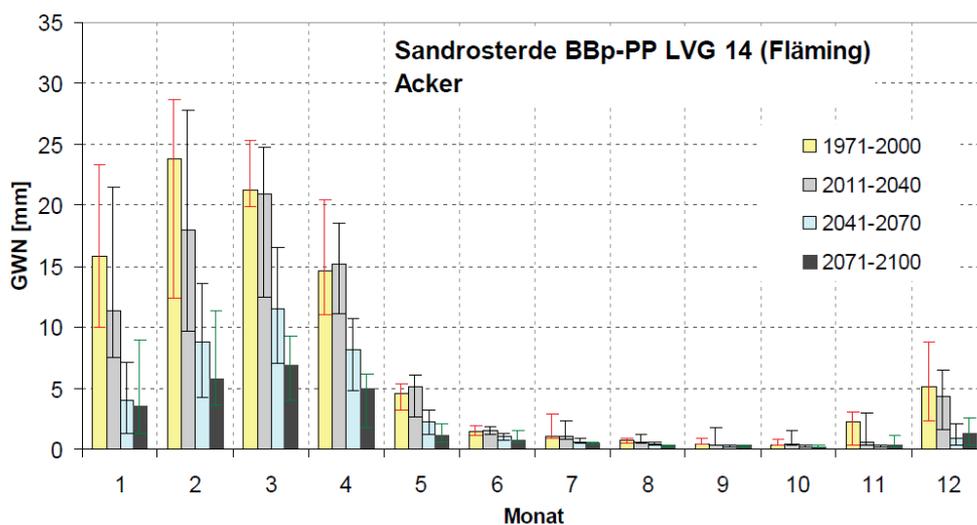


Abbildung 3.51: Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Monatsbasis

Aufgrund der geringen Wasserspeicherkapazität dieser Böden besteht ein hohes Dürrierisiko. Wie Abb. 3.52 verdeutlicht, wird eine ackerbauliche Nutzung dieser Böden in der Zukunft laut WETTREG2010 kritisch. Die Bodenfeuchte im Hauptwurzelsraum liegt ab Mitte Mai bis Anfang November unter dem Dürregrenzwert von 30 % der nutzbaren Feldkapazität.

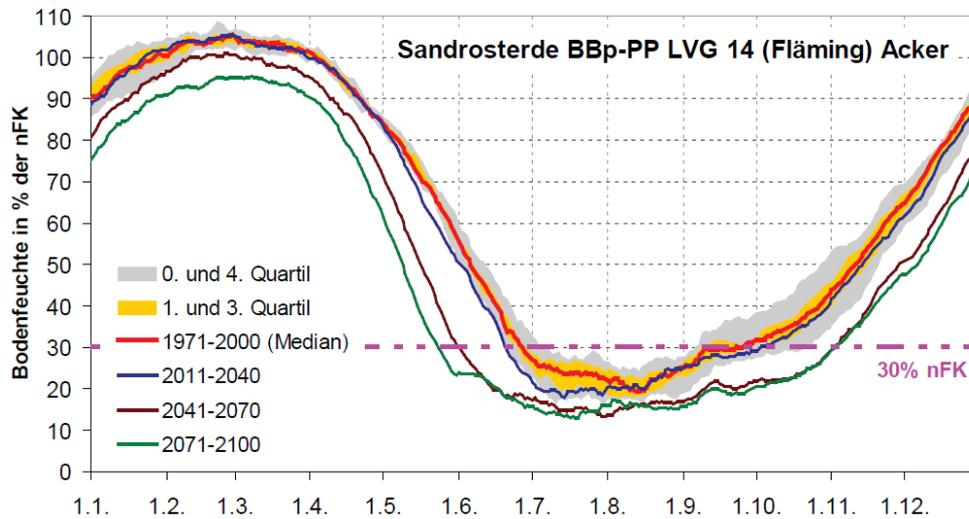


Abbildung 3.52: Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte einer Sandrosterde auf Tagesbasis mit Dürregrenzwert (30% nFK)

4 Gebietswasserhaushalt und Abflussverhältnisse

Die Modelluntersuchungen des Gebietswasserhaushalt und der Abflussverhältnisse wurden nicht flächendeckend für Sachsen-Anhalt durchgeführt, sondern für Gebiete, die für die hydrologischen Gegebenheiten in Sachsen-Anhalt charakteristisch sind. Bei der Auswahl dieser repräsentativen Flussgebiete, die im Folgenden als Referenzgebiete bezeichnet werden, war sicherzustellen, dass

- die in Kapitel 3 bei der Auswahl repräsentativer Standorttypen zugrunde gelegten Landschaftsräumen angemessen repräsentiert werden,
- für diese Flussgebiete Abflussbeobachtungen vorliegen, die eine Kalibrierung des hydrologischen Modells gestatten,
- das hydrologische Regime der zu betrachtenden Flussgebiete möglichst wenig anthropogen überprägt ist, weil damit eine Bewertung der Qualität der simulierten, natürlichen Abflüsse erschwert wird.

In Kapitel 4.1 werden die ausgewählten Referenzeinzugsgebiete vorgestellt und charakterisiert. Für die ausgewählten Flussgebiete wurden dann jeweils,

- ein hydrologisches Modell, basierend auf dem landesweit vorliegenden Modell ArcEGMO-ST, aufgebaut, das den Gebietswasserhaushalt und die quasi-natürlichen Abflussverhältnisse beschreibt,
- eine Parametrisierung dieses Modells vorgenommen (Kapitel 4.2),
- die hydrologischen Verhältnisse für künftige Klimazustände simuliert, ausgewertet und Unsicherheitsanalysen durchgeführt (Kapitel 4.3).

4.1 Auswahl der Referenzgebiete und Kurzcharakteristik

4.1.1 Übersicht

Gemeinsam mit dem Auftraggeber wurden die in Abb. 4.1 dargestellten und in Tab. 4.1 aufgelisteten Flusseinzugsgebiete festgelegt, die in den folgenden Ausführungen beschrieben werden. Abb. 4.2 zeigt die Lithofaziesseinheiten für Sachsen-Anhalt mit den Referenzeinzugsgebieten. Die Hydrogeologie wird in den folgenden Kapiteln näher beschrieben. Eine Übersicht über andere wesentliche Eigenschaften dieser Flusseinzugsgebiete ist in Tab. 4.1 zu finden.

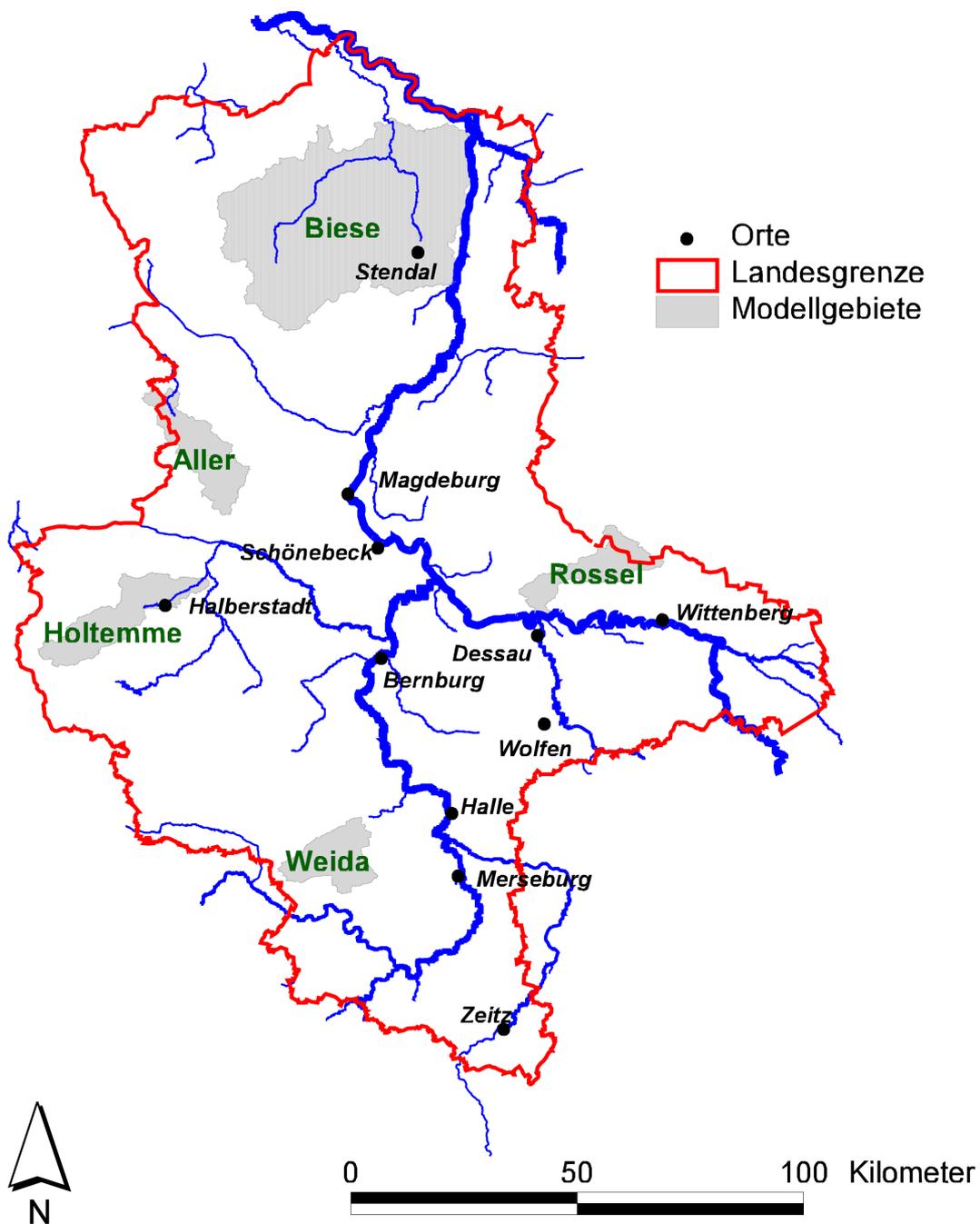


Abbildung 4.1: Referenzgebiete



Abbildung 4.2: Lithofazies der Referenzgebiete

Tabelle 4.1: Übersicht der Landschaftsräume und der Referenzeinzugsgebiete

Landschaftsraum	Altmark und Drömling	Elbetal und glazialer Osten	Harz	Schwarz- erdegebiet	Schwarz- erderegion Harz Regen- schatten
Referenzgebiete	Biese	Rossel	Holtemme	Aller	Weida
Gesamtfläche [km²]	1 745	195	275	249	195
Dominante Boden- formen und Aus- gangsgesteine (BÜK 1000)	Auenboden / Gley aus lehmigen bis tonigen Auensedimenten	Fahlerde / Bänder Para- braunerde / Braunerde aus sandigen Deckschichten über Ge- schiebelehm	Tschernosem / Braunerde aus Löss im Wechsel mit Rendzina aus und Kalk- stein	Tschernosem der Mittel- deutschen Trocken- gebiete aus Löss	Tschernosem der Mittel- deutschen Trocken- gebiete aus Löss
Anteil der dominan- ten Bodenform [%]	44	59	26	36	47
Anteil grundwasser- naher Flächen [%]	23	8	10	6	3
Anteil drainierter Flächen [%]	56	11	11	15	12
Höhenlage [m] (min.; <u>mittl.</u>; max)	20;43;151	57;105;175	85;307;927	82;142;209	76;183;297
Gebietsnieder- schlag [mm/a]	550	616	672	600	550
KWB* [mm/a]	-74	-51	28	-27	-60
Wasseranteil [%]	0,2	0,2	0,3	0,1	0,3
Grünlandanteil [%]	21,2	9,0	7,2	11,8	8,2
Waldanteil [%]	20,1	60,6	30,2	24,8	13,6
Ackeranteil [%]	53,4	25,8	52,9	57,1	70,1
Siedlungsanteil [%]	5,1	4,5	9,5	6,2	7,8

* bezogen auf den Zeitraum 1971–2000

4.1.2 Biese (Altmark und Drömling)

Die Biese mit ihren Zuläufen Milde und Uchte befindet sich in der Altmark im Norden von Sachsen-Anhalt und ist mit einer Fläche von 1 745 km² ein typisches Tieflandeinzugsgebiet. Das Fließgewässernetz, die Teileinzugsgebiete und verfügbaren Pegel zeigt Abb. 4.3. Im Gebiet befinden sich sieben Pegel mit täglichen Durchflussaufzeichnungen. Das Untersuchungsgebiet der Biese weist Geländehöhen von 20 bis 151 m ü. NN auf (Abb. 4.4). Die mittlere Höhe des Gebietes beträgt 43 m ü. NN, das mittlere Gefälle 0,95 %. Abbildung 4.4 zeigt die Landnutzung im Gebiet. Den Hauptanteil mit 53 % hat die ackerbauliche Nutzung. Wald und Grünland liegen zu gleichen Teilen (ca. 20 %) im Untersuchungsgebiet vor. Der Siedlungsanteil beträgt 5 %.

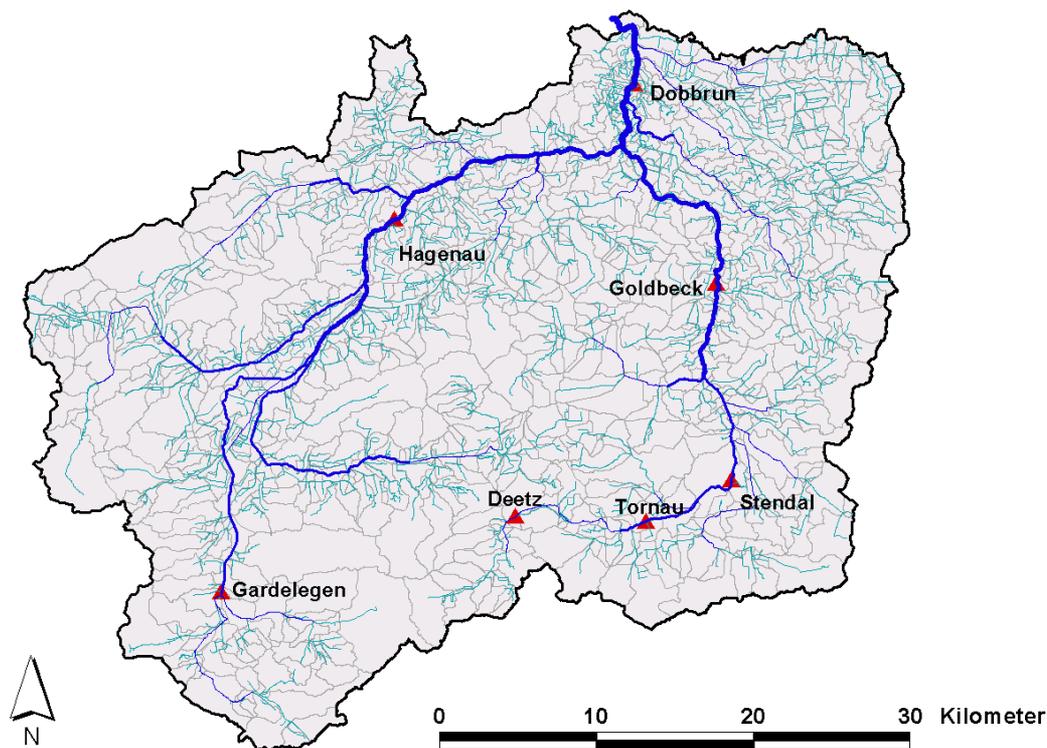


Abbildung 4.3: Biese (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)

Der mittlere Jahresniederschlag liegt für den Zeitraum 1971–2000 bei 550 mm (Tab. 4.1). Hydrogeologisch wird das Einzugsgebiet der Biese durch mächtiges quartäres Lockergestein (Grundmoränen, Grundmoränen mit Decksand, Täler) geprägt. Der größte Teil der Biese ist Grundwasserentlastungsgebiet. Die Biese liegt im Landschaftsraum „Altmark und Drömling“. Die Teilgebiete Biese und Milde gehören zu den Landwirtschaftlichen Vergleichsgebieten „Westliche Altmarkplatten und Klötzer Heide“, „Mittlere Altmarkplatten“ und „Östliche Altmark“ und die Uchte zur „Nördlichen Elbaue mit Havelniederung“.

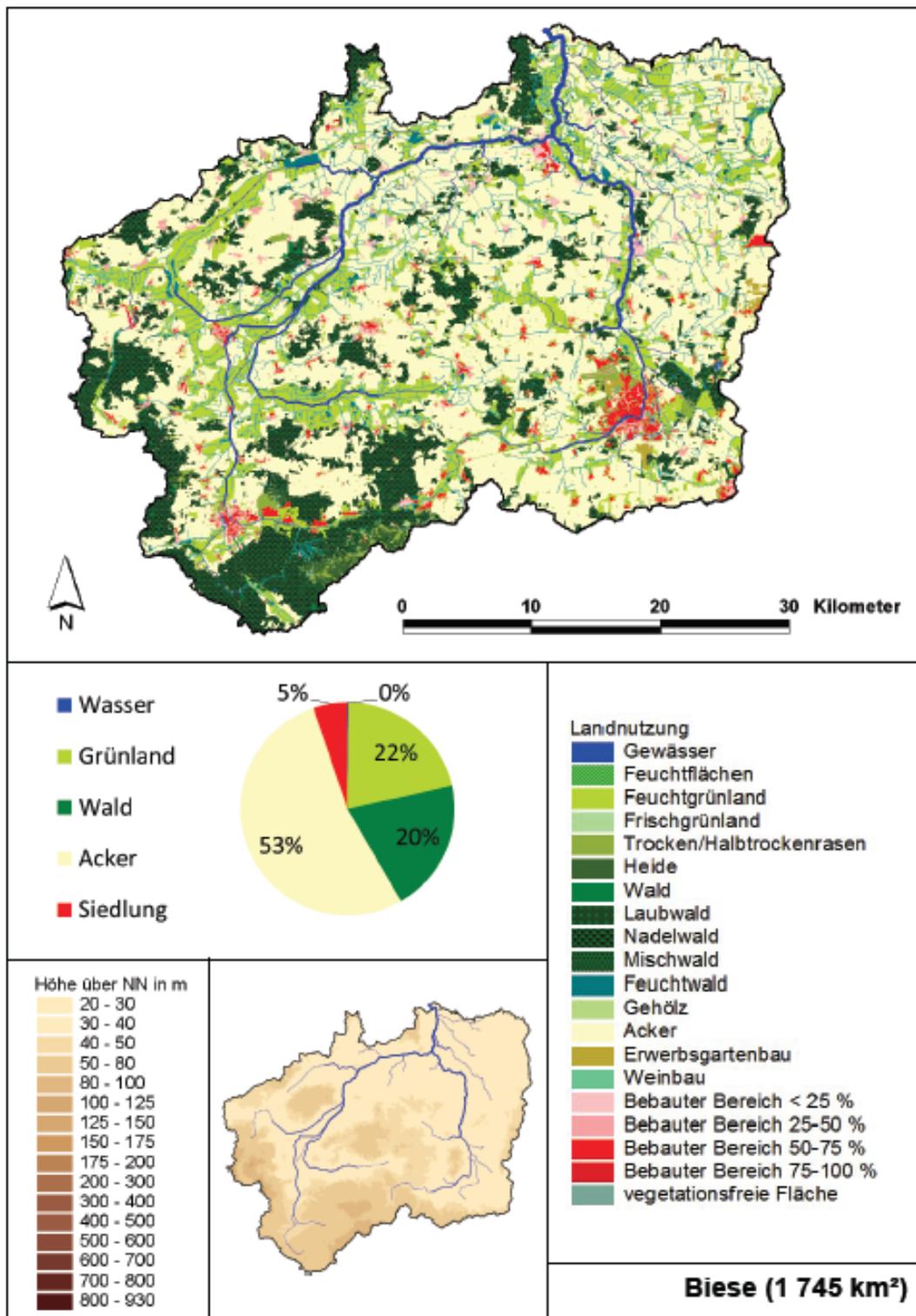


Abbildung 4.4: Biese (Landnutzung, Höhenverhältnisse)

4.1 Auswahl der Referenzgebiete und Kurzcharakteristik

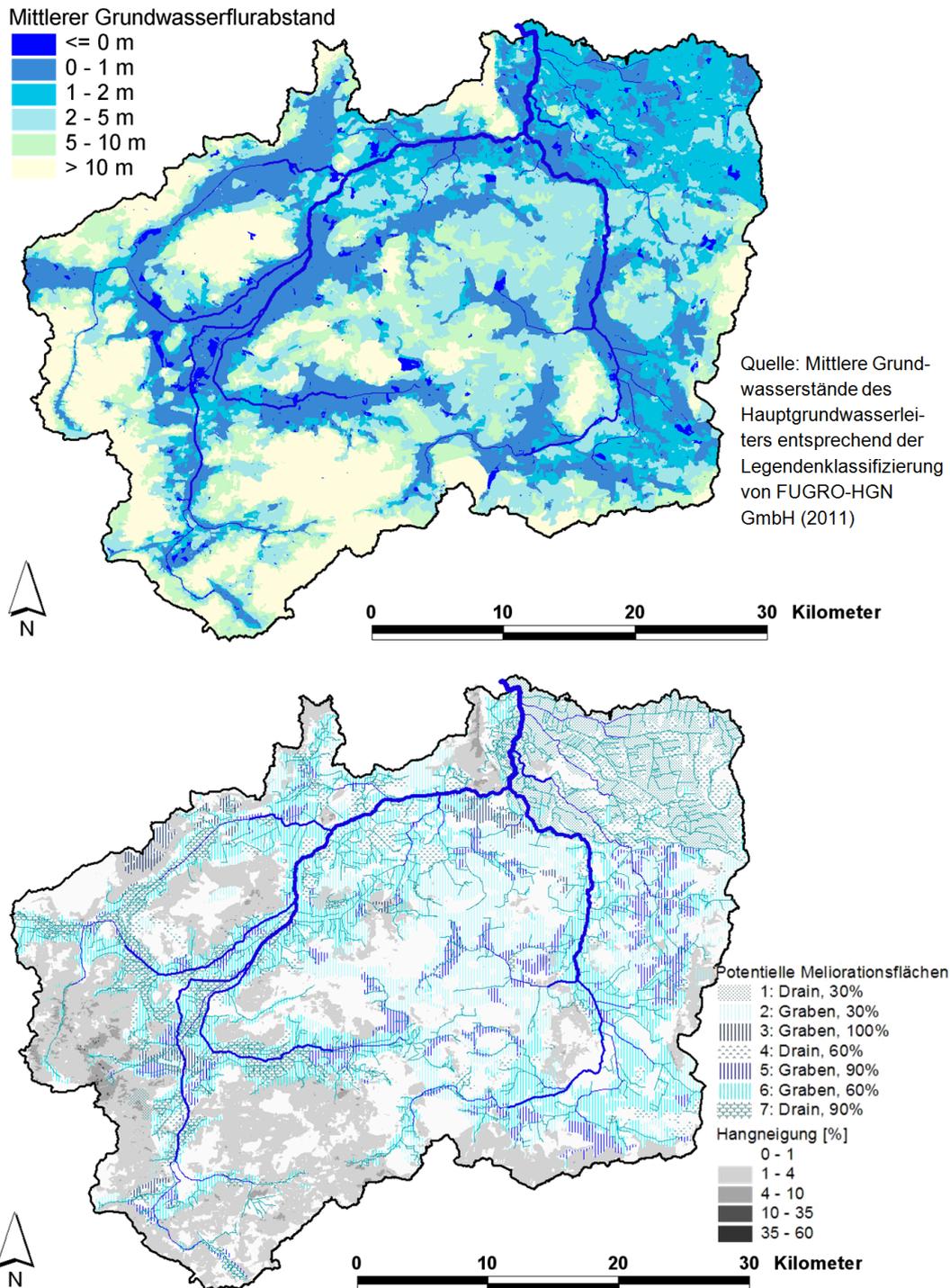


Abbildung 4.5: Biese (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)

4.1.3 Rossel (Elbetal und glazialer Osten)

Die Rossel ist etwa 26 km lang und hat ein Einzugsgebiet von ca. 195 km². Sie ist ein kiesgeprägter Tieflandbach und verläuft am Südrand des Flämings. Sie entspringt nördlich bei Köselitz im Landkreis Wittenberg und fließt in westliche Richtung bis Hundeluft, wo sie südwestlich abknickt und schließlich nach Durchquerung der Stadtlage Roßlau in die Elbe mündet.

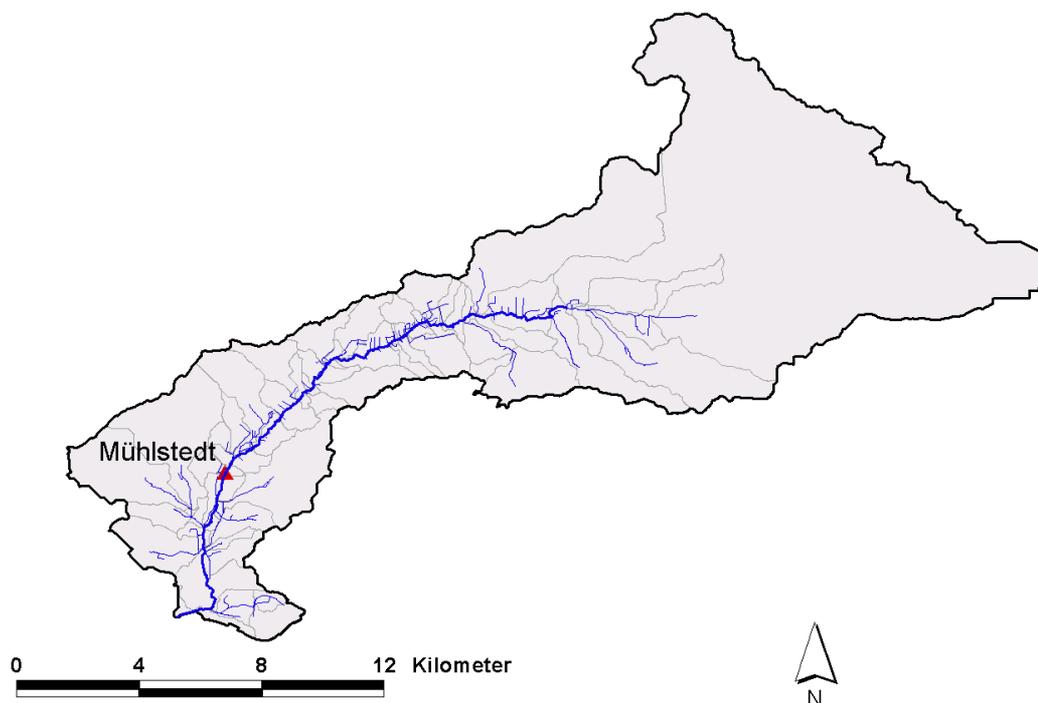


Abbildung 4.6: Rossel (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)

Im Gebiet befindet sich ein Pegel mit täglichen Durchflussaufzeichnungen. Das Untersuchungsgebiet der Rossel weist Höhen von 57 bis 175 m ü. NN auf (Abb. 4.7). Die mittlere Höhe des Gebietes beträgt 105 m ü. NN, das mittlere Gefälle 1 %. Abb. 4.7 zeigt die Landnutzung im Gebiet. Im Einzugsgebiet der Rossel dominiert der Anteil der Waldflächen mit 61 %, gefolgt von der landwirtschaftlichen Nutzung mit 26 % Ackerbau und 9 % Grünland. Der Siedlungsanteil beträgt 4 %.

Der mittlere Jahresniederschlag liegt für den Zeitraum 1971–2000 bei 616 mm (Tab. 4.1). Der unmittelbare Zustrom der Rossel ist im Nord- und Südwesten von Endmoränen, d. h. von Grobgeschiebequellen, geprägt. Zwischen diesen Eisrandlagen dehnt sich eine große Talsandfläche mit relativ hoher Mächtigkeit aus. Das Rosseltal ist eine glaziale Entwässerungsrinne, die heute oberflächlich von holozänen Bildungen mit überwiegend geringen Mächtigkeiten charakterisiert ist. Zusammenfassend ist das Rosseinzugsgebiet hauptsächlich von mächtigem quartärem Lockergestein geprägt (überwiegend Hochflächensand, nördlich auch Sander). Die Rossel ist größtenteils Grundwasserspeisungsgebiet.

4.1 Auswahl der Referenzgebiete und Kurzcharakteristik

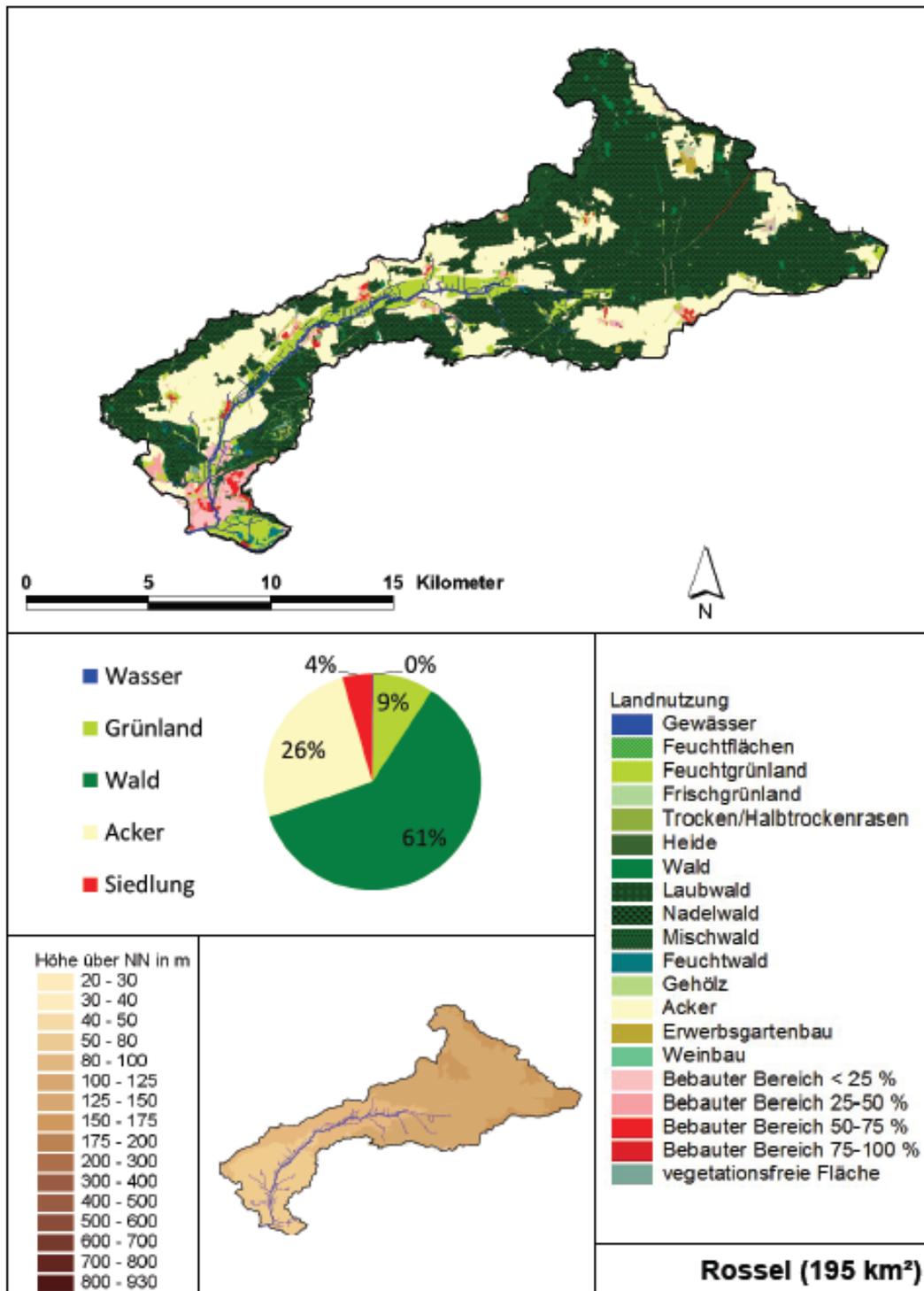


Abbildung 4.7: Rossel (Landnutzung, Höhenverhältnisse)

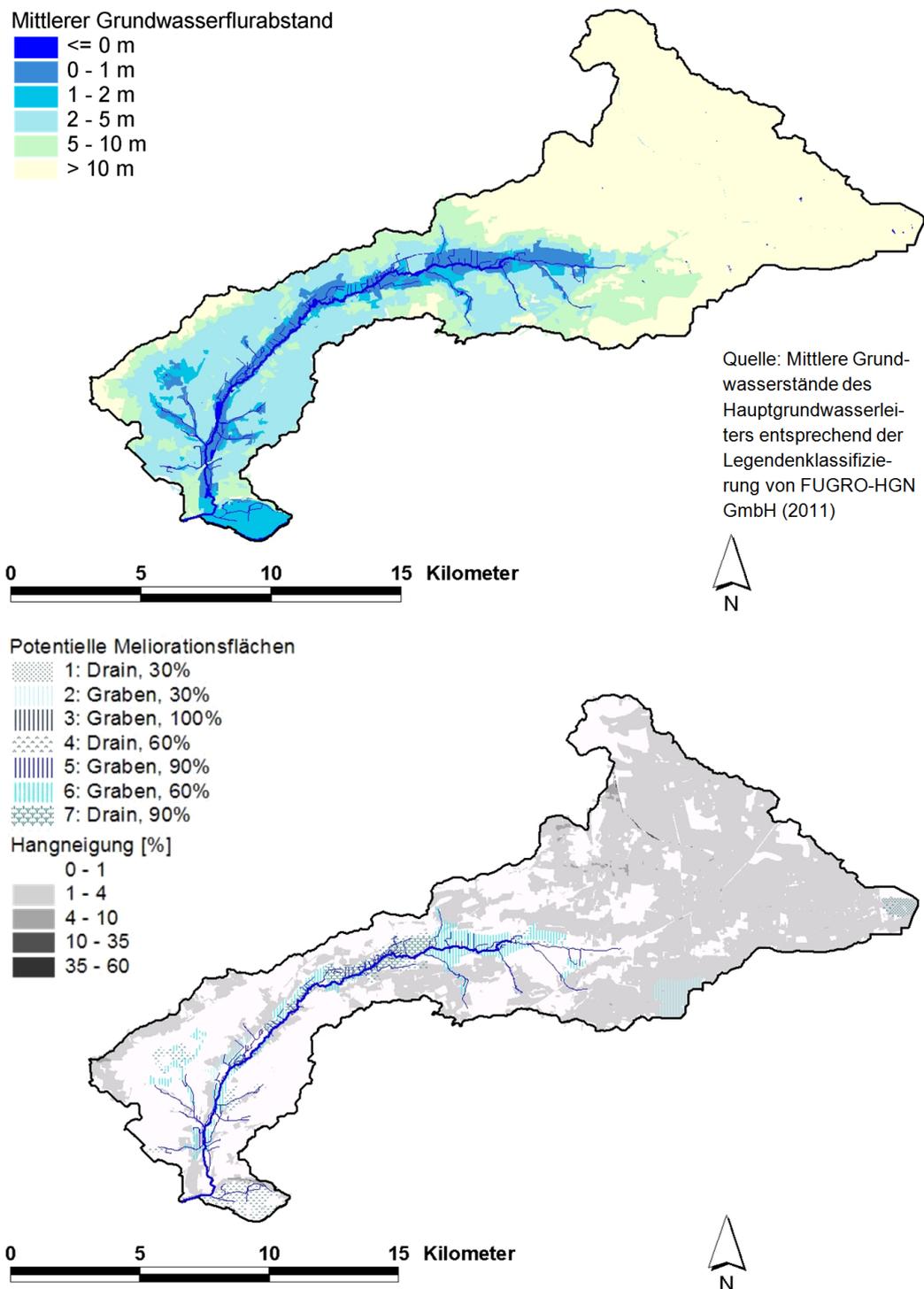


Abbildung 4.8: Rossel (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)

4.1.4 Holtemme (Harz)

Die Holtemme entspringt im Harz am Ostfuß des Brockens und durchfließt im Oberlauf diesen Landschaftsraum. Ab Wernigerode geht sie ins Harzvorland über, was beispielsweise an der scharfen Abgrenzung in der Landnutzung und der Hangneigung in Abb. 4.10 und Abb. 4.11 zu erkennen ist. Die Holtemme ist 47 km lang, mündet linksseitig in die Bode und hat insgesamt ein Einzugsgebiet von ca. 275 km².

Abb. 4.9 zeigt das Fließgewässernetz, die Teileinzugsgebiete und Pegel.

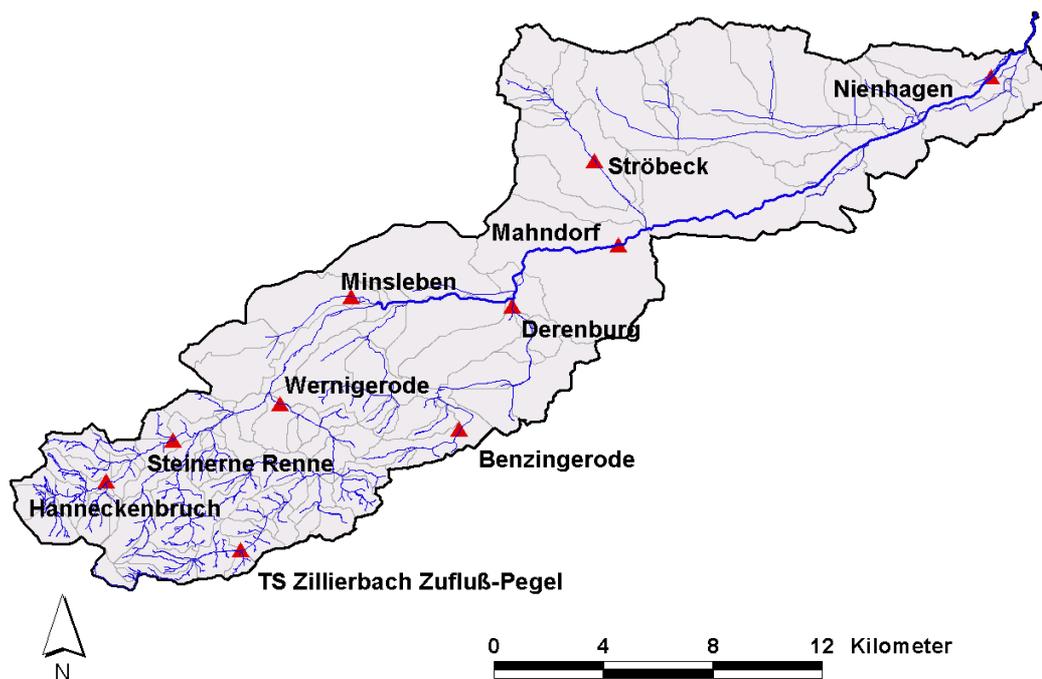


Abbildung 4.9: Holtemme (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)

Im Gebiet befinden sich zehn Pegel mit täglichen Durchflussaufzeichnungen. Das Untersuchungsgebiet der Holtemme weist Höhen von 85 bis 927 m ü. NN auf (Abb. 4.10). Die mittlere Höhe des Gebietes beträgt 307 m ü. NN, das mittlere Gefälle 6,5 %. Abb. 4.10 zeigt die Landnutzung im Gebiet. Die ackerbauliche Nutzung dominiert mit 53 %, gefolgt von Wald mit 30 %. Der Grünlandanteil beträgt etwa 7 % des Einzugsgebietes und etwa 10 % macht den Siedlungsanteil aus.

Der mittlere Jahresniederschlag liegt für den Zeitraum 1971–2000 bei 672 mm (Tab. 4.1). Hydrogeologisch wird das Einzugsgebiet der Holtemme im Oberlauf durch magmatisches Tiefengestein und Tonschiefer, Schiefertone und Grauwacke geprägt. Im weiteren Verlauf treten Rinnen und Depressionen auf, die durch Sandstein und Kalkstein unterbrochen werden. Etwa die Hälfte der Holtemme ist Grundwasserspeisungsgebiet, während die zweite Hälfte im Unterlauf ein Transitgebiet bildet.

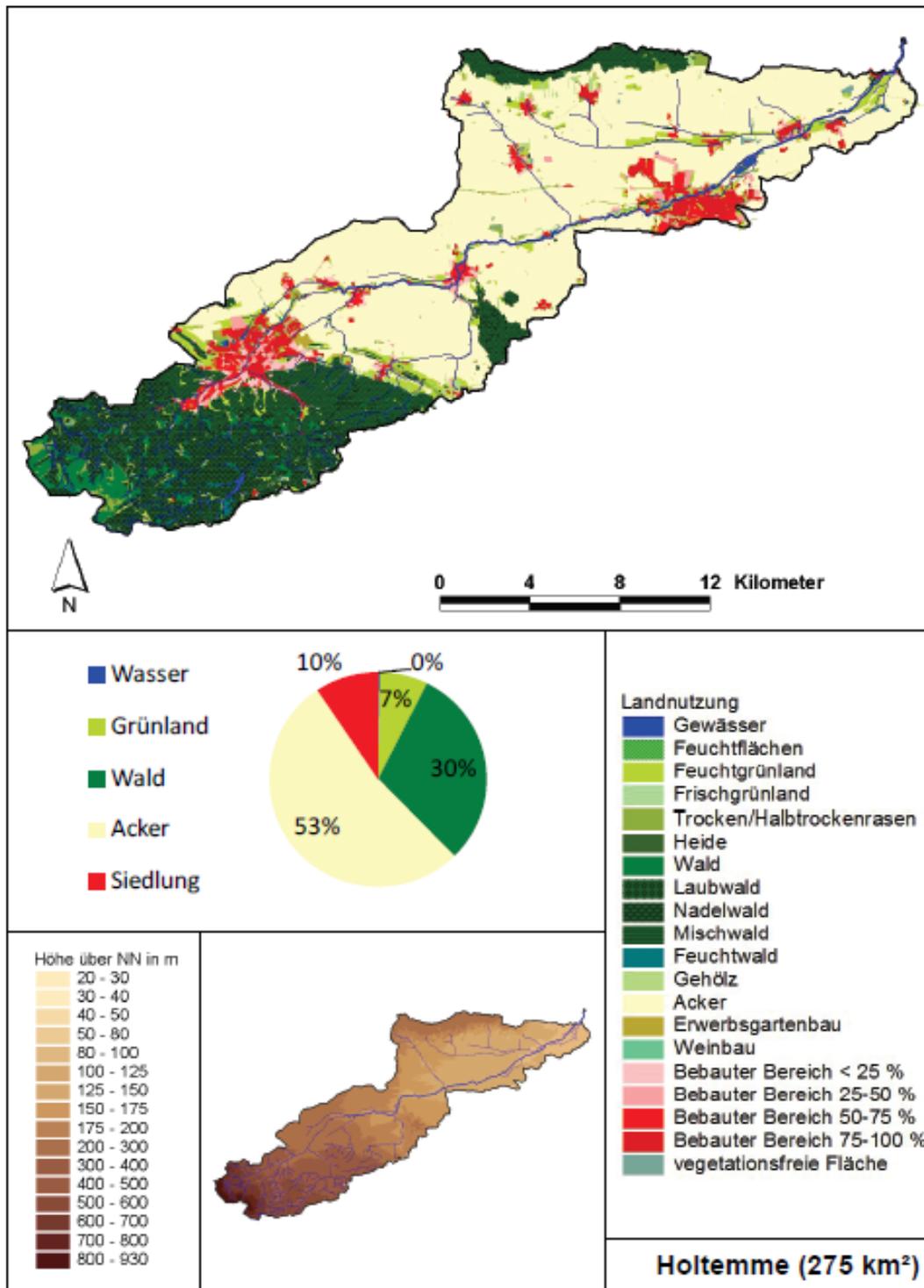


Abbildung 4.10: Holtemme (Landnutzung, Höhenverhältnisse)

4.1 Auswahl der Referenzgebiete und Kurzcharakteristik

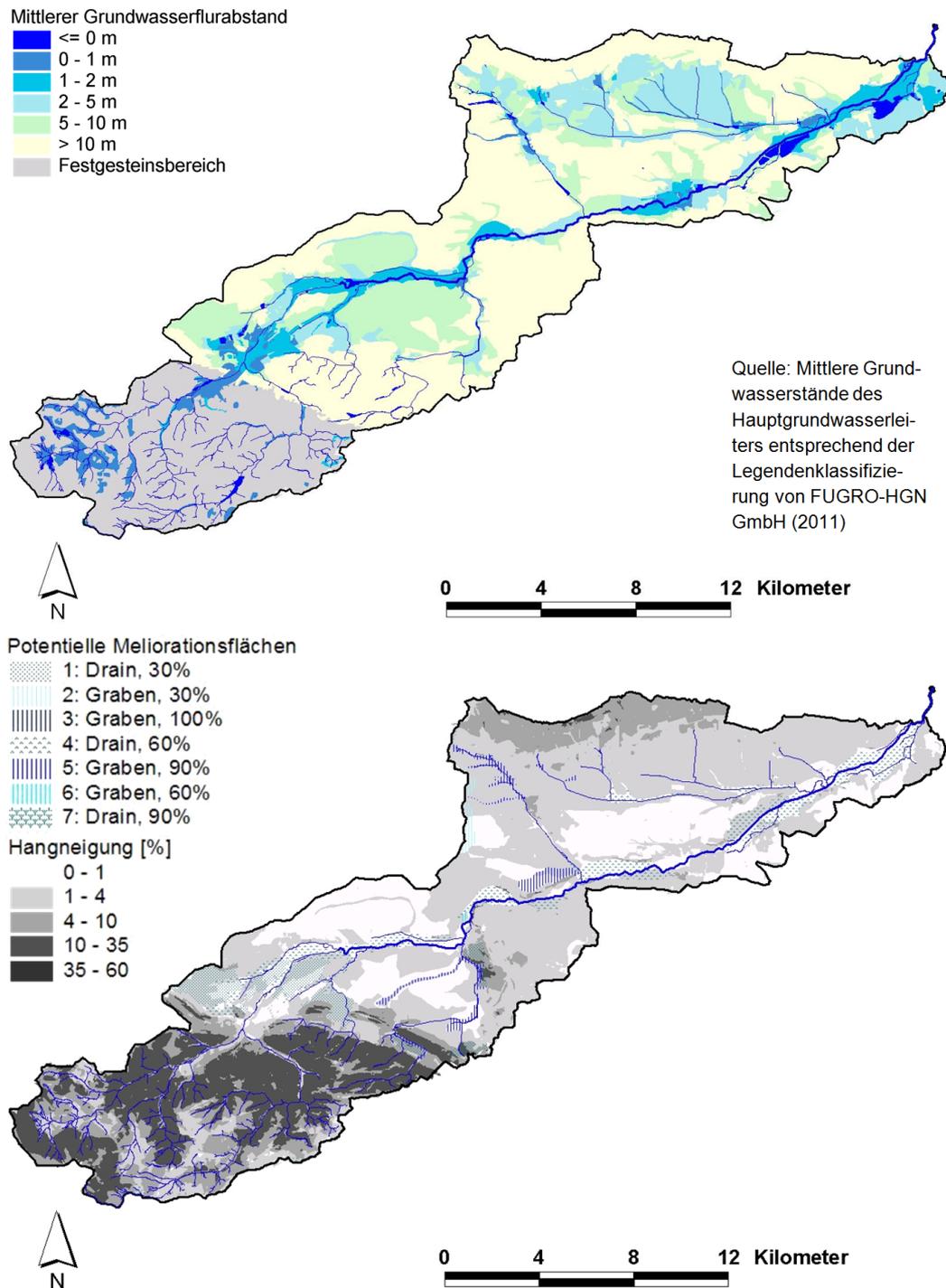


Abbildung 4.11: Holtemme (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)

4.1.5 Aller (Schwarzerdegebiet)

Die Aller ist ein Tieflandfluss mit einer Gesamteinzugsgebietsgröße von etwa 15 745 km², wovon sich etwa 510 km² in Sachsen-Anhalt befinden.



Abbildung 4.12: Aller (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)

Sie entspringt am westlichen Rand der Magdeburger Börde in Sachsen-Anhalt, fließt in nordwestliche Richtung und hat eine Gesamtlänge von 260 km. Im Oberlauf durchquert die Aller als ausgebauter Bach hügeliges und intensiv bewirtschaftetes Ackerland. Nach 60 Flusskilometern erreicht sie den Südrand des Drömlings und durchfließt ab dort das nach ihr benannte Elbe-Aller-Urstromtal, dem sie folgt, bis sie in die mittlere Weser bei Verden mündet.

Das Untersuchungsgebiet umfasst die obere Aller bis zum Pegel Weferlingen (249 km²). Das Fließgewässernetz, die Teileinzugsgebiete und Pegel zeigt Abb. 4.12. Im Gebiet befinden sich vier Pegel mit täglichen Durchflussaufzeichnungen.

4.1 Auswahl der Referenzgebiete und Kurzcharakteristik

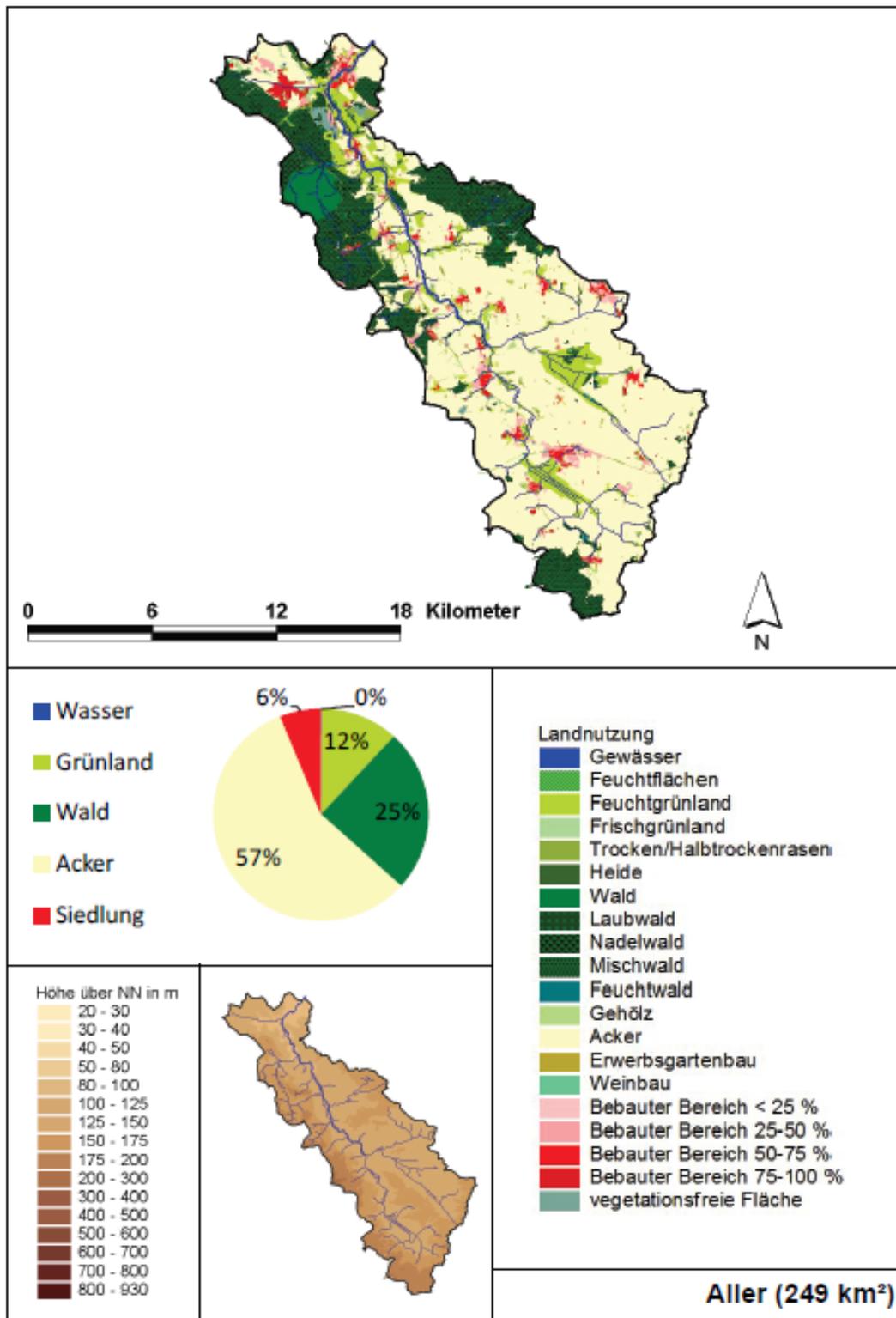


Abbildung 4.13: Aller (Landnutzung, Höhenverhältnisse)

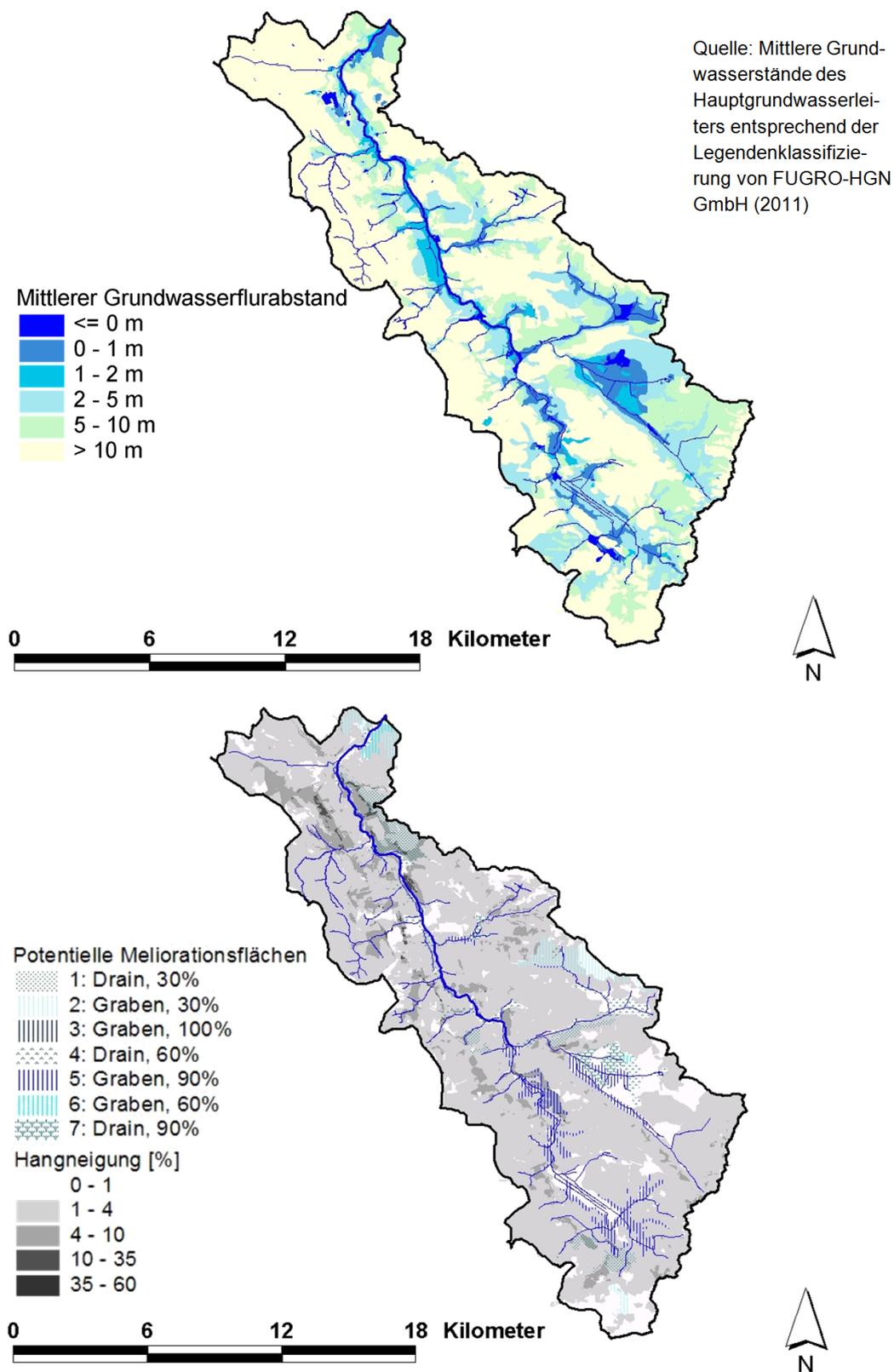


Abbildung 4.14: Aller (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)

Das Untersuchungsgebiet der Aller weist Höhen von 82 bis 209 m ü. NN auf (Abb. 4.13). Die mittlere Höhe des Gebietes beträgt 142 m ü. NN, das mittlere Gefälle 3 %. Abb. 4.13 zeigt die Landnutzung im Gebiet. Die ackerbauliche Nutzung überwiegt mit einem Anteil von 57 %. Wald macht ein Viertel des Gebietes aus, während etwa der Grünlandanteil 12 % und der Siedlungsanteil 6 % beträgt.

Der mittlere Jahresniederschlag liegt für den Zeitraum 1971–2000 bei 600 mm (Tab. 4.1). Hydrogeologisch wird das Einzugsgebiet der Aller durch Quartäre Sande und Kiese unter Lößbedeckung geprägt, die von Tonmergel-, Mergel- und Kalkmergelstein umgeben sind. Dies kann zu unterirdischen Zu- oder Abflüssen führen. Der größte Teil der Aller in Sachsen-Anhalt ist Grundwasserspeisungsgebiet.

4.1.6 Querne/Weida (Schwarzerderegion im Regenschatten des Harzes)

Die Weida entspringt als Querne nördlich der Stadt Querfurt. Die Querne fließt zunächst in östlicher Richtung nach Lodersleben und Querfurt und heißt von da an Weida. In Obhausen biegt sie nach Norden, und ab der Ortschaft Stedten fließt sie in nordwestliche Richtung.

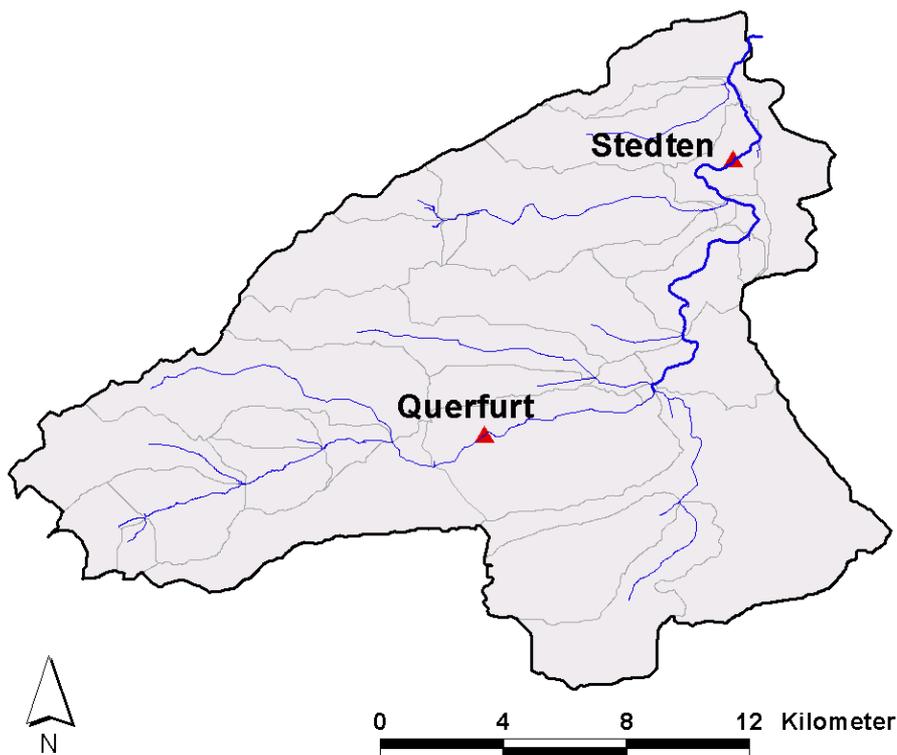


Abbildung 4.15: Weida (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)

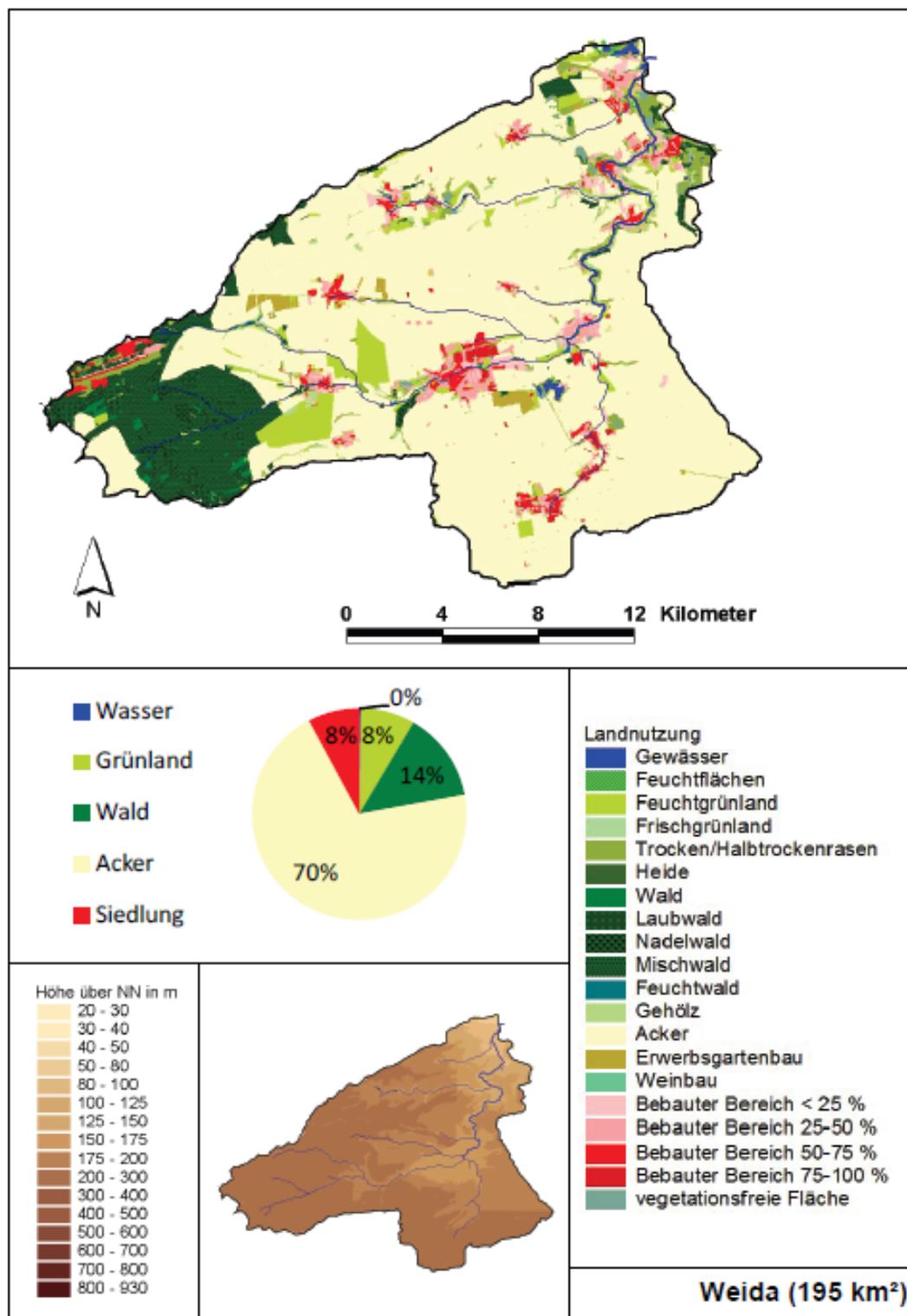


Abbildung 4.16: Weida (Landnutzung, Höhenverhältnisse)

4.1 Auswahl der Referenzgebiete und Kurzcharakteristik

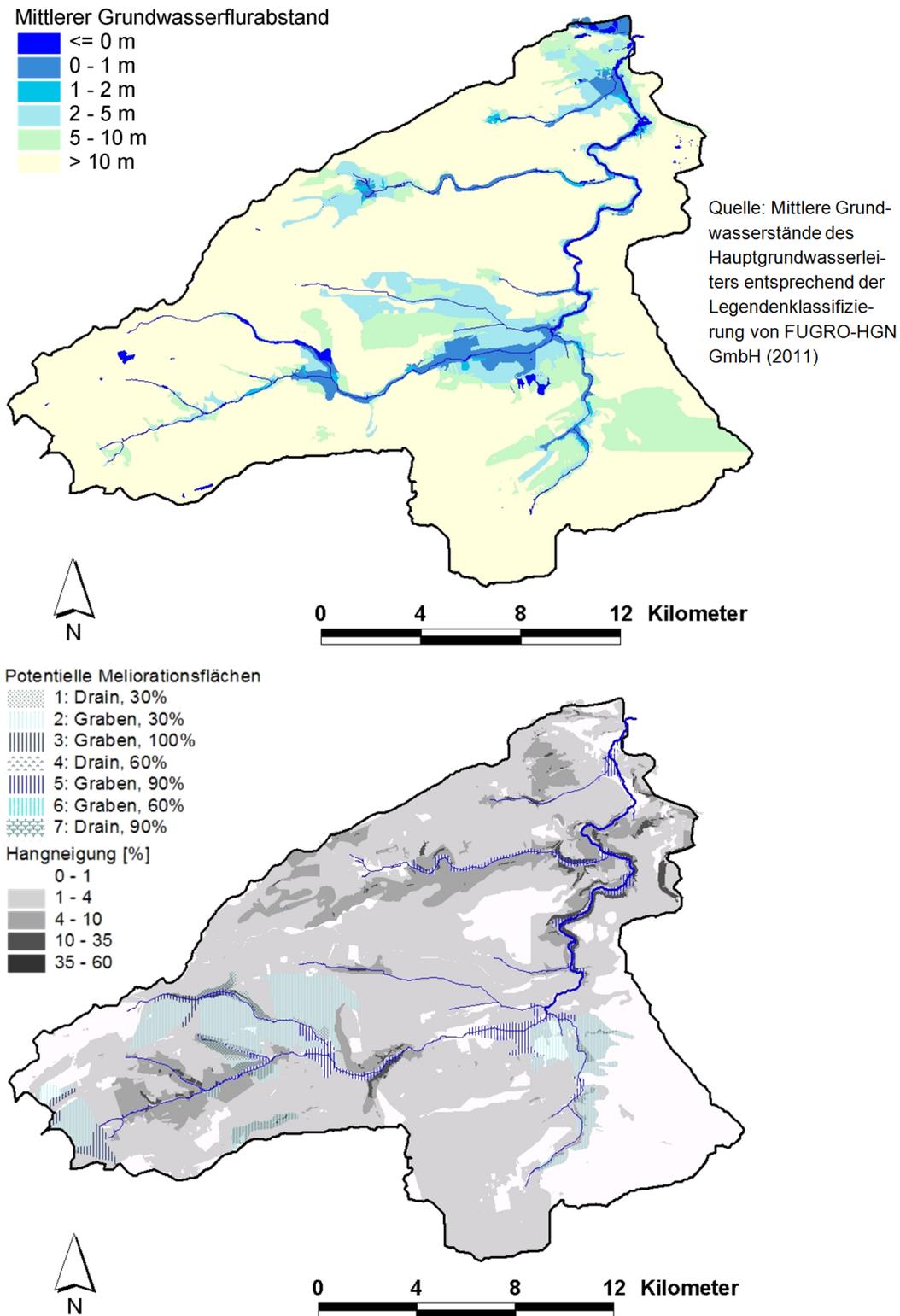


Abbildung 4.17: Weida (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)

Ursprünglich mündete sie in den Salzigen See. Stattdessen leitet sie heute ein Kanalnetz am Kernersee vorbei. Weiter flussabwärts wird sie nach der Einmündung der Bösen Sieben Salza genannt und diese mündet letztlich in die Saale.

Das Fließgewässernetz, die Teileinzugsgebiete und Pegel zeigt Abb. 4.15. Im Gebiet befinden sich zwei Pegel mit täglichen Durchflussaufzeichnungen. Das Untersuchungsgebiet der Weida weist Höhen von 76 bis 279 m ü. NN auf (Abb. 4.16). Die mittlere Höhe des Gebietes beträgt 183 m ü. NN, das mittlere Gefälle 4 %. Abbildung 4.16 zeigt die Landnutzung im Gebiet. Die ackerbauliche Nutzung überwiegt mit einem Flächenanteil von 70 %. Wald macht einen Gebietsanteil von 14 % aus, während Siedlungs- und Grünlandflächen in gleichen Teilen (jeweils 8 %) vorliegen.

Der mittlere Jahresniederschlag liegt für den Zeitraum 1971–2000 bei 550 mm (Tab. 4.1). Hydrogeologisch wird das Einzugsgebiet der Weida durch Sandstein, Kalkstein und Löss geprägt. Der Oberlauf der Weida ist Grundwasserspeisungsgebiet, während der Unterlauf im Modellgebiet als Transitgebiet fungiert.

4.2 Parametrisierung der Gebietsmodelle

Die Parametrisierung der Gebietsmodelle erfolgte in 3 Stufen:

1. ArcEGMO leitet über Transferfunktionen wesentliche Modellparameter direkt aus der GIS-Datenbasis ab. Es wurde die 2007 erstellte Parametrisierung übernommen (Kapitel 2.3). Aufgrund der Aktualisierung der Basisinformationen zur Drainierung und zur Grundwasserbeeinflussung der Böden (Kapitel 2.2) erfolgte eine Präzisierung der betreffenden Modellparameter (Kapitel 3.2.1).
2. Zusätzliche Parameter wurden im Rahmen der Vegetationsmodellierung (Kapitel 3.2.2) für repräsentative Vegetations-Boden-Kombinationen abgeleitet und für die Gebietsmodellierung auf weitere, in den Referenzgebieten vorkommenden Standorttypen übertragen. Damit war einerseits eine beobachtungsbasierte Beschreibung phänologischer Prozesse im Gebietsmaßstab gesichert und gleichzeitig eine Möglichkeit zur Validierung der Standortparametrisierung über die Abbildung des Gebietswasserhaushaltes gegeben.

Die damit gegebene Parametrisierung der Abflussbildung wurde im Zuge der folgenden Modellkalibrierung nicht verändert.

3. Im Rahmen der Modellkalibrierung wurden nur Parameter zur Beschreibung der Abflusskonzentration im Grundwasser und im Oberflächengewässersystem betrachtet. Die Abflusskonzentration im Grundwasser wurde über den Ansatz SLOWCOMP (SCHWARZE et al., 2004) über Einzellinienarspeicher beschrieben, die in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Verhältnissen parametrisiert werden. Da SCHWARZE et al. (2004) für diese

Parameter Unsicherheitsbänder angibt, war eine Parameteroptimierung innerhalb dieser Bänder möglich. Ebenfalls optimiert wurden die Parameter zur Erfassung der Retention in den Oberflächengewässern.

Zielgröße für die Kalibrierung waren die Durchflüsse an 6 bis 8 geeigneten Pegeln in den zu betrachtenden Referenzgebieten. Insgesamt waren 24 Pegel verfügbar, von denen einige stark durch anthropogene Überprägungen des hydrologischen Regimes beeinflusst waren. Diese wurden von vornherein von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Die Durchflussreihen der verbliebenen Pegel wurden auf Konsistenz und Zeiträume anthropogener Beeinflussung untersucht. Diese Analysen waren insofern von grundlegender Bedeutung, als für die Abbildung des quasi-natürlichen Dargebots diese Einflüsse nicht die Parametrisierung verfälschen dürfen. Ausgewählt wurden letztlich die in dargestellten 8 Pegel. Kriterium war, dass jedes Gebiet durch mindestens einen Pegel hinsichtlich der Modellgüte bewertet werden kann. Um eine gewisse Gleichstellung der Gebiete zu gewährleisten, sollten auch in keinem Gebiet mehr als 2 Pegel betrachtet werden. Für die Kalibrierung wurde der Zeitraum 1961–2010 simuliert, wobei die ersten zehn Jahre zum Einschwingen des Modells dienten. Die Beurteilung der Modellgüte erfolgte jeweils für die Zeiträume, für die Messdaten vorlagen.

Die Bewertung erfolgte anhand folgender Kriterien:

- Übereinstimmung der gewässerkundlichen Hauptzahlen (MNQ, MQ und MHQ),
- Abbildung der Hochwasserkennwerte (HQ₁₀₀),
- Erfassung des Abflussregimes, d. h. der kurz-, mittel- und langfristigen Abflussdynamik anhand der Übereinstimmung der Tageswerte, der Monatswerte und des innerjährlichen Ganges

über

- a) eine visuelle Einschätzung der Modellierungsgüte und
- b) mittels sogenannter Gütekriterien.

Zur visuellen Bewertung wurden die simulierten den gemessenen Durchflüssen in Zeitreihengrafiken gegenübergestellt und nach optischen Kriterien die Modellierungsgüte beurteilt. Diese Zeitreihendarstellungen sind in der Hydrologie üblich, weil hydrologische Prozesse autokorreliert sind und eine große Persistenz aufweisen.

Ein in der Hydrologie häufig genutztes Gütekriterium zur Bewertung der Übereinstimmung zwischen simulierten (Q^{sim}) mit den beobachteten (Q^m) Durchflusswerten ist die Effizienz NSE nach NASH und SUTCLIFFE (1979), die im Wertebereich zwischen $-\infty$ und $+1$ liegt und bei optimaler Modellanpassung sich dem Wert $+1$ nähert.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i [Q_i^{sim} - Q_i^m]^2}{\sum_i [Q_i^m - \bar{Q}^m]^2} \quad (4.1)$$

zeigt die gewässerkundlichen Hauptzahlen und die HQ_{100} für die simulierten und beobachteten Abflüsse an den ausgewählten Pegeln.

Die Effizienz NSE wurde sowohl für die Monatsmittelwerte als auch für die Abbildung des innerjährlichen Gangs der Tagesmittelwerte berechnet (Tab. 4.2). Danach ist die Abbildung der mittleren Verhältnisse in allen Gebieten sehr gut bis befriedigend.

Die Werte des HQ_{100} wurden mit dem Programm HQ-EX 3.0[®] aus den gemessenen und simulierten Tagesmittelwerten ermittelt. Die Schätzung erfolgte unter Nutzung der Gemischten Extremwertverteilung (Rossi-Verteilung) und der Maximum-Likelihood-Methode, da diese für die beobachteten Zeitreihen an den meisten Pegeln die beste Anpassung brachte. DYCK und PESCHKE (1983) empfehlen eine maximale Extrapolation bei der statistischen Ableitung von Bemessungswerten bis zum 3-fachen der Beobachtungsreihe. Dies bedeutet, dass für die Ermittlung des HQ_{100} mindestens eine 33-jährige Reihe ausgewertet werden muss. Da für die Biese-Pegel der Zeitraum verfügbarer Daten unter 10 Jahren lag, konnte hier keine statistische Analyse durchgeführt werden. Für die Pegel Mühlstedt, Nienhagen und Walbeck liegt das aus den Tagesmittelwerten abgeleitete HQ_{100} außerhalb des zulässigen Extrapolationsbereichs, weil die Zeitreihe kürzer ist als 33 Jahre. In Tab. 4.2 sind diese Werte daher in grau geschrieben.

Tabelle 4.2: Gewässerkundliche Hauptzahlen, HQ_{100} (aus Tagesmittelwerten abgeleitet) und Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) für die Abflüsse an ausgewählten Pegeln

Gebiete		Biese		Rossel		Holtemme		Aller		Weida
Pegel		Gold- beck	Dobbrun	Mühl- stedt	Mahn- dorf	Nien- hagen	Wal- beck	Wefer- lingen	Stedten	
Länge Pegel- reihe	[Jahre]	6	6	14	39	29	29	40	39	
EZG	[km ²]	430	1597	157	168	271	231	249	173	
Mq gem.	[l/(s*km ²)]	3,3	3,4	4,2	8,0	6,0	2,9	3,7	1,7	
MNQ gem.	[m ³ /s]	0,25	1,42	0,47	0,41	0,45	0,20	0,22	0,15	
MNQ sim.	[m ³ /s]	0,39	1,86	0,47	0,17	0,27	0,16	0,20	0,13	
MQ gem.	[m ³ /s]	1,4	5,5	0,7	1,3	1,6	0,7	0,9	0,3	
MQ sim.	[m ³ /s]	1,3	5,1	0,6	1,3	1,6	0,7	0,8	0,3	
MHQ gem.	[m ³ /s]	8,0	20,5	1,6	10,2	11,4	4,1	5,0	2,4	
MHQ sim.	[m ³ /s]	6,6	20,6	1,4	10,6	12,1	3,4	4,4	1,4	
HQ₁₀₀ gem.	[m ³ /s]	–	–	4,7	36,0	38,9	14,1	15,4	10,7	
HQ₁₀₀ sim.	[m ³ /s]	–	–	3,7	36,3	40,1	13,4	16,5	10,4	
NSE (Monat)	–	0,80	0,80	0,18	0,76	0,80	0,79	0,75	0,48	
NSE (Jahresgang)	–	0,74	0,73	0,44	0,82	0,85	0,90	0,89	0,68	

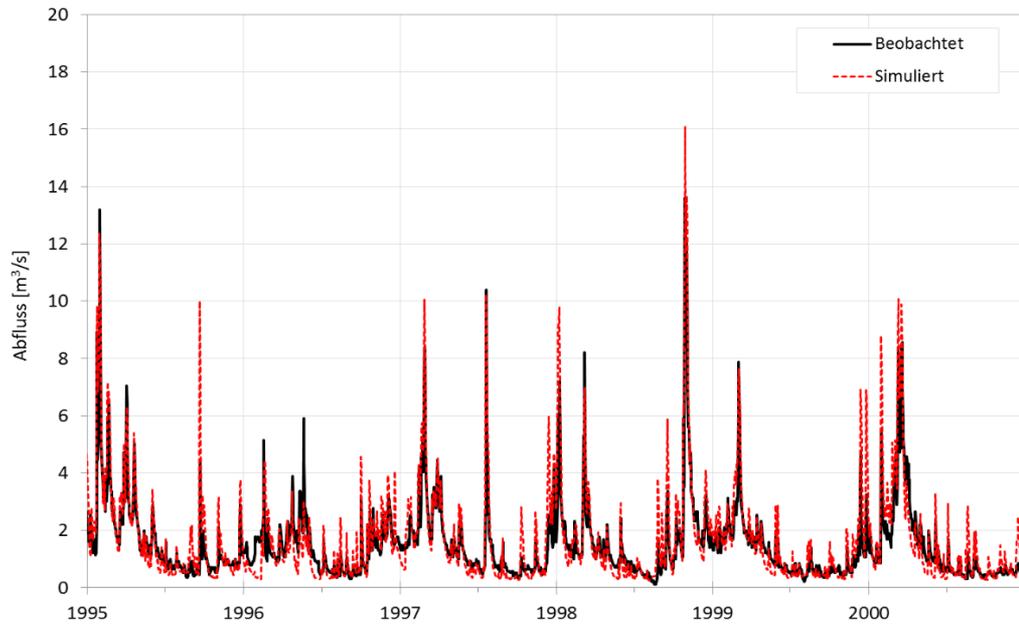


Abbildung 4.18: Mittlere Tagesabflüsse am Pegel Nienhagen

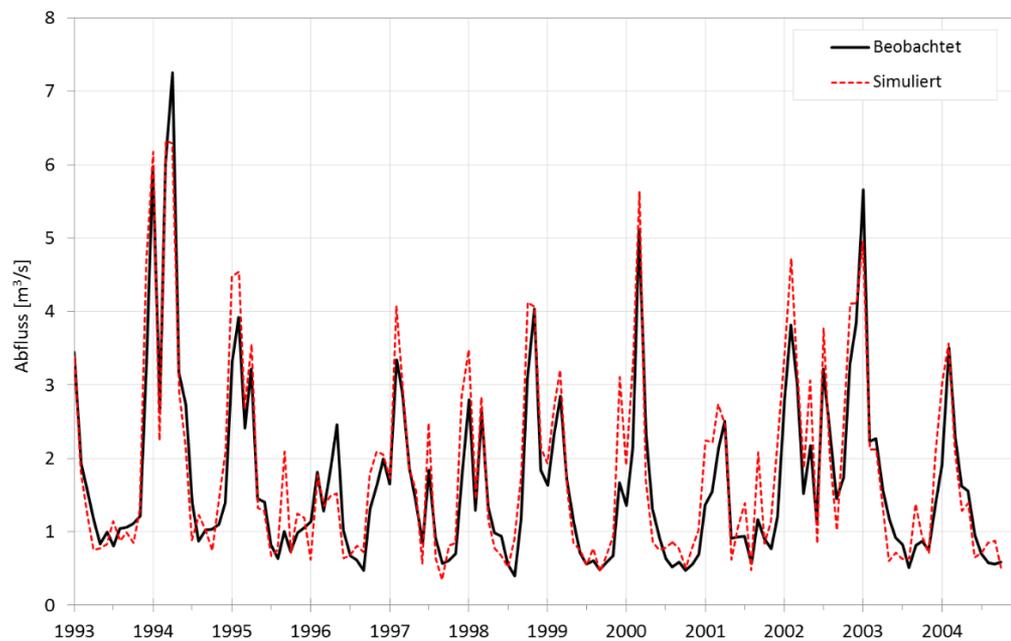


Abbildung 4.19: Monatsmittelwerte der mittleren Tagesabflüsse am Pegel Nienhagen

Die visuelle Einschätzung der Modellierungsgüte soll an dieser Stelle repräsentativ am Beispiel der Holtemme nachvollzogen werden. Hier werden sowohl die mittleren Abflussverhältnisse als auch die Hochwasserabflüsse sehr gut abgebildet (Tab. 4.2).

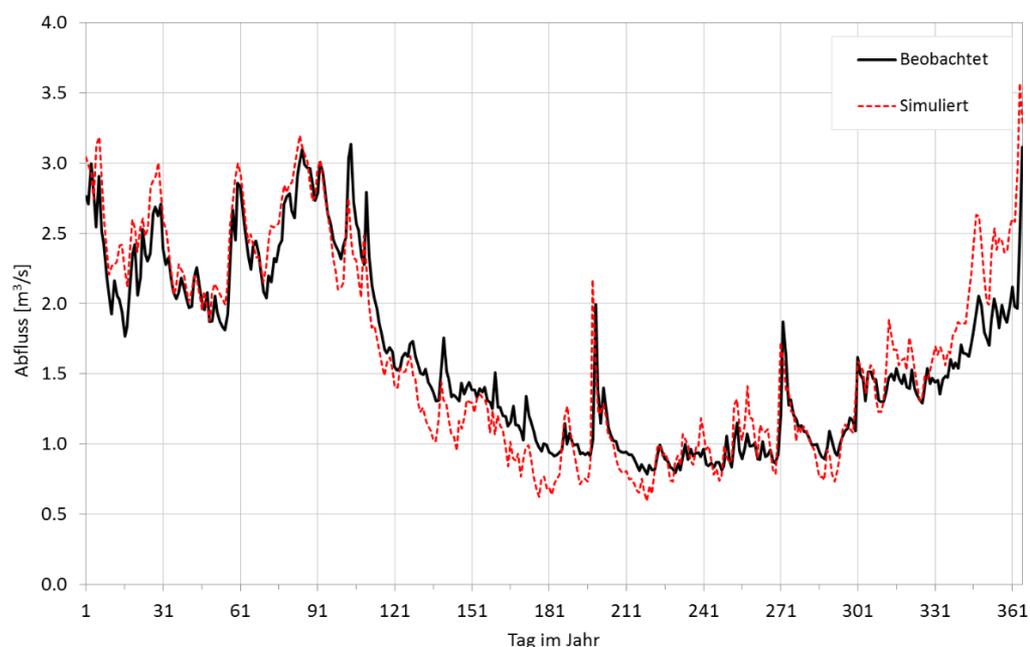


Abbildung 4.20: Innerjährlicher Gang der mittleren Tagesabflüsse am Pegel Nienhagen (1983-2010)

Der Pegel Nienhagen ist der unterste verfügbare Pegel und damit stellvertretend für die Gesamtabflussbildung im Modellgebiet. Abb. 4.18 und Abb. 4.19 verdeutlichen, dass die mittleren Tages- und Monatsabflüsse gut abgebildet werden, was sich in einer hohen NSE von 0,8 für die Monatsmittelwerte widerspiegelt (Tab. 4.2).

Das Modell bildet den jahreszeitlichen Verlauf ab, lediglich die Abflüsse im Frühjahr werden etwas unter- und im Spätherbst überschätzt (Abb. 4.20).

4.3 Ergebnisse: Klimafolgen für die Gebietshydrologie

4.3.1 Darstellungsweise

Bevor auf die Folgen des Klimawandels für den Gebietswasserhaushalt und die Abflussverhältnisse eingegangen werden kann, soll an dieser Stelle Grundlegendes zur Darstellungsweise der genannten Größen erwähnt werden:

Als Gesamtabfluss wird die Summe aus Direktabfluss und Grundwasserabfluss bezeichnet. Der Direktabfluss beschreibt das schnell abfließende Wasser, das nach einem Niederschlagsereignis oder nach der Schneeschmelze unmittelbar oder nur mit kurzer Zeitverzögerung den Vorfluter erreicht. Er setzt sich aus schnellen Komponenten zusammen, wie beispielsweise dem Landoberflächenabfluss, der meist auf versiegelten und grundwasser- oder gewässernahen Flächen entsteht. Bei hohem Bodenwassergehalt und hoher Niederschlagsintensität kann Oberflächenabfluss darüber hinaus auf weiteren Flächen auftreten.

Im Modell ArcEGMO-ST werden als weitere Komponenten des schnellen Direktabflusses der Kanalisationsabfluss und der Drainageabfluss ausgegeben. Der Kanalisationsabfluss wird auf versiegelten Flächen gebildet. Je nach Flächenanschlussgrad wird charakterisiert, welcher Anteil des Regenwassers auf versiegelten Flächen von der Kanalisation erfasst und an den Vorfluter weitergeleitet wird und welcher Anteil vor Ort und damit diffus bzw. dezentral versickert.

Der hypodermische Abfluss bildet die verzögerte Komponente des Direktabflusses, der im Modell ArcEGMO-ST als bodeninnerer lateraler Abfluss in Abhängigkeit von der Schichtneigung gebildet wird. Dies ist der Fall, wenn die hydraulische Leitfähigkeit der unterliegenden Schicht kleiner ist als in der betrachteten Schicht, deren Matrix-Porenvolumen sehr klein oder deren gesamter Porenraum wassergesättigt ist.

In den folgenden Darstellungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt wird vereinfachend und zusammenfassend der Direktabfluss aus Oberflächenabfluss, Kanalisationsabfluss, Drainageabfluss und hypodermischem Abfluss als eine Größe zusammengefasst.

Um Aussagen zu möglichen Änderungen der Grundwasserverhältnisse ableiten zu können, wird die Entwicklung der Grundwasserneubildung (Menge und innerjährlicher Gang) näher untersucht. Mit Hilfe des PSCN-Modells wird die Versickerung aus der Bodenzone modelliert, die vor allem im Tiefland weitgehend identisch mit der Grundwasserneubildung ist, sofern die Bildungsflächen nicht drainiert sind.

Der Grundwasserabfluss wird aus dem Sickerwasser mit dem Modell SLOWCOMP (SCHWARZE et al., 2004) berechnet und dabei auf eine schnelle und eine langsame Komponente aufgeteilt (Kapitel 2.1). Der SLOWCOMP-Ansatz liefert insbesondere die hydrogeologisch fundierte Parametrisierung für die Einzelnearspeicher, d. h. er dient hauptsächlich zur Beschreibung des Retentionsverhaltens im Untergrund. Da es in der folgenden Analyse jedoch darum geht, die Wahrscheinlichkeit von Extremen der Grundwasserstände auf die Grundwasserneubildung zurückzuführen, wird im Folgenden unter dem Begriff Grundwasserabfluss die schnelle und die langsame Komponente vereinfachend zusammengefasst. Die Summe aus den beiden Komponenten entspricht mengenmäßig weitgehend der Grundwasserneubildung.

In den Bilanztabellen, in denen die Wasserhaushaltskomponenten zusammenfassend dargestellt werden, kann es vor allem in den Tieflandgebieten mit großen Anteilen grundwassernaher Flächen vorkommen, dass die Kategorien Gesamtabfluss oder Grundwasserabfluss mit dem Eintrag „kein Abfluss“ charakterisiert sind. Dies bedeutet, dass im Modellgebiet insgesamt mehr verdunstet wird, als über den Niederschlag aufgefüllt werden kann.

Trotz der negativen Bilanz für das gesamte Modellgebiet wird an den betrachteten Pegeln dennoch Abfluss registriert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf bestimmten, z. B. versiegelten Flächen, Abfluss gebildet wird und dieser auch das Gewässer erreicht und somit abflusswirksam wird. Die Gebietsbilanz wird jedoch von Flächen geprägt, auf denen die Zehrung überwiegt, weil auf den grundwassernahen Flächen modellbedingt von einer unbegrenzten Nachlieferung aus dem

Grundwasser ausgegangen wird, d. h. diese Zehrung eventuell auch überschätzt wird (siehe Kapitel 5.2).

Der Grundwasserabfluss wird als innerjähriger Gang bis in den negativen Bereich hinein dargestellt. Alle Werte kleiner Null bedeuten, dass Zehrung stattfindet, d. h. dass mehr Wasser verdunstet als über den Niederschlag zur Verfügung steht. Die Auswertungen für die Gewässerabflüsse wurden an 8 Punkten im Gewässernetz durchgeführt. Um die Unsicherheiten der Projektionsläufe bestmöglich abschätzen zu können, wurden als Auswertungspunkte die 8 Pegel gewählt, die bereits bei der Kalibrierung verwendet wurden (Kapitel 4.2, Tab. 4.2). Da sich mindestens einer dieser Pegel pro Referenzgebiet in der Nähe des Gebietsauslasses befindet, stehen diese Punkte repräsentativ für die Abflussverhältnisse im Modellgebiet und eignen sich daher für die folgende Analyse.

Hinsichtlich der Ermittlung des HQ_{100} wurde dasselbe Verfahren angesetzt wie bei der Parametrisierung (Kapitel 4.2): Die Werte wurden mit der Gemischten Extremwertverteilung (Rossi-Verteilung) unter Verwendung der Maximum-Likelihood-Methode aus Tagesmittelwerten der Langzeitsimulation abgeleitet. Der Empfehlung von DYCK und PESCHKE (1983), eine maximale Extrapolation bis zum 3-fachen der Zeitreihe vorzunehmen, wurde in der folgenden Analyse weitgehend entsprochen, da für das HQ_{100} jeweils 30 Jahre pro Zeithorizont ausgewertet wurden.

Zur Beschreibung der Niedrigwasserverhältnisse und zur Charakterisierung der in diesem Abflussbereich zu erwartenden Änderungen infolge des Klimawandels wurden für die acht Gewässerabschnitte folgende verschiedene niedrigwasserstatistische Kennwerte gemäß den DVWK-Regeln 120 (ATV-DVWK, 1983) und 121 (ATV-DVWK, 1992) ausgewertet:

- NM7Q kleinstes arithmetisches Mittel des Abflusses an 7 aufeinanderfolgenden Tagen
- MaxD Maximale zusammenhängende Unterschreitungsdauer eines Abflusswertes Q_s (Als Schwellenwert Q_s wurde der NMQ des Referenzzeitraums 1971–2000 der jeweiligen Realisierung verwendet)
- 10%-Perzentil der Abflussdauerlinie

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse für jedes Referenzgebiet kurz vorgestellt. Eine Interpretation und ein Vergleich der Gebiete erfolgt dann im Kapitel 4.3.7. Zusätzlich wird dort der Bezug zu den Landschaftsräumen hergestellt und die Klimafolgen für diese vergleichend abgeschätzt.

Anmerkung zu farbigen Tabellenfeldern: Die Entwicklung der gewässerkundlichen Hauptzahlen, der HQ_{100} sowie der Niedrigwasserkennwerte wird in Tabellen dargestellt. Diese sind zur vereinfachten Interpretation so eingefärbt, dass feuchtere Verhältnisse in Grün und trockenere Verhältnisse in Rot dargestellt werden. Die Farbskala verläuft zwischen dem Minimum und Maximum (Rot und Grün), während das 50%-Quantil als Gelbton abgebildet wird. Die Abstufungen bilden die zeitliche Entwicklung für das jeweilige Untersuchungsgebiet in den Zeithorizonten ab.

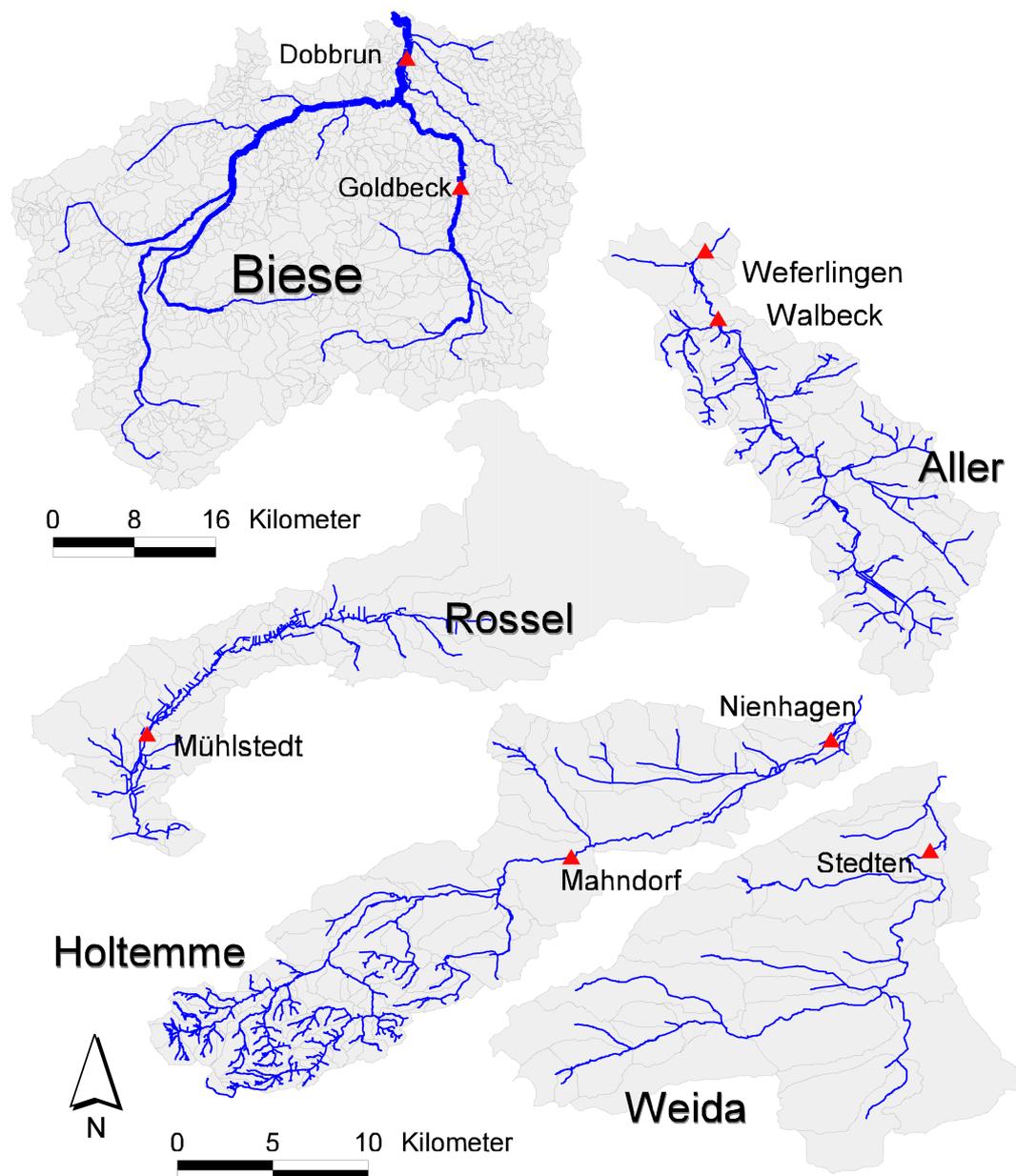


Abbildung 4.21: Übersicht der Auswertungspunkte aller Referenzgebiete (Biese halb so groß wie die anderen Gebiete; Lage der Gebiete zueinander nicht maßstabsgetreu)

4.3.2 Biese (Altmark und Drömling)

Im Einzugsgebiet der Biese wird für den Referenzzeitraum (1971-2000) mit den WETTREG2010-Ergebnissen im Mittel ein Niederschlag von 564 mm berechnet (Tab. 4.3). Die Klimatische Wasserbilanz ist negativ und mit -49 mm/a gering, da die potenzielle Verdunstung den ohnehin gering ausfallenden Niederschlag überwiegt. Der Gesamtabfluss setzt sich zu 89 % aus dem schnellen Direktabfluss zusammen, während der Grundwasserabfluss mit 6 mm/a gering ausfällt. Dies ist auf den hohen Anteil an drainierten Flächen von 56 % zurückzuführen (Tabelle 4.1), so dass der Drainageabfluss einen Anteil von 71 % am Gesamt-

abfluss ausmacht, während es in den anderen Referenzgebieten maximal 14 % sind.

Der Niederschlag reduziert sich mit jeder Zeitperiode um etwa 3% im Vergleich zur vorangegangenen Zeitperiode (Tabelle 4.3). In der fernen Zukunft 2071–2100 ist insgesamt eine Abnahme von 10 % im Vergleich zum Referenzzeitraum zu verzeichnen. Dies sagt jedoch nichts darüber aus, inwiefern eine innerjährliche Verschiebung des Niederschlags auftritt und ob Extreme zunehmen oder nicht.

Während die potenzielle Verdunstung im Verlauf des 21. Jahrhunderts sukzessive zunimmt, wobei der Zuwachs für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 30 % beträgt, ist die Zunahme der mittleren realen Verdunstung für diesen Zeitraum mit 4 % wesentlich geringer.

Die potentielle Verdunstung ist die energetisch mögliche Verdunstung ohne Feuchtelimitierung. Bei trockenen Verhältnissen liegt die potentielle Verdunstung teilweise stark über der realen, weil die Böden nicht gesättigt sind.

Tabelle 4.3: Gegenüberstellung der für die Biese mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden (* Erläuterung zum Eintrag „kein Abfluss“: siehe Kapitel 4.3.1 auf S. 81)

Biese	1971–2000 [mm/a]	2011–2040 [mm/a]	2041–2070 [mm/a]	2071–2100 [mm/a]
Niederschlag	564	549	525	509
Potenzielle Verdunstung	612	651	728	796
Reale Verdunstung	514	519	529	532
Klimatische Wasserbilanz	–49	–103	–203	–287
Grundwasserabfluss	6	kein Abfluss*	kein Abfluss*	kein Abfluss*
Direktabfluss	47	41	30	23
Gesamtabfluss	53	32	kein Abfluss*	kein Abfluss*

Ein Vergleich des innerjährlichen Gangs für die verschiedenen Zeitperioden in Abb. 4.22 zeigt, dass sich zwar am Mittel der realen Verdunstung wenig ändert, jedoch die innerjährliche Verteilung eine Verschiebung von den Sommer- in die Winter- und Frühjahrsmonate anzeigt. So wird im Winter für den Zeitraum 2071–2100 etwa doppelt so viel verdunstet wie im Referenzzeitraum, während von Mitte Mai bis Anfang August eine deutliche Abnahme der realen Verdunstung um bis zu 1 mm/d vorliegt.

Da die Klimatische Wasserbilanz auf der potenziellen Verdunstung beruht, die sich im Mittel stark ändert, ist hier ein ebenso stark ausgeprägtes Änderungssignal erkennbar, wobei die Werte in ferner Zukunft (2071–2100) auf bis zu –287 mm/a abfallen (Tab. 4.3).

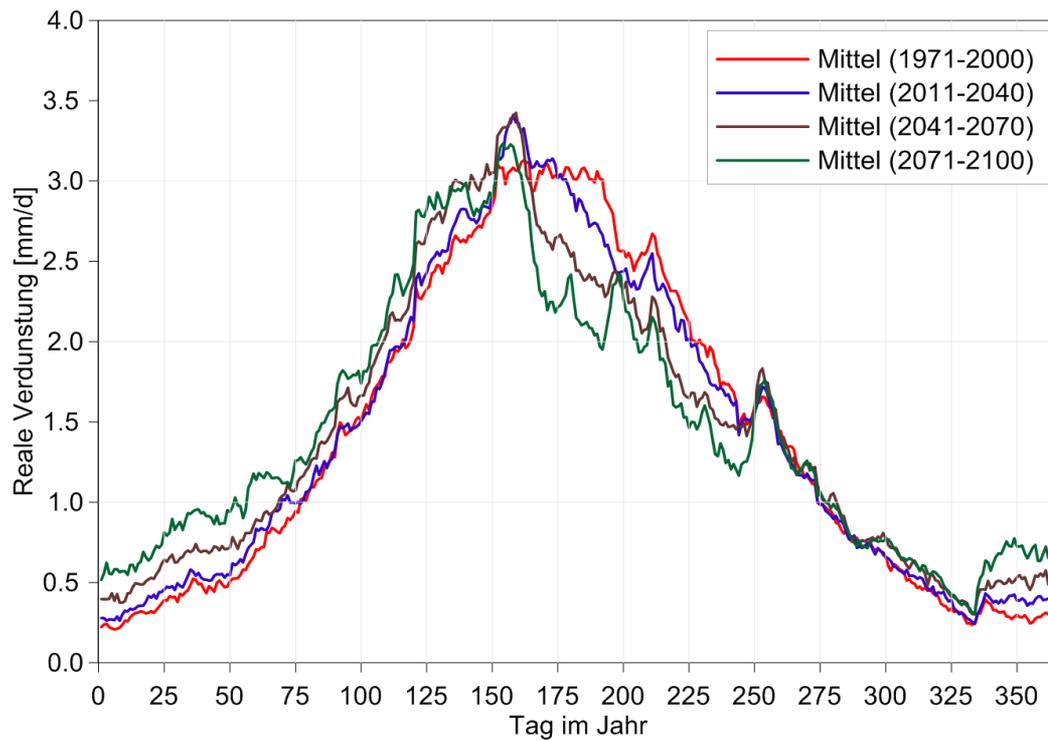


Abbildung 4.22: Innerjährlicher Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Biese (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

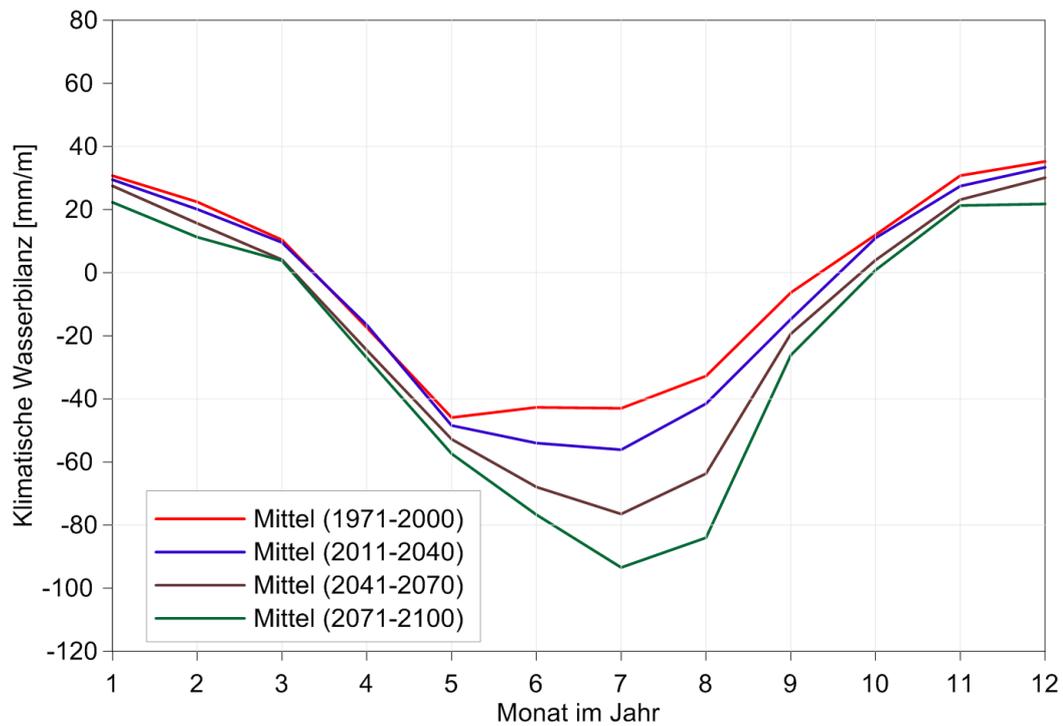


Abbildung 4.23: Innerjährlicher Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Biese (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

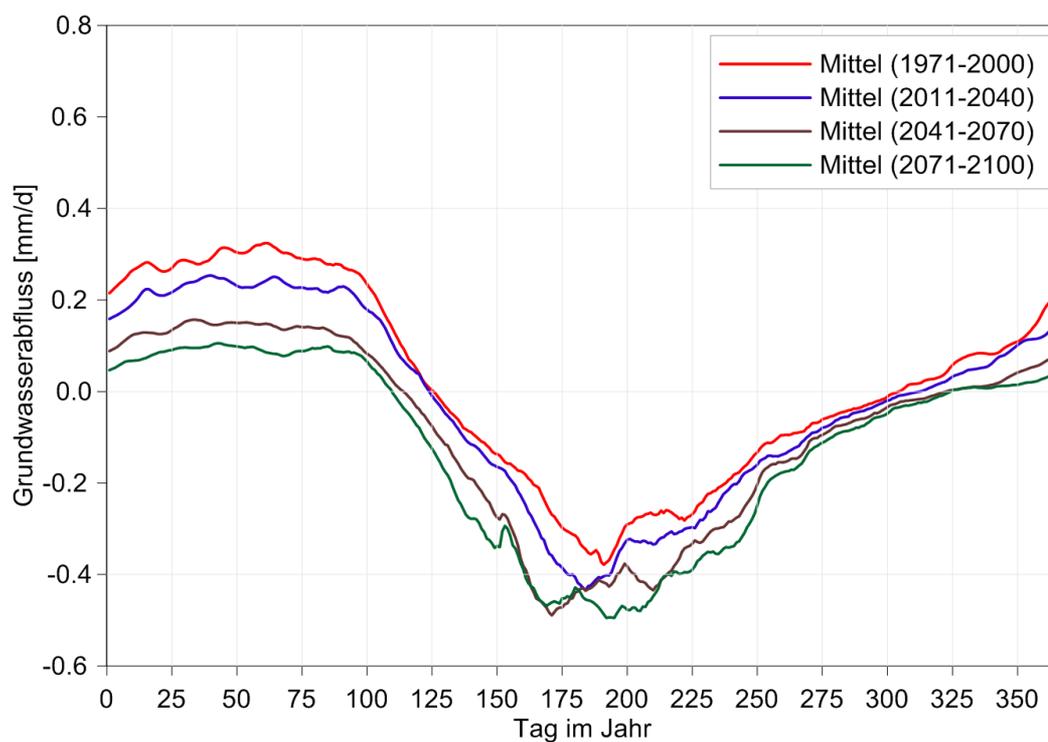


Abbildung 4.24: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Biese (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

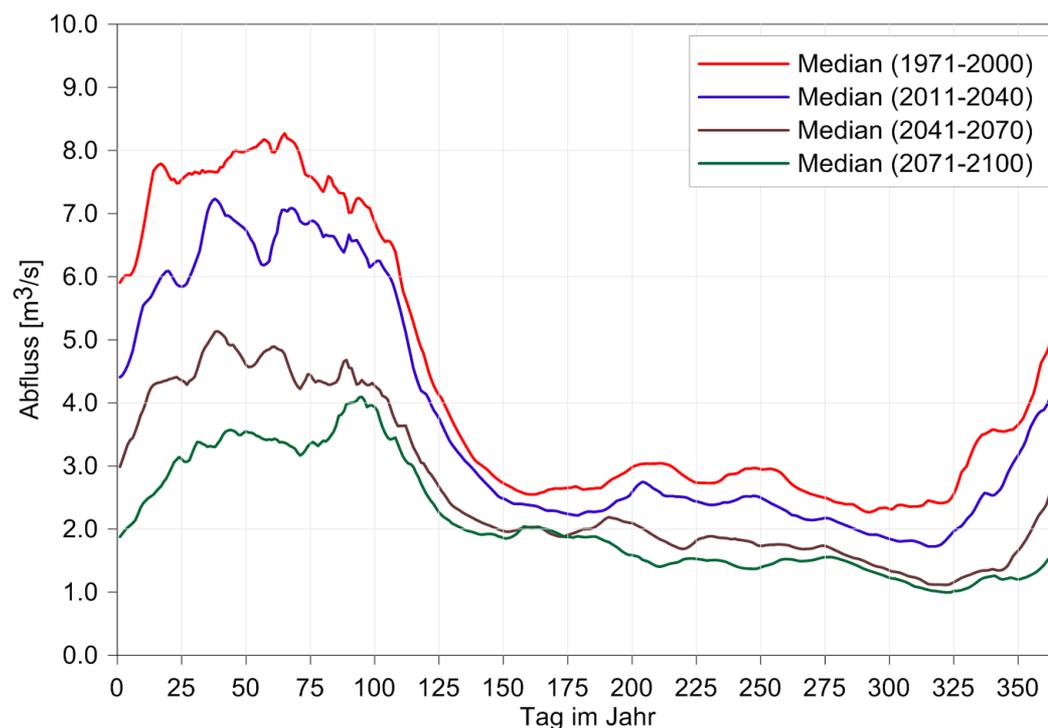


Abbildung 4.25: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Biese am Pegel Dobbrun (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)

Der innerjährliche Verlauf der Klimatischen Wasserbilanz zeigt, dass insbesondere in den Sommermonaten und im Herbst eine Verringerung zu erwarten ist, wobei die stärkste Reduzierung im Juli auftritt (Abb. 4.23). Das ohnehin relativ geringe Niveau des Grundwasserabflusses für den Referenzzeitraum von 6 mm/a wird in den zukünftigen Zeithorizonten weiter reduziert (Tab. 4.3). Dies ist auf die Verringerung der Niederschläge und auf die verstärkte reale Verdunstung zurückzuführen. Im Mittel wird in den Zukunftszeiträumen mehr Wasser verdunstet als versickern kann. Die Zehrung überwiegt die Sickerwasserbildung, weshalb kein Grundwasserabfluss gebildet wird. Insgesamt nimmt die Zehrung im Verlauf weiter zu, so dass für den Zeitraum 2071–2100 ein Defizit von –45 mm/a zu verzeichnen ist. Der innerjährliche Gang in Abb. 4.24 verdeutlicht, dass der Grundwasserabfluss insbesondere von Januar bis August zurückgeht, während in den Monaten September bis November deutlich weniger Änderungen zu erkennen sind. Dies lässt sich auf die Änderung der realen Verdunstung zurückführen, die für diesen Zeitraum ebenfalls geringer ausgeprägt ist als für den Rest des Durchschnittsjahres (Abb. 4.22).

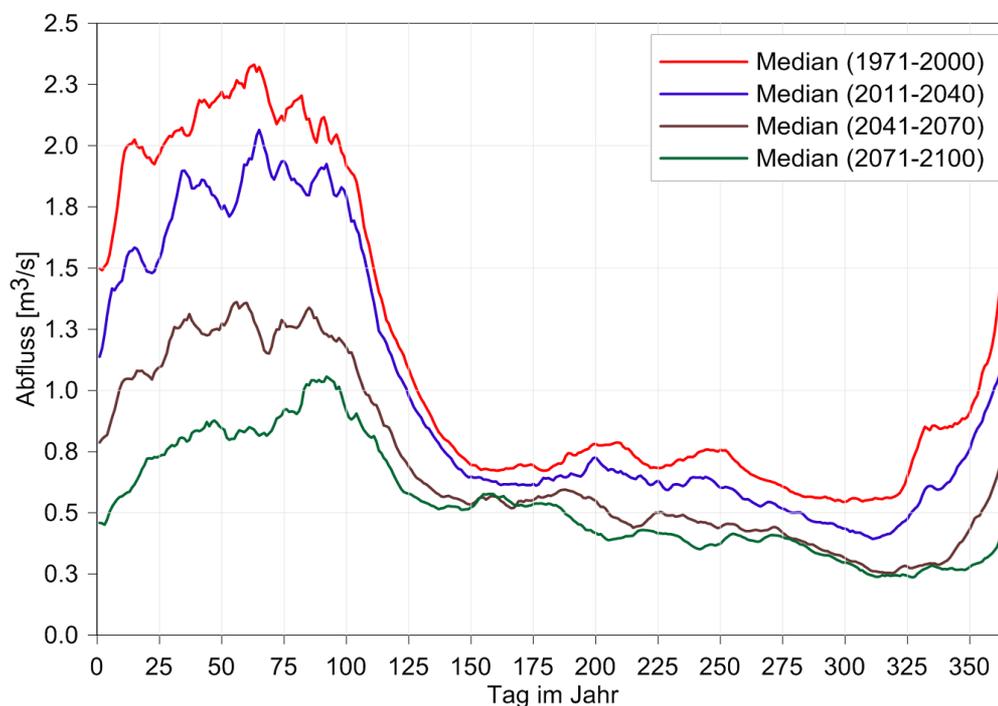


Abbildung 4.26: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Biese am Pegel Goldbeck (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)

Abb. 4.25 und Abb. 4.26 zeigen den innerjährlichen Gang des Abflusses am Pegel Dobbrun und Goldbeck. Hier zeigt sich, dass die Abflüsse in den zukünftigen Zeithorizonten kontinuierlich abnehmen, wobei die größten Änderungssignale in den Monaten Dezember bis Mai auftreten. Eine Interpretation des innerjährlichen Gangs der Abflüsse kann nicht auf der Basis des Grundwasserabflusses erfolgen, da letzterer bereits für den Zeitraum 1971–2000 nur einen Anteil von 11 % am Gesamtabfluss ausmacht.

Tab. 4.4 zeigt die gewässerkundlichen Hauptzahlen sowie die HQ_{100} für den Referenzzeitraum als auch für die drei Zukunftszeiträume. Insgesamt nehmen die gewässerkundlichen Kennwerte um etwa die Hälfte bis zur fernen Zukunft 2071–2100 ab, wobei die Reduzierung der MNQ etwa 10 % mehr ausmacht als für die anderen beiden Größen. Die Farben in Tab. 4.4 zeigen an, dass die Kenngrößen sich in der Zukunft kontinuierlich reduzieren. Dies trifft jedoch nicht auf die HQ_{100} zu. Im Mittel ergibt sich am Pegel Dobbrun für die beiden fernen Zukunftszeiträume 2041–2070 und 2071–2100 dieselbe Größenordnung. Dasselbe gilt für die Zeiträume 1971–2000 und 2011–2040. Ein deutlicher Rückgang ist lediglich zwischen den Zeiträumen 2011–2040 und 2041–2070 zu erkennen. Dies zeigt sich ebenso am Pegel Goldbeck.

Tabelle 4.4: Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässerkundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ_{100} (Median aller 10 Realisierungen) für die Pegel Dobbrun und Goldbeck [Einheit: m^3/s]

Pegel		1971–2000	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Dobbrun	MNQ	1,6	1,3	0,77	0,62
	MQ	4,4	3,8	2,6	2,1
	MHQ	17,6	15,3	11,1	9,2
	HQ_{100}	40,0	37,6	29,3	30,0
Goldbeck	MNQ	0,37	0,29	0,17	0,14
	MQ	1,2	1,0	0,69	0,54
	MHQ	5,4	4,7	3,3	2,5
	HQ_{100}	12,7	12,6	9,7	9,0

Der Rückgang des mittleren Niedrigabflusses spiegelt sich ebenso in der Änderung der Niedrigwasserstatistik wider. So nehmen die Unterschreitungsdauern des NMQ (1971–2000) um etwa 80 Tage für den fernen Zeitraum 2071–2100 zu, während das NM7Q sowie das 10%-Perzentil der Abflussdauerlinie auf etwa 40% des Ausgangswertes reduziert wird.

Tabelle 4.5: Gegenüberstellung der für die Biese mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden

Pegel	Zeitraum	10%-Perzentil der Abflussdauerlinie [m^3/s]	NM7Q [m^3/s]	maxD [Tage]
Dobbrun	1971–2000	1,84	2,83	14
	2011–2040	1,49	2,28	34
	2041–2070	1,00	1,51	76
	2071–2100	0,81	1,18	109
Goldbeck	1971–2000	0,44	0,71	13
	2011–2040	0,35	0,59	31
	2041–2070	0,23	0,35	67
	2071–2100	0,19	0,29	82

4.3.3 Rossel (Elbetal und glazialer Osten)

Im Einzugsgebiet der Rossel wird mit den WETTREG2010-Ergebnissen für den Referenzzeitraum (1971–2000) ein mittlerer Niederschlag von 640 mm berechnet (Tab. 4.6). Die Klimatische Wasserbilanz ist wie in der Biese negativ, liegt jedoch mit –19 mm/a höher. Der Gesamtabfluss setzt sich zu 80 % aus dem Grundwasserabfluss und zu 20 % aus dem Direktabfluss zusammen.

Der Niederschlag reduziert sich mit jeder Zeitperiode kontinuierlich. In der fernen Zukunft 2071–2100 ist insgesamt eine Abnahme von 10 % im Vergleich zum Referenzzeitraum zu verzeichnen.

Die potenzielle Verdunstung steigt im Verlauf des 21. Jahrhunderts sukzessive an, wobei der Zuwachs für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 28 % beträgt, während bei der mittleren realen Verdunstung für diesen Zeitraum ein leichter Rückgang von 3 % zu verzeichnen ist.

Tabelle 4.6: Gegenüberstellung der für die Rossel mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden

Rossel	1971–2000 [mm/a]	2011–2040 [mm/a]	2041–2070 [mm/a]	2071–2100 [mm/a]
Niederschlag	640	639	600	576
Potenzielle Verdunstung	659	699	780	845
Reale Verdunstung	556	561	550	540
Klimatische Wasserbilanz	–19	–60	–180	–270
Grundwasserabfluss	70	64	39	26
Direktabfluss	17	16	12	10
Gesamtabfluss	87	79	51	36

Ein Vergleich des innerjährlichen Gangs für die verschiedenen Zeitperioden in Abb. 4.27 zeigt, dass sich am Mittel der realen Verdunstung wenig verändert, jedoch die innerjährliche Verteilung für die Monate Mai bis Juli eine starke Reduzierung (für den Zeitraum 2071–2100 um etwa ein Drittel) anzeigt. Für den Zeitraum 2011–2040 ist ein geringfügiger Zuwachs erkennbar, der sich insbesondere auf die Wintermonate konzentriert.

Da die Klimatische Wasserbilanz auf der potenziellen Verdunstung beruht, die sich im Mittel stark ändert, ist hier ein ebenso stark ausgeprägtes Änderungssignal erkennbar, wobei die Werte in ferner Zukunft (2071–2100) auf bis zu –270 mm/a abfallen (Tab. 4.6). Der innerjährliche Verlauf zeigt, dass insbesondere in den Sommermonaten und im Herbst eine Verringerung der Klimatischen Wasserbilanz zu verzeichnen ist, wobei die stärkste Reduzierung im Juli auftritt (Abb. 4.28).

Das Niveau des Grundwasserabflusses wird von 70 mm/a für den Referenzzeitraum in der Zukunft um bis zu 44 mm/a verringern (Tab. 4.6). Dies ist insbesondere auf die Abnahme der Niederschläge zurückzuführen. In den Monaten Mai bis August wird im Mittel mehr Wasser verdunstet als versickern kann. Daher ist der Grundwasserabfluss in diesen Monaten negativ, d. h. die Zehrung überwiegt die Sickerwasserbildung (Abbildung 4.29).

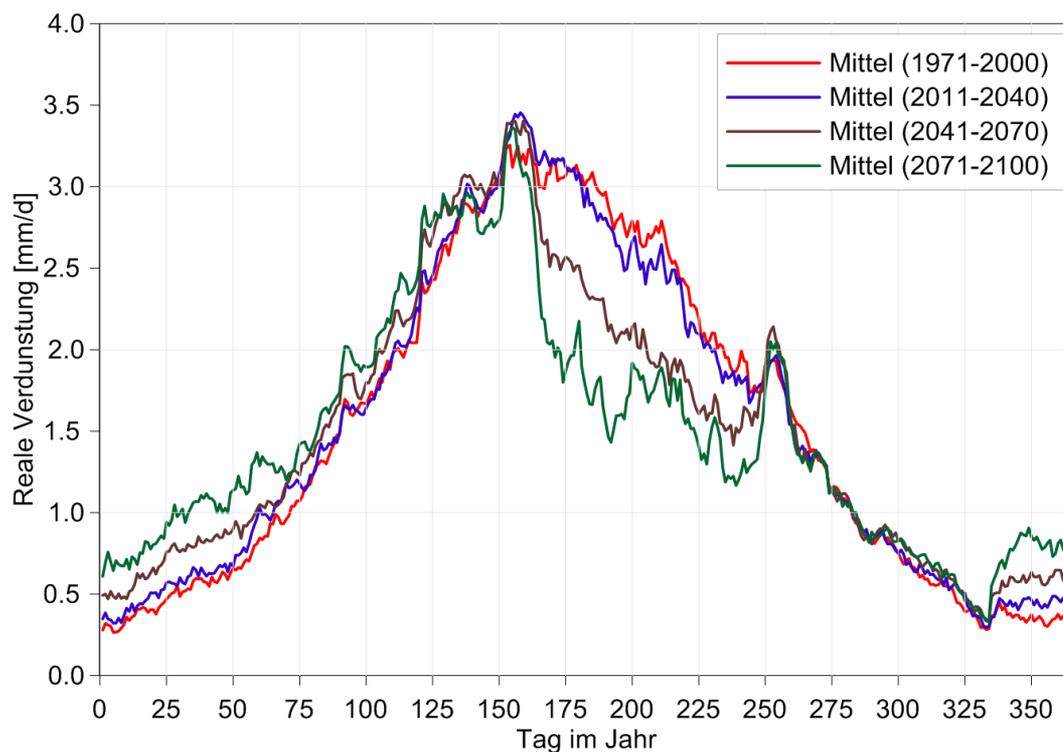


Abbildung 4.27: Innerjährlicher Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Rossel (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

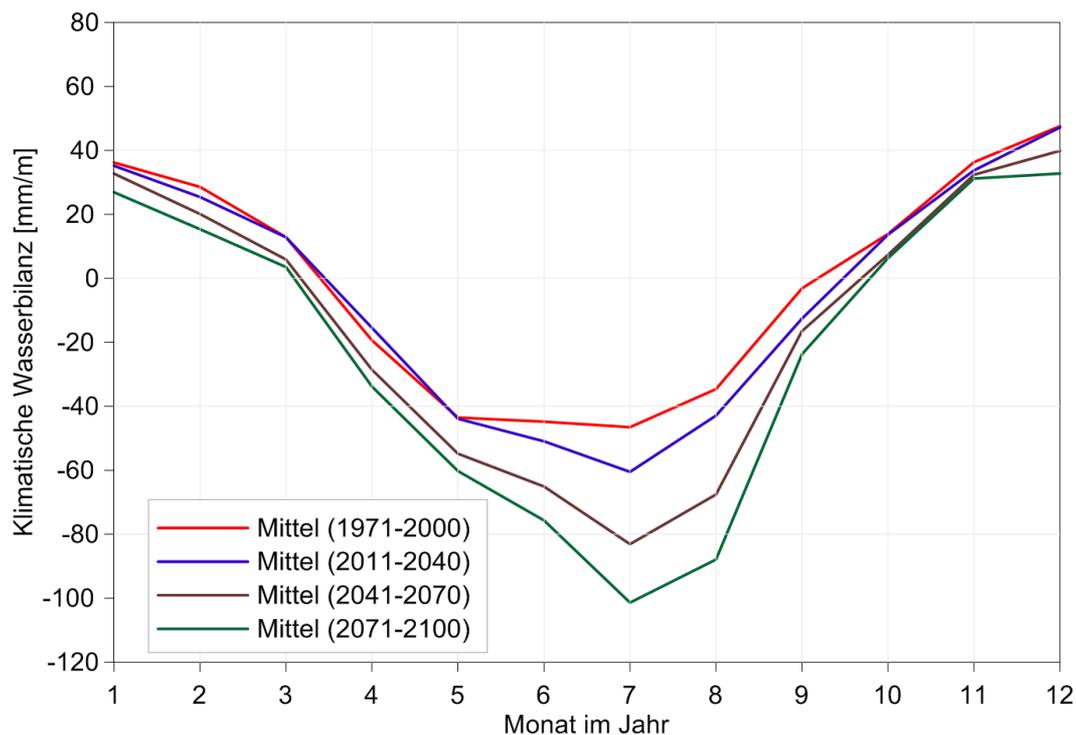


Abbildung 4.28: Innerjährlicher Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Rossel (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

Insgesamt verlängert sich die Phase der Zehrung im weiteren Verlauf, so dass für den Zeitraum 2071–2100 zusätzlich für die Monate April und September ein Defizit zu erkennen ist. Der innerjährliche Gang in Abb. 4.29 verdeutlicht, dass der Grundwasserabfluss insbesondere von Dezember bis Mai zurückgeht, während in den Monaten Juni bis November weniger Rückgang erkennbar ist.

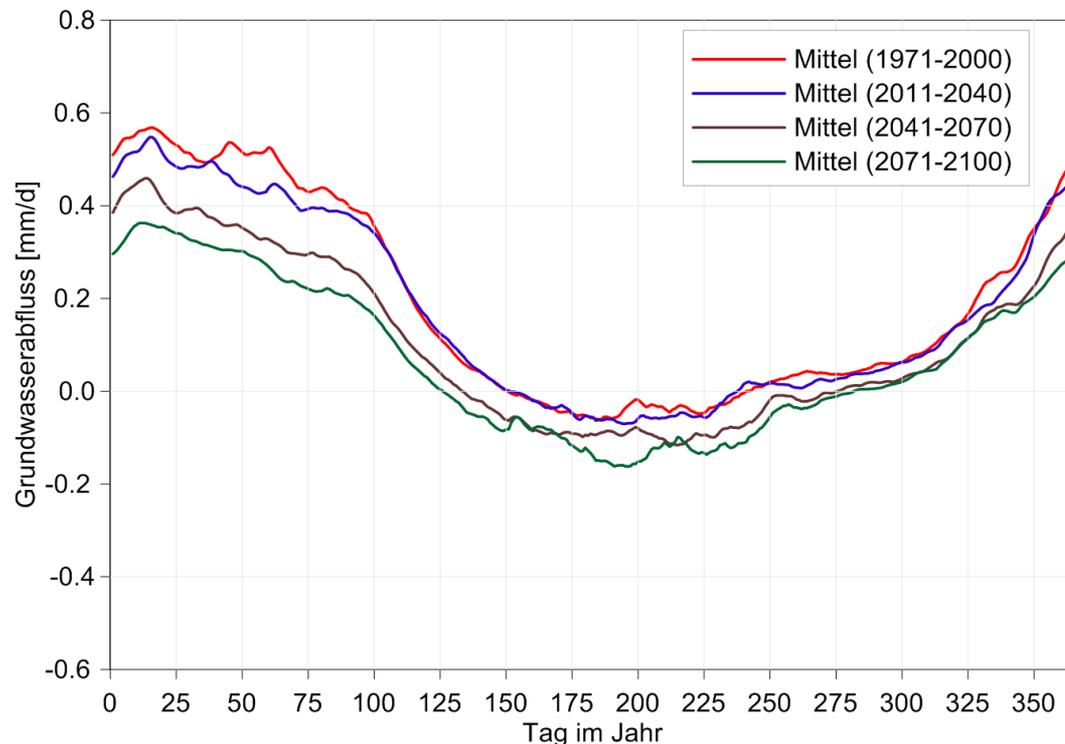


Abbildung 4.29: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Rossel (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

Abb. 4.30 zeigt den innerjährlichen Gang des Abflusses am Pegel Mühlstedt. Zu erkennen ist, dass die Abflüsse in den zukünftigen Zeithorizonten kontinuierlich abnehmen, wobei die größten Änderungssignale in den entfernten Zukunftszeiträumen auftreten. Die Jahrgänge wirken insgesamt parallel nach unten verschoben, lediglich für die Wintermonate ist der Rückgang etwas stärker ausgeprägt als im Sommer.

Tab. 4.7 zeigt die gewässerkundlichen Hauptzahlen sowie die HQ_{100} für den Referenzzeitraum als auch für die drei Zukunftszeiträume. Insgesamt nehmen die gewässerkundlichen Kennwerte um etwa 40 % bis zur fernen Zukunft 2071–2100 ab, wobei die Reduzierung der MNQ etwas mehr ausmacht als für die anderen beiden Größen. Die Farben in Tab. 4.7 zeigen an, dass die Kenngrößen sich in der Zukunft reduzieren, wobei zwischen Referenzzeitraum und dem ersten Zukunftszeitraum 2011–2040 kaum eine Änderung vorliegt. Dies gilt ebenso für den Vergleich der zwei späten Zukunftszeiträume. Ein deutlicherer Sprung ist jedoch zwischen den Zeitperioden 2011–2040 und 2041–2070 zu verzeichnen. Dies trifft auch auf die HQ_{100} zu. Hier ergibt sich im Mittel für die ersten beiden Zeiträume dieselbe Größenordnung. Dasselbe gilt für die beiden fernen

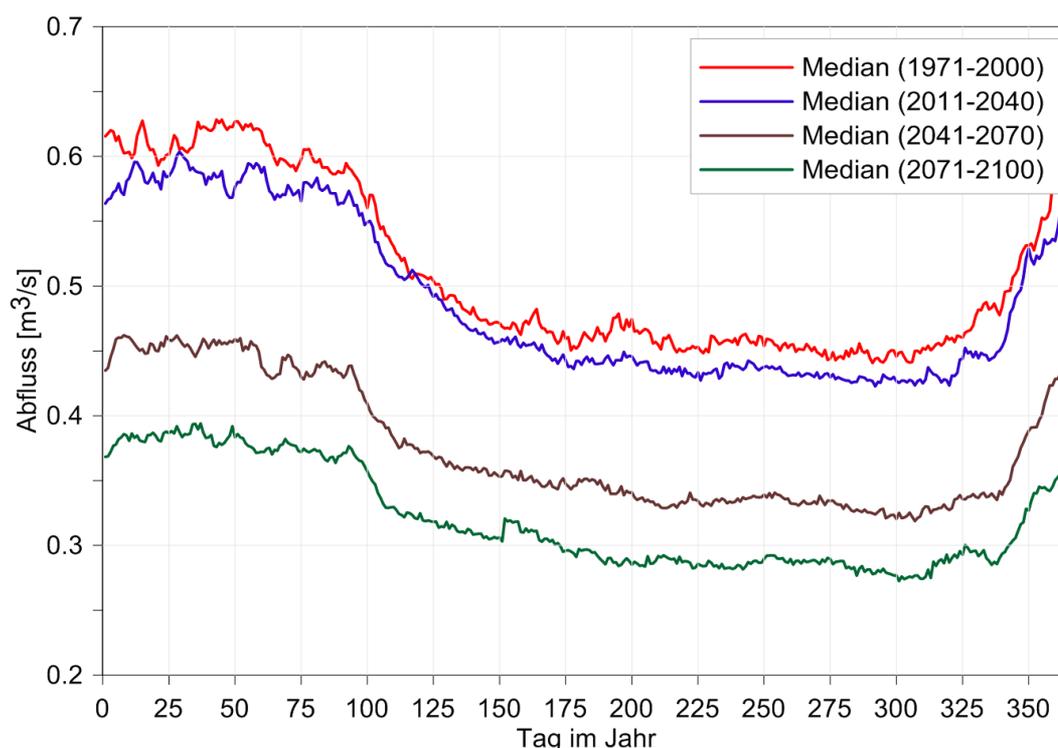


Abbildung 4.30: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Rossel am Pegel Mühlstedt (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)

Zukunftszeiträume 2041–2070 und 2071–2100 (Tab. 4.7). Eine deutliche Abnahme ist lediglich zwischen den Zeitperioden 2011–2040 und 2041–2070 zu erkennen.

Tabelle 4.7: Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässerkundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ_{100} (Median aller 10 Realisierungen) für den Pegel Mühlstedt [Einheit: m^3/s]

Pegel		1971–2000	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Mühlstedt	MNQ	0,39	0,37	0,26	0,22
	MQ	0,51	0,49	0,37	0,32
	MHQ	1,1	1,0	0,77	0,68
	HQ_{100}	2,1	2,0	1,4	1,3

Der Rückgang des mittleren Niedrigabflusses spiegelt sich in der Änderung der Niedrigwasserstatistik wider. So nehmen die Unterschreitungsauern des MNQ (1971–2000) um 176 Tage für den fernen Zeitraum 2071–2100 zu (Tab. 4.8). Für den Zeitraum 2011–2040 ergeben sich im Vergleich zum Referenzzeitraum bei den anderen Kennwerten nur unwesentliche Änderungen, während ab 2041–2070 eine deutlichere Verringerung erkennbar wird.

Table 4.8: Gegenüberstellung der für die Rossel mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden

Pegel	Zeitraum	10%-Perzentil der Abflussdauerlinie [m ³ /s]	NM7Q [m ³ /s]	maxD [Tage]
Mühlstedt	1971–2000	0,39	0,54	13
	2011–2040	0,37	0,52	28
	2041–2070	0,28	0,41	121
	2071–2100	0,24	0,33	189

4.3.4 Holtemme (Harz)

Im Einzugsgebiet der Holtemme wird mit den WETTREG2010-Ergebnissen für den Referenzzeitraum (1971–2000) ein mittlerer Niederschlag von 699 mm berechnet (Tab. 4.9). Als einziges Referenzgebiet ist die Klimatische Wasserbilanz mit 50 mm/a deutlich im positiven Bereich. Der Gesamtabfluss setzt sich zu 70 % aus dem Grundwasserabfluss und zu 30 % aus dem Direktabfluss zusammen.

Der Niederschlag nimmt mit jeder Zeitperiode kontinuierlich ab. In der fernen Zukunft 2071–2100 ist insgesamt eine Abnahme von 11 % im Vergleich zum Referenzzeitraum zu verzeichnen.

Die potenzielle Verdunstung steigt im Verlauf des 21. Jahrhunderts, wobei der Zuwachs für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 37 % beträgt, während bei der mittleren realen Verdunstung für diesen Zeitraum kaum eine Änderung zu verzeichnen ist.

Table 4.9: Gegenüberstellung der für die Holtemme mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden

Holtemme	1971–2000 [mm/a]	2011–2040 [mm/a]	2041–2070 [mm/a]	2071–2100 [mm/a]
Niederschlag	699	683	649	624
Potenzielle Verdunstung	649	706	798	886
Reale Verdunstung	545	550	549	544
Klimatische Wasserbilanz	50	–24	–149	–262
Grundwasserabfluss	109	92	65	49
Direktabfluss	46	43	36	31
Gesamtabfluss	156	135	101	80

Ein Vergleich des innerjährlichen Gangs für die verschiedenen Zeitperioden in Abb. 4.31 zeigt, dass sich am Mittel der realen Verdunstung kaum etwas verändert, jedoch die innerjährliche Verteilung für die Monate Mai bis Juli eine starke Reduzierung (für den Zeitraum 2071–2100 um etwa ein Drittel) anzeigt. Für die Wintermonate ist eine Erhöhung der Verdunstung erkennbar. Für die Monate August bis November sind hingegen nur wenige Änderungen zu erkennen.

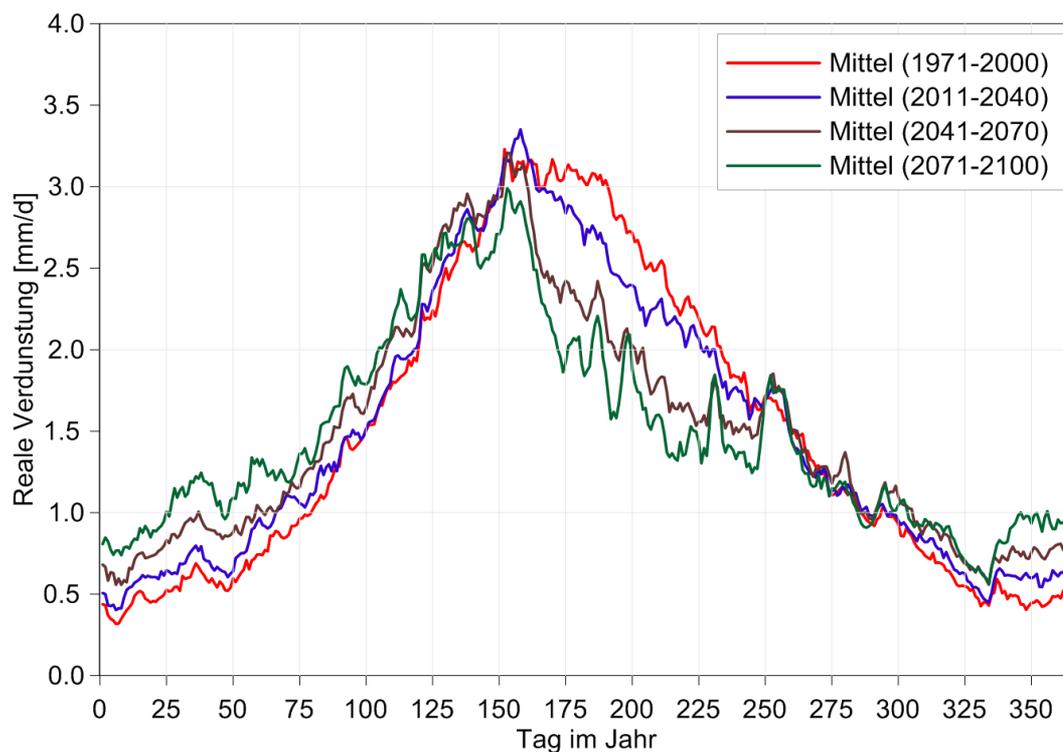


Abbildung 4.31: Innerjährlicher Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Holtemme (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

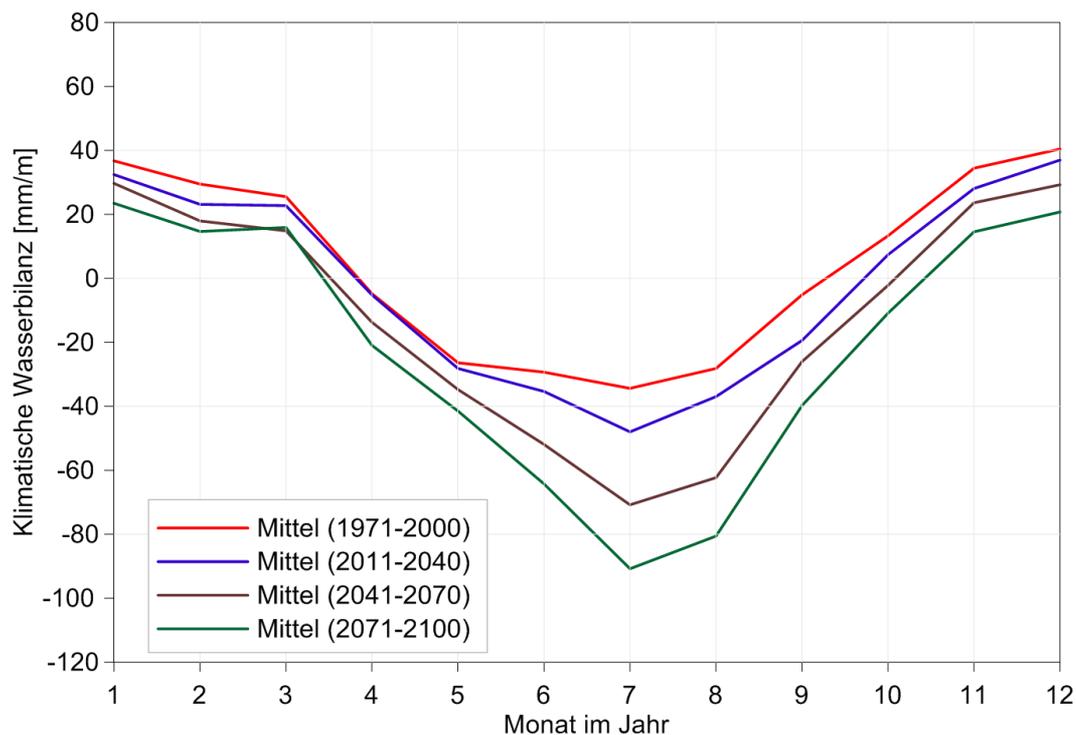


Abbildung 4.32: Innerjährlicher Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Holtemme (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

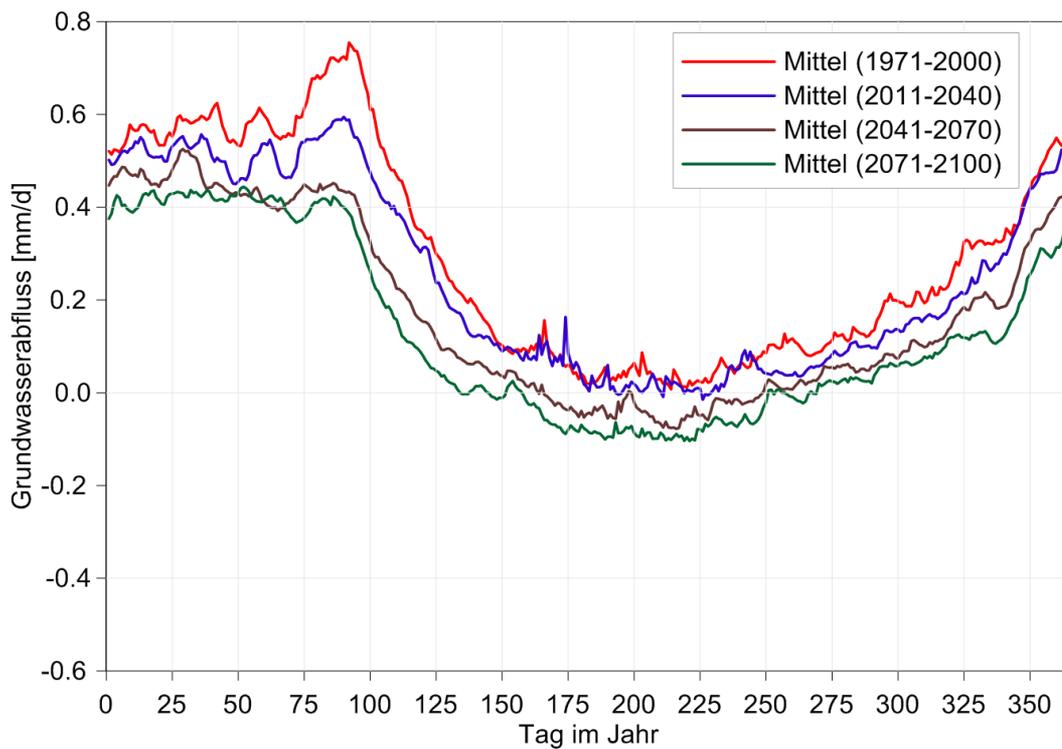


Abbildung 4.33: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Holtemme (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

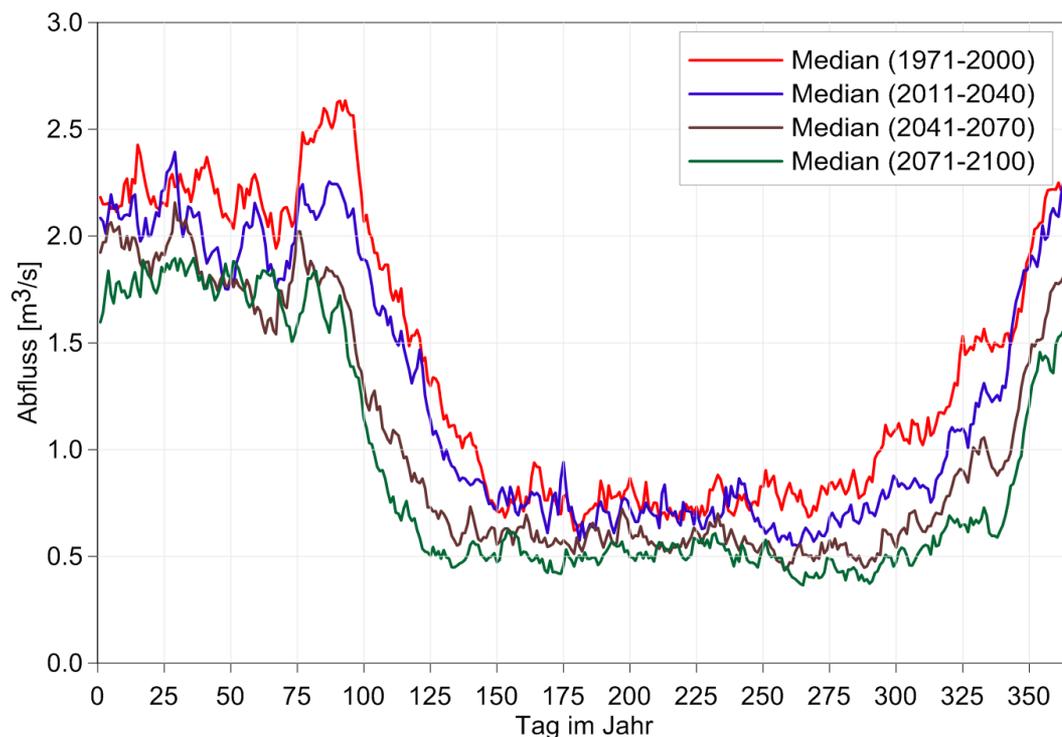


Abbildung 4.34: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Holtemme am Pegel Nienhagen (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)

Da die Klimatische Wasserbilanz auf der potenziellen Verdunstung beruht, die sich im Mittel stark ändert, ist hier ein ebenso stark ausgeprägtes Änderungssignal sichtbar, wobei die Werte in ferner Zukunft (2071-2100) auf bis zu -262 mm/a abfallen (Tab. 4.9). Der innerjährliche Verlauf zeigt, dass insbesondere in den Sommermonaten und im Herbst eine Verringerung der Klimatischen Wasserbilanz zu verzeichnen ist, wobei die stärkste Reduzierung im Juli auftritt (Abb. 4.32).

Das Niveau des Grundwasserabflusses wird von 109 mm/a für den Referenzzeitraum in der Zukunft um bis zu 61 mm verringert (Tab. 4.6). Dies ist auf die Verringerung des Niederschlags zurückzuführen.

Der innerjährliche Gang in Abb. 4.33 verdeutlicht, dass der Grundwasserabfluss über das gesamte Jahr reduziert wird, wobei die Reduktion im März am deutlichsten ausfällt. Für den Zeitraum 2071–2100 verdunstet in den Monaten Mai bis August im Mittel mehr Wasser als versickern kann, weshalb sich hier negative Werte ergeben, d. h. die Zehrung überwiegt die Sickerwasserbildung.

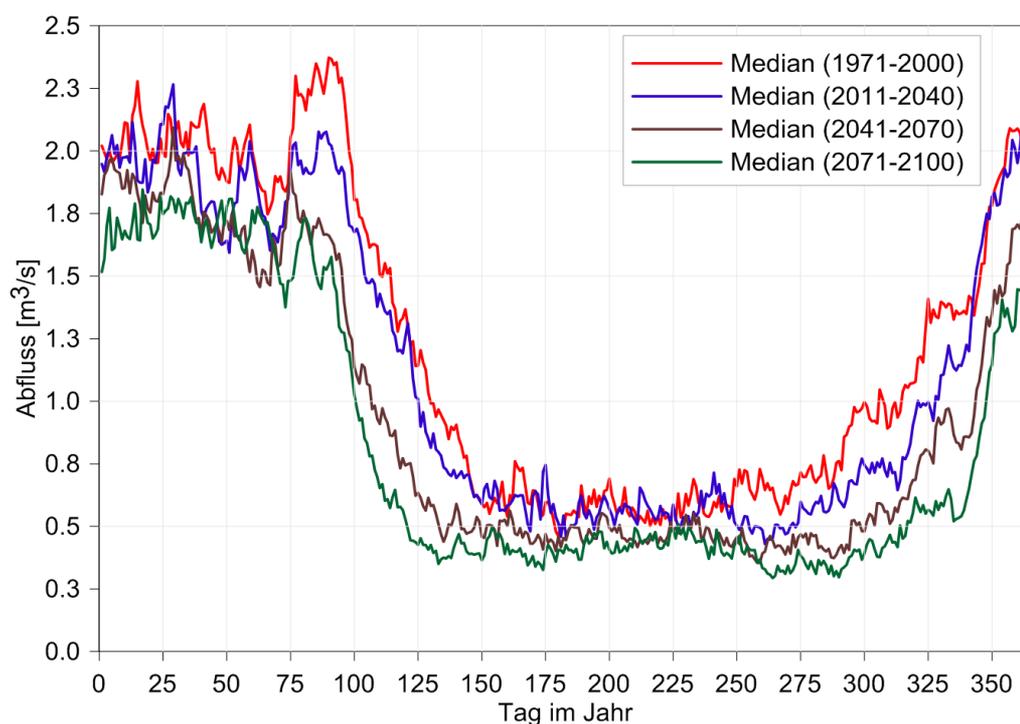


Abbildung 4.35: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Holtemme am Pegel Mahndorf (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)

Abb. 4.34 und Abb. 4.35 stellen den innerjährlichen Gang des Abflusses an den Pegeln Nienhagen und Mahndorf dar. Hier zeigt sich, dass sich die Abflüsse in den zukünftigen Zeithorizonten verringern. Insgesamt verlängert sich die Trockenperiode im Frühjahr und Sommer für die Zukunftszeiträume, die für den Referenzzeitraum noch auf die Monate Mai bis August beschränkt war. Für die entfernte Zukunft 2071–2100 zählen die Monate April und September zusätzlich zu den Trockenmonaten.

Tab. 4.1 zeigt die gewässerkundlichen Hauptzahlen sowie die HQ_{100} für den Referenzzeitraum und für die drei Zukunftszeiträume. Insgesamt nehmen die gewässerkundlichen Kennwerte um etwa 40 % bis zur fernen Zukunft 2071–2100 ab, wobei die Reduzierung der MNQ etwa 15 % mehr ausmacht als für die anderen beiden Größen.

Tabelle 4.10: Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässerkundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ_{100} (Median aller 10 Realisierungen) für die Pegel Nienhagen und Mahndorf [Einheit: m^3/s]

Pegel		1971–2000	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Nienhagen	MNQ	0,23	0,19	0,14	0,12
	MQ	1,4	1,3	1,1	0,93
	MHQ	9,8	10,0	7,6	6,5
	HQ_{100}	25,6	32,7	22,2	15,3
Mahndorf	MNQ	0,16	0,14	0,10	0,08
	MQ	1,3	1,2	0,95	0,83
	MHQ	10,1	10,2	7,7	6,7
	HQ_{100}	25,4	32,2	21,3	14,2

Die Farben in Tab. 4.10 zeigen an, dass die Kenngrößen in der fernen Zukunft ab dem Zeitraum 2041–2070 abnehmen, jedoch zwischen Referenzzeitraum und dem ersten Zukunftszeitraum 2011–2040 kaum eine Änderung vorliegt. Ein deutlicherer Sprung zeigt sich erst zwischen den Zeitperioden 2011–2040 und 2041–2070, wo die Werte dann deutlich zurückgehen.

Bei den HQ_{100} ergibt sich im Mittel für den Zeitraum 2011–2040 ein Anstieg von knapp 30 % gegenüber dem Referenzzeitraum. Erst ab 2041–2070 verringern sich die Werte im Vergleich zum Referenzzeitraum um etwa 15 % und für 2071–2100 um 40 % (Nienhagen) bzw. 44 % (Mahndorf).

Tabelle 4.11: Gegenüberstellung der für die Holtemme mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden

Pegel	Zeitraum	10%-Perzentil der Abflussdauerlinie [m^3/s]	NM7Q [m^3/s]	maxD [Tage]
Nienhagen	1971–2000	0,31	0,41	4
	2011–2040	0,26	0,36	8
	2041–2070	0,21	0,25	13
	2071–2100	0,19	0,20	17
Mahndorf	1971–2000	0,23	0,30	3
	2011–2040	0,20	0,27	6
	2041–2070	0,16	0,20	11
	2071–2100	0,14	0,16	15

Die Änderung des mittleren Niedrigabflusses spiegelt sich in der Abweichung der 10 %-Perzentile der Abflussdauerlinie und von maxD wider. Lediglich das

NM7Q weist im Gegensatz zum NMQ für den Zeitraum 2011–2040 einen stärkeren Rückgang von bis zu 30 % auf (Tab. 4.11). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Anzahl der aufeinanderfolgenden Trockentage zunimmt, während das Mittel über die jährlichen NQ nur geringfügig vom Referenzzeitraum abweicht. Dies wäre der Fall, wenn die Niederschläge seltener aber dafür etwas intensiver werden.

Die Unterschreitungsdauern des NMQ (1971–2000) steigen um etwa 13 Tage für den fernen Zeitraum 2071–2100 an. Für den Zeitraum 2011–2040 ergeben sich im Vergleich zum Referenzzeitraum bei den anderen Kennwerten relativ kleine Rückgänge, während ab 2041–2070 eine deutlichere Verringerung erkennbar wird.

4.3.5 Aller (Schwarzerderegion)

Im Einzugsgebiet der Aller wird mit den WETTREG2010-Ergebnissen für den Referenzzeitraum (1971–2000) ein mittlerer Niederschlag von 614 mm berechnet (Tab. 4.12). Die Klimatische Wasserbilanz liegt mit 4 mm/a knapp im positiven Bereich. Der Gesamtabfluss setzt sich zu 61 % aus dem Grundwasserabfluss und zu 39 % aus dem Direktabfluss zusammen.

Der Niederschlag geht mit jeder Zeitperiode kontinuierlich zurück. In der fernen Zukunft 2071–2100 ist insgesamt eine Abnahme von 12 % im Vergleich zum Referenzzeitraum zu verzeichnen.

Die potenzielle Verdunstung steigt im Verlauf des 21. Jahrhunderts an, wobei der Zuwachs für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 28 % beträgt, während bei der mittleren realen Verdunstung für diesen Zeitraum kaum eine Änderung zu verzeichnen ist.

Tabelle 4.12: Gegenüberstellung der für die Aller mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden (* Erläuterung zum Eintrag „kein Abfluss“: siehe Kapitel 4.3.1 auf S. 81)

Aller	1971–2000	2011–2040	2041–2070	2071–2100
	[mm/a]	[mm/a]	[mm/a]	[mm/a]
Niederschlag	614	598	570	541
Potenzielle Verdunstung	610	649	716	779
Reale Verdunstung	525	528	530	525
Klimatische Wasserbilanz	4	–50	–146	–238
Grundwasserabfluss	58	42	16	kein Abfluss*
Direktabfluss	37	34	27	21
Gesamtabfluss	95	76	44	19

Der Vergleich des innerjährlichen Gangs für die verschiedenen Zeitperioden in Abb. 4.36 zeigt, dass sich wie in den anderen Gebieten am Mittel der realen Verdunstung kaum etwas verändert, jedoch die innerjährliche Verteilung für die Monate Mai bis Juli eine starke Reduzierung (für den Zeitraum 2071–2100 um etwa ein Drittel) aufzeigt.

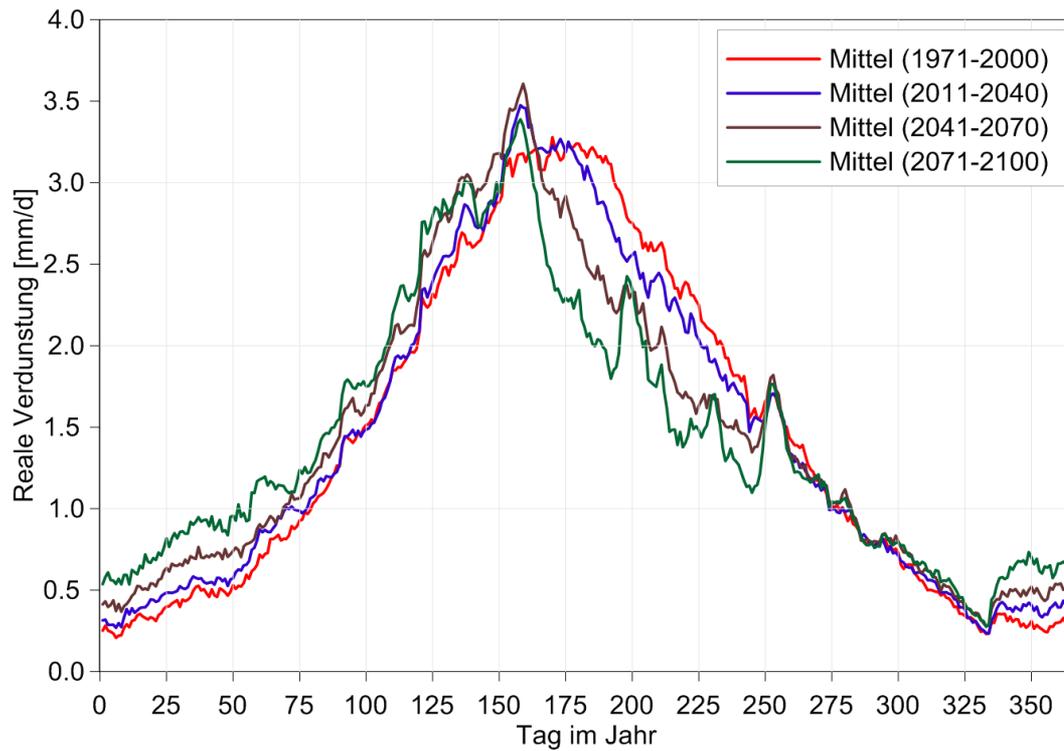


Abbildung 4.36: Innerjährlicher Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Aller (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

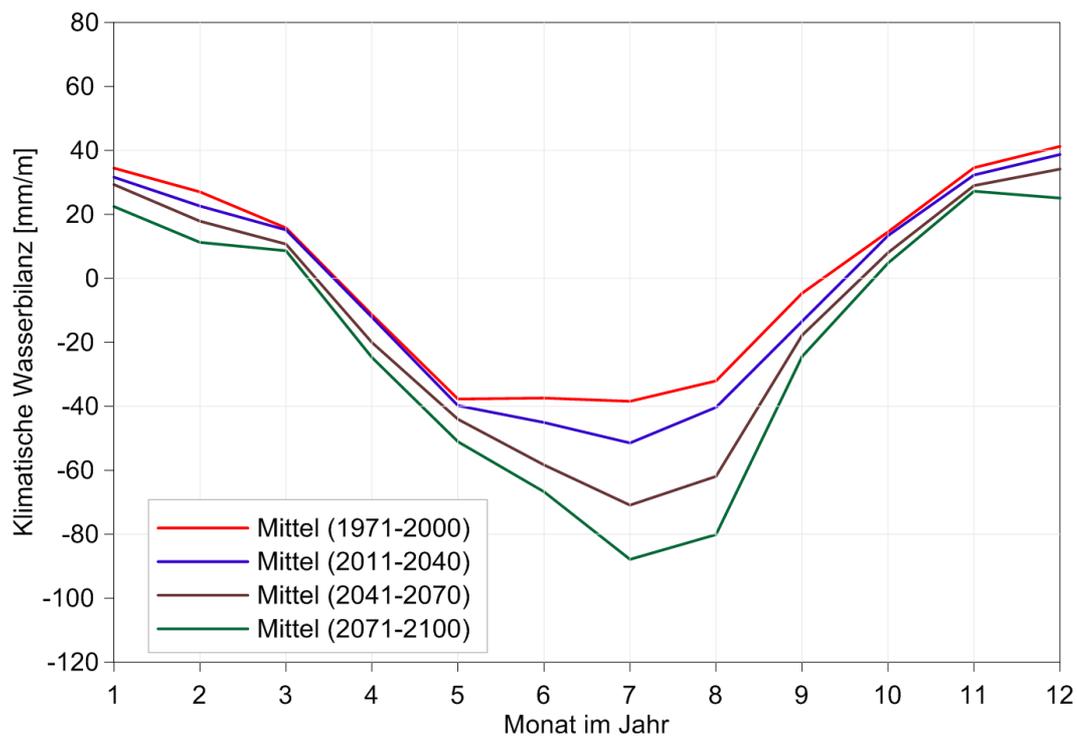


Abbildung 4.37: Innerjährlicher Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Aller (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

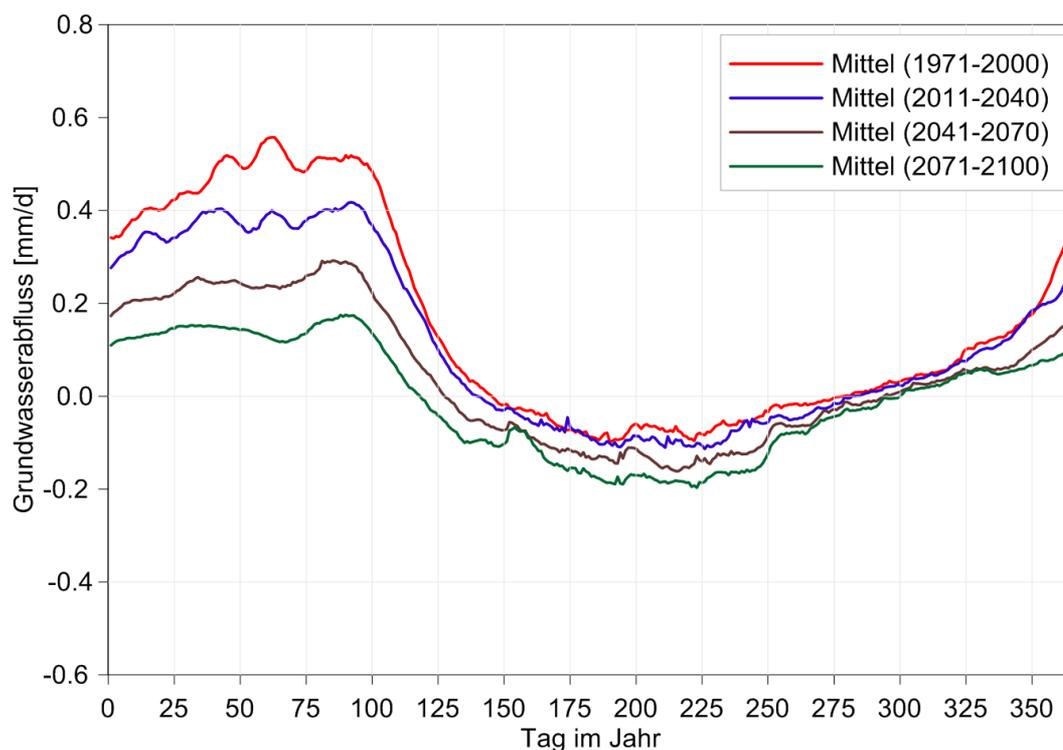


Abbildung 4.38: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Aller (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

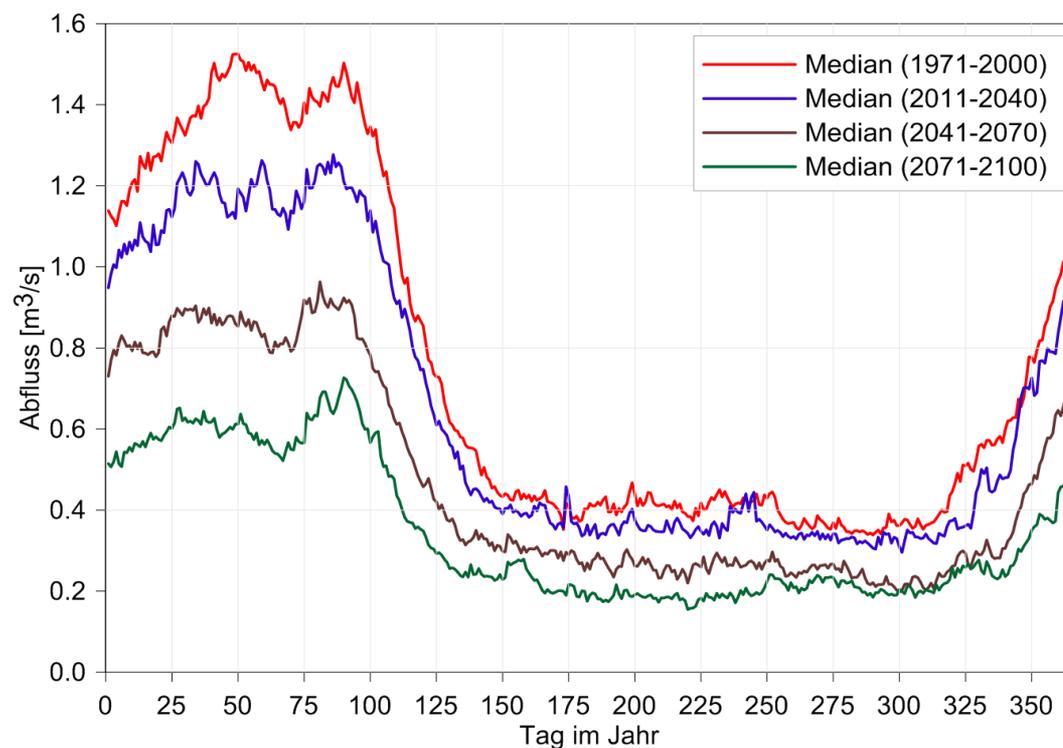


Abbildung 4.39: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Aller am Pegel Weferlingen (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)

Für die Winter- und Frühjahrsmonate ist eine Erhöhung der Verdunstung erkennbar. Für die Monate August bis November zeigen sich hingegen kaum Änderungen.

Da die Klimatische Wasserbilanz auf der potenziellen Verdunstung beruht, die sich im Mittel stark erhöht, ist hier ein ebenso stark ausgeprägtes Änderungssignal erkennbar, wobei die Werte in ferner Zukunft (2071–2100) auf bis zu -238 mm/a abfallen (Abb. 4.37). Anhand des innerjährlichen Verlaufs lässt sich ableiten, dass insbesondere in den Sommermonaten und im Herbst ein Rückgang der Klimatischen Wasserbilanz zu verzeichnen ist, wobei die stärkste Reduzierung im Juli auftritt.

Das Niveau des Grundwasserabflusses wird von 58 mm/a für den Referenzzeitraum in der Zukunft um bis zu 60 mm verringern (Tab. 4.12). Dies ist auf die Verringerung des Niederschlags zurückzuführen.

Der innerjährliche Gang in Abb. 4.38 zeigt, dass der Grundwasserabfluss über das gesamte Jahr reduziert wird, wobei die Reduktion in den Wintermonaten am deutlichsten ausfällt und für den Zeitraum 2071–2100 eine Halbierung des Referenzzeitraums ausmacht.

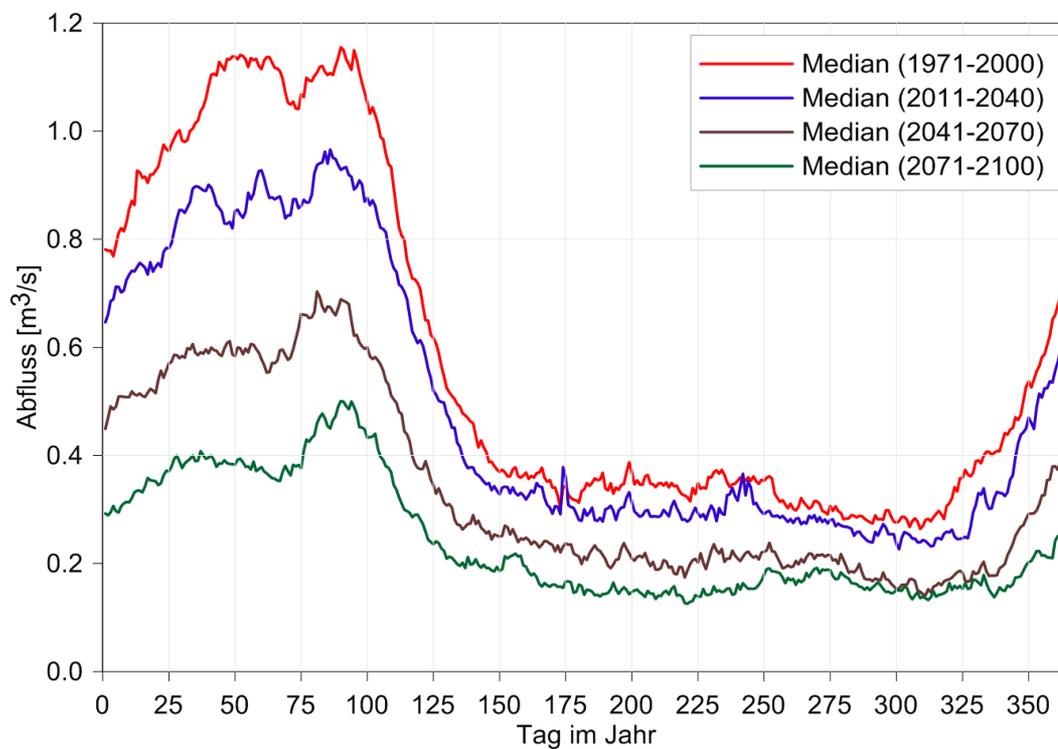


Abbildung 4.40: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Aller am Pegel Walbeck (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)

Abb. 4.39 und Abb. 4.40 stellen den innerjährlichen Gang des Abflusses an den Pegeln Weferlingen und Walbeck dar. Hier zeigt sich, dass die Abflüsse in den zukünftigen Zeithorizonten kontinuierlich absinken. Insgesamt verlängert sich die Trockenperiode im Frühjahr und Sommer, die für den Referenzzeitraum noch auf die Monate Mai bis Oktober beschränkt war. Für die entfernte Zukunft

2071–2100 zählen die Monate April und Anfang November zusätzlich zu den Trockenmonaten.

Tab. 4.12 beinhaltet die gewässerkundlichen Hauptzahlen sowie die HQ_{100} für den Referenzzeitraum und für die drei Zukunftszeiträume. Insgesamt nehmen die gewässerkundlichen Kennwerte um mehr als 50 % bis zur fernen Zukunft 2071–2100 ab, wobei die Reduzierung der MNQ etwa 8 % mehr ausmacht als für die anderen beiden Größen. Die Farben in Tab. 4.13 zeigen an, dass die Kenngrößen MNQ und MQ im Verlauf kontinuierlich zurückgehen. Die MHQ bilden eine Ausnahme, da hier für den ersten Zukunftszeitraum die Werte auf demselben Niveau bleiben und erst ab 2011–2040 abnehmen.

Tabelle 4.13: Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässerkundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ_{100} (Median aller 10 Realisierungen) für die Pegel Weferlingen und Walbeck [Einheit: m^3/s]

Pegel		1971–2000	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Weferlingen	MNQ	0,17	0,15	0,09	0,06
	MQ	0,77	0,67	0,47	0,35
	MHQ	3,9	4,1	3,0	2,2
	HQ_{100}	12,1	19,0	11,4	5,1
Walbeck	MNQ	0,14	0,12	0,07	0,05
	MQ	0,60	0,51	0,34	0,24
	MHQ	2,8	3,0	2,0	1,3
	HQ_{100}	10,6	16,5	10,2	3,8

Tabelle 4.14: Gegenüberstellung der für die Aller mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden

Pegel	Zeitraum	10%-Perzentil der Abflussdauerlinie [m^3/s]	NM7Q [m^3/s]	maxD [Tage]
Weferlingen	1971–2000	0.24	0.37	5
	2011–2040	0.19	0.31	10
	2041–2070	0.12	0.20	21
	2071–2100	0.10	0.14	29
Walbeck	1971–2000	0.20	0.32	5
	2011–2040	0.16	0.26	11
	2041–2070	0.10	0.17	24
	2071–2100	0.07	0.12	33

Bei den HQ_{100} ergibt sich im Mittel für den Zeitraum 2011–2040 ein Anstieg von ca. 56 % gegenüber dem Referenzzeitraum. Erst ab 2041–2070 verringern sich die Werte im Vergleich zum Referenzzeitraum um etwa 5 % und für 2071–2100 um 58 % (Weferlingen) bzw. 64 % (Walbeck).

Der Rückgang des mittleren Niedrigabflusses spiegelt sich in der Änderung der Niedrigwasserstatistik wider. Die Unterschreitungsdauern des NMQ (1971–2000) steigen um etwa 25 Tage für den fernen Zeitraum 2071–2100 an

(Tab. 4.14). Für die anderen Kennwerte ergeben sich im Vergleich zum Referenzzeitraum bei allen Zeiträumen kontinuierliche Rückgänge.

4.3.6 Querne/Weida (Schwarzerderegion im Regenschatten des Harzes)

Im Einzugsgebiet der Weida wird mit den WETTREG2010-Ergebnissen für den Referenzzeitraum (1971–2000) im Vergleich zu den anderen Gebieten der geringste mittlere Niederschlag von 556 mm berechnet (Tab. 4.15). Die Klimatische Wasserbilanz ist wie in der Biese und in der Rossel negativ, liegt jedoch mit –74 mm/a noch unter den Werten den anderen Gebiete. Der Gesamtabfluss setzt sich zu 45 % aus dem Grundwasserabfluss und zu 55 % aus dem Direktabfluss zusammen. Der Niederschlag geht mit jeder Zeitperiode kontinuierlich zurück. In der fernen Zukunft 2071–2100 ist insgesamt eine Abnahme von 10 % im Vergleich zum Referenzzeitraum zu verzeichnen.

Die potenzielle Verdunstung steigt im Verlauf des 21. Jahrhunderts sukzessive an, wobei der Zuwachs für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 26 % beträgt, während bei der mittleren realen Verdunstung für diesen Zeitraum ein Rückgang von 5 % zu verzeichnen ist.

Tabelle 4.15: Gegenüberstellung der für die Weida mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden (* Erläuterung zum Eintrag „kein Abfluss“: siehe Kapitel 4.3.1 auf S. 81)

Weida	1971–2000 [mm/a]	2011–2040 [mm/a]	2041–2070 [mm/a]	2071–2100 [mm/a]
Niederschlag	556	543	521	499
Potenzielle Verdunstung	630	664	739	795
Reale Verdunstung	527	523	515	501
Klimatische Wasserbilanz	–74	–121	–217	–296
Grundwasserabfluss	15	6	kein Abfluss*	kein Abfluss*
Direktabfluss	18	16	13	11
Gesamtabfluss	32	22	8	kein Abfluss*

Der Vergleich des innerjährlichen Gangs für die verschiedenen Zeitperioden in Abb. 4.41 zeigt, dass sich am Mittel der realen Verdunstung wenig verändert, jedoch die innerjährliche Verteilung für die Monate Mai bis Juli eine starke Reduzierung (für den Zeitraum 2071–2100 um etwa ein Drittel) anzeigt.

Da die Klimatische Wasserbilanz auf der potenziellen Verdunstung beruht, die sich im Mittel stark ändert, ist hier ein ebenso stark ausgeprägtes Änderungssignal erkennbar, wobei die Werte in ferner Zukunft (2071–2100) auf bis zu –296 mm/a abfallen (Tab. 4.15). Der innerjährliche Verlauf zeigt, dass insbesondere in den Sommermonaten und im Herbst eine Verringerung der Klimatischen Wasserbilanz zu verzeichnen ist, wobei die stärkste Reduzierung im Juli auftritt (Abb. 4.42).

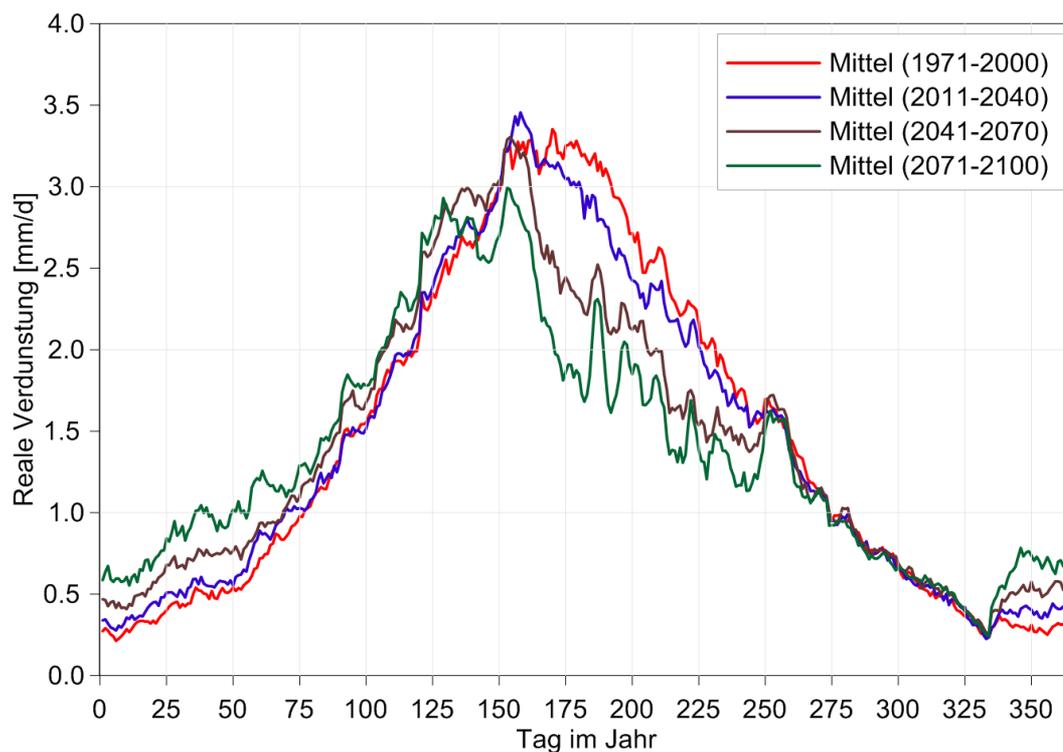


Abbildung 4.41: Innerjährlicher Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Weida (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

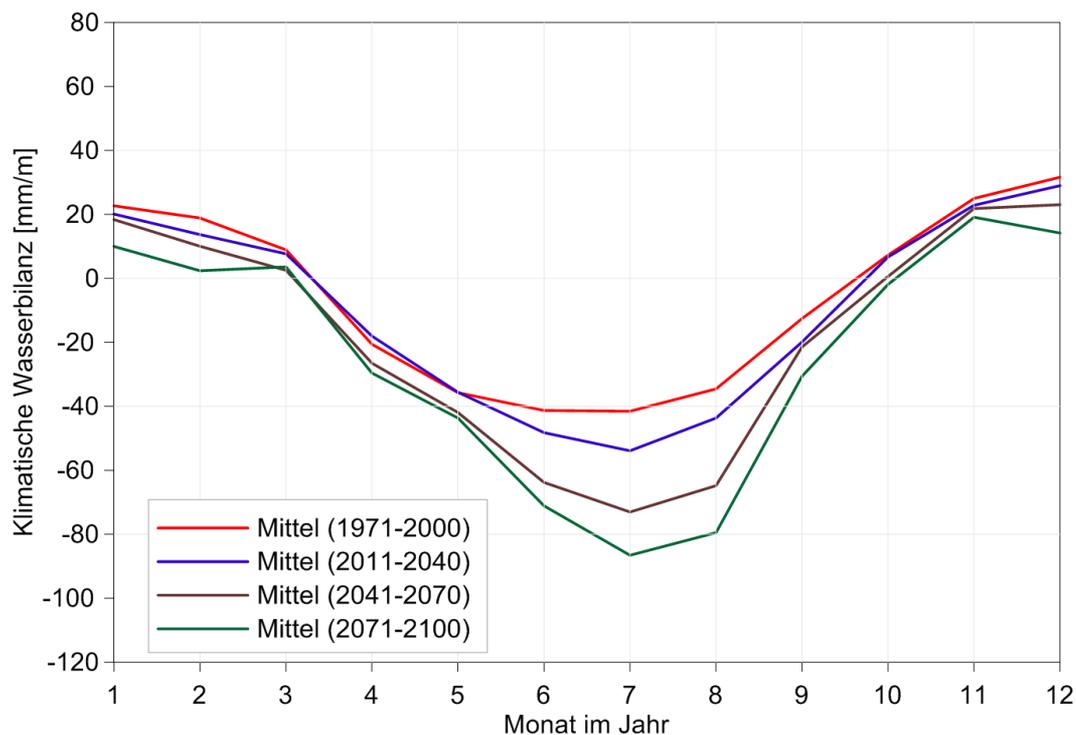


Abbildung 4.42: Innerjährlicher Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Weida (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

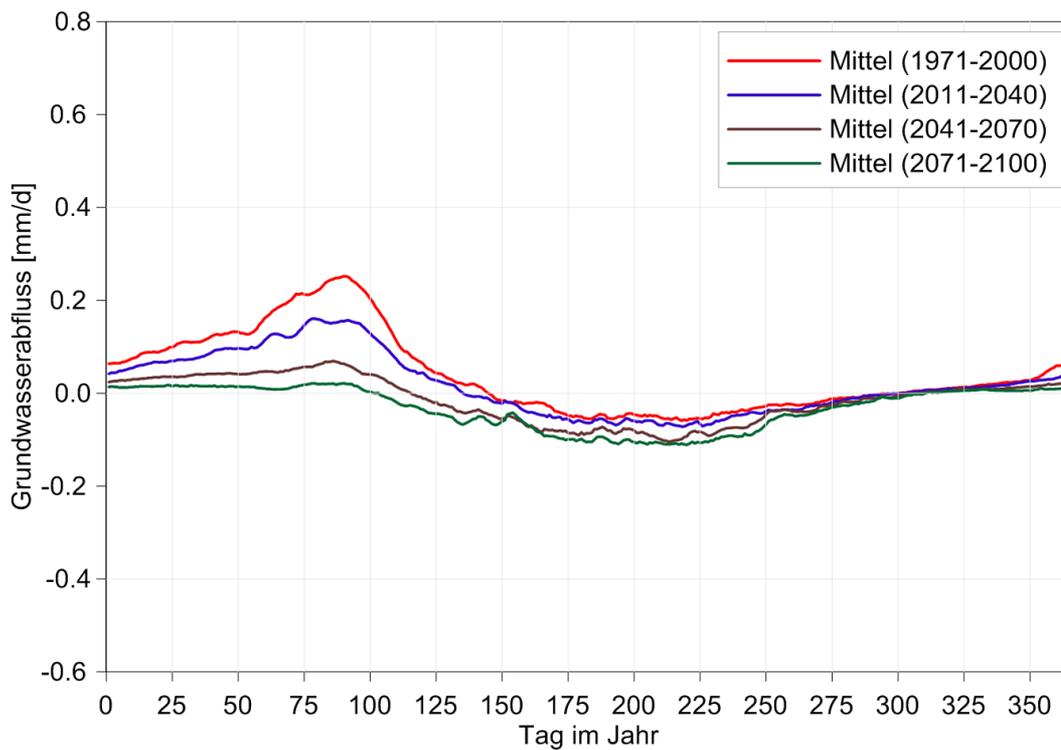


Abbildung 4.43: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Weida (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)

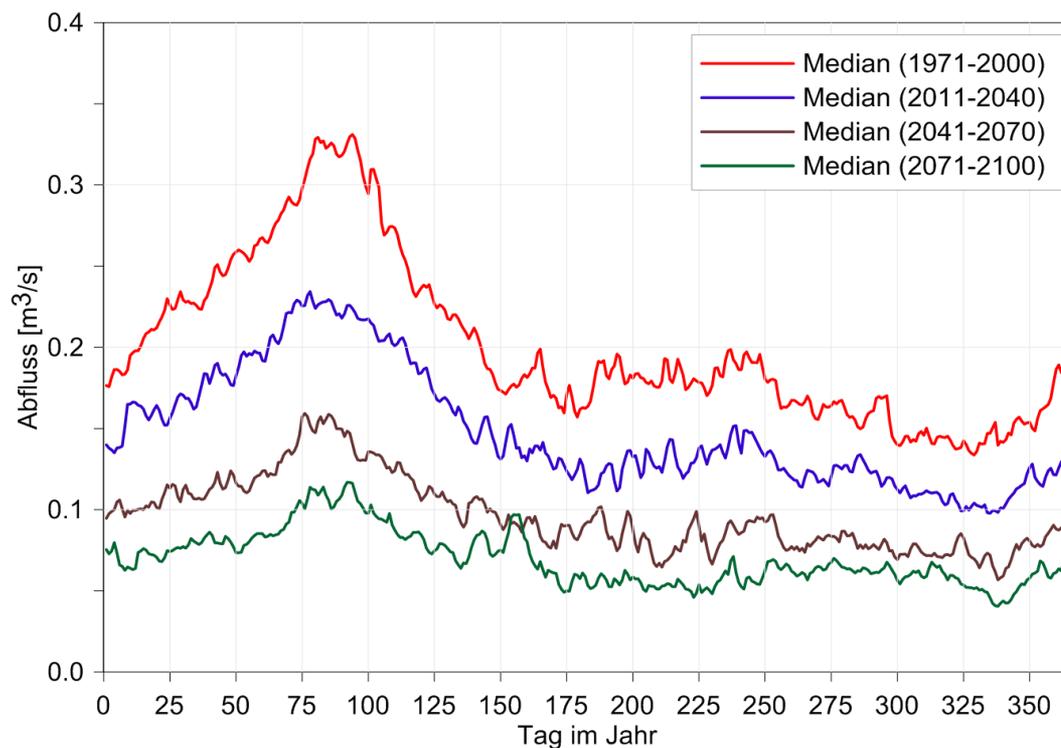


Abbildung 4.44: Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Weida am Pegel Stedten (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)

Das Niveau des Grundwasserabflusses wird von 15 mm/a für den Referenzzeitraum in der Zukunft um bis zu 26 mm verringern (Tab. 4.15). Dies ist auf die Verringerung der Niederschläge zurückzuführen. Während für den Referenzzeitraum lediglich die Monate Mai bis Oktober betroffen sind, wird für den Zeitraum 2071–2100 fast das gesamte Jahr über im Mittel mehr Wasser verdunstet als versickern kann. Daher ist der Grundwasserabfluss hier negativ, d. h. die Zehrung überwiegt die Sickerwasserbildung (Abb. 4.43). Der Grundwasserabfluss der kommenden 90 Jahre geht insbesondere in den Monaten Dezember bis April zurück, während in den Monaten August bis November kaum eine Veränderung erkennbar ist.

Abb. 4.44 zeigt den innerjährlichen Gang des Abflusses am Pegel Stedten. Hier zeigt sich, dass die Abflüsse in den zukünftigen Zeithorizonten kontinuierlich abnehmen, so dass das Niveau für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum halbiert ist. Die Jahresgänge wirken insgesamt parallel nach unten verschoben, lediglich für die Wintermonate ist der Rückgang etwas stärker ausgeprägt als im Sommer.

Tab. 4.16 zeigt die gewässerkundlichen Hauptzahlen sowie die HQ₁₀₀ für den Referenzzeitraum und für die drei Zukunftszeiträume.

Tabelle 4.16: Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässerkundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ₁₀₀ (Median aller 10 Realisierungen) für den Pegel Stedten [Einheit: m³/s]

Pegel		1971–2000	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Stedten	MNQ	0,09	0,06	0,02	0,01
	MQ	0,21	0,16	0,10	0,07
	MHQ	0,81	0,68	0,56	0,50
	HQ ₁₀₀	3,2	2,0	1,5	1,6

Tabelle 4.17: Gegenüberstellung der für die Weida mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden

Pegel	Zeitraum	10%-Perzentil der Abflussdauerlinie [m ³ /s]	NM7Q [m ³ /s]	maxD [Tage]
Stedten	1971–2000	0,08	0,27	11
	2011–2040	0,06	0,17	27
	2041–2070	0,03	0,08	49
	2071–2100	0,02	0,03	65

Insgesamt nehmen die gewässerkundlichen Kennwerte um etwa 65 % bis zur fernen Zukunft 2071–2100 ab, wobei die Reduzierung der MNQ mit 85 % deutlicher ausfällt als bei den MHQ mit 38 %. Die Farben in Tabelle 4.16 zeigen an, dass die Kenngrößen sich in der Zukunft kontinuierlich reduzieren, wobei für den Zeitraum 2071–2100 kaum eine Veränderung gegenüber den vorangegangenen 30 Jahren zu erkennen ist.

Bei den HQ_{100} reduzieren sich die Werte bis zum Zeitraum 2041–2070. Allerdings verringert sich das Niveau für den Zeitraum 2071–2100 nicht weiter (Tab. 4.16).

Der kontinuierliche Rückgang des mittleren Niedrigwasserabflusses spiegelt sich in der Änderung der Niedrigwasserstatistik wider. So nehmen die Unterschreitungsdauern des NMQ (1971–2000) um 54 Tage für den fernen Zeitraum 2071–2100 zu, während die anderen Kennwerte verringert werden (Tab. 4.17).

4.3.7 Vergleich der Landschaftsräume

4.3.7.1 Hydrometeorologische Situation

Bezogen auf die Simulation der Referenzgebiete können die Landschaftsräume „Schwarzerderegion im Regenschatten des Harzes“ (Weida) und „Altmark und Drömling“ (Biese) als die trockensten Untersuchungsregionen betrachtet werden. Dies zeigt sich sowohl im Niederschlag als auch in der Klimatischen Wasserbilanz: Für den Referenzzeitraum wird mit den WETTREG2010-Ergebnissen für die Weida ein mittlerer Niederschlag von 556 mm und für die Biese von 564 mm berechnet, was die geringsten Werte im Vergleich zu den anderen Referenzgebieten sind (Tab. 4.18). Auch die Klimatische Wasserbilanz als Anzeiger für das Wasserdargebot liegt für diese beiden Gebiete weit im negativen Bereich (Weida: -74 mm/a; Biese: -49 mm/a). Ebenfalls eine negative Klimatische Wasserbilanz weist die Rossel, die den Landschaftsraum „Elbetal und glazialer Osten“ repräsentiert, mit -19 mm/a auf.

Für die Harzregion (Holtemme) wird mit 699 mm/a der höchste mittlere Niederschlag simuliert (Tab. 4.18). Hierbei handelt es sich um den wasserreichsten Landschaftsraum, worauf auch die positive Klimatische Wasserbilanz von 50 mm/a hinweist. Das Schwarzerdegebiet, das durch die Aller repräsentiert wird, liegt sowohl hinsichtlich des Niederschlags mit 614 mm/a als auch hinsichtlich der Klimatischen Wasserbilanz mit 4 mm/a zwischen den Wertebereichen der anderen Landschaftsräume.

Auch wenn die meteorologische Ausgangssituation für die fünf Referenzgebiete unterschiedlich ist, so sind doch die Änderungen in den Projektionszeiträumen bezogen auf den jeweiligen Referenzlauf für alle ähnlich: Der Niederschlag geht in allen Gebieten für den Zeitraum 2011–2040 kaum zurück (Tab. 4.18). Für den Zeitraum 2041–2070 beträgt der Rückgang etwa 7 % und für die entfernte Zukunft 2071–2100 etwa 10 %.

Ähnlich lassen sich die Ergebnisse für die potenzielle Verdunstung interpretieren. Bis auf die Holtemme ergibt sich für den Zeitraum 2011–2040 in allen Gebieten eine ähnliche Zunahme von etwa 6 % (Tab. 4.18). Für den Zeitraum 2041–2070 steigt die potenzielle Verdunstung in diesen Gebieten um etwa 18 % und für den Zeitraum 2071–2100 um etwa 28 % an. Für diese vier der fünf Referenzgebiete ergeben sich ähnliche Anstiege für alle Zeitperioden. Die Holtemme sticht als einziges Referenzgebiet hervor, da hier die Zunahme im Vergleich zu den anderen Gebieten noch stärker ausfällt. Für den Zeitraum 2071–2100 steigt

hier die potenzielle Verdunstung im Mittel um bis zu 37 % an.

Da die Änderungen im Niederschlag im Vergleich der Gebiete sehr ähnlich sind und sich die Klimatische Wasserbilanz aus der Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung berechnet, prägen sich die Verhältnisse der potenziellen Verdunstung bei der Klimatischen Wasserbilanz durch. Dementsprechend sind auch hier die Änderungen zwischen den Gebieten sehr ähnlich, bis auf die Holtemme, bei der stärkere Rückgänge zu verzeichnen sind (Tab. 4.18).

Die Analyse des innerjährlichen Gangs für die Klimatische Wasserbilanz in den vorangegangenen Abschnitten hat gezeigt, dass auch im innerjährlichen Verlauf große Ähnlichkeiten zwischen den Referenzgebieten auftreten. Abb. 4.45 zeigt die Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs für die Klimatische Wasserbilanz aller Referenzgebiete. Die größten Änderungen ergeben sich in allen Gebieten hauptsächlich in den Sommermonaten für den Zeitraum 2071–2100: Hier halbieren sich die Werte in etwa im Vergleich zum Referenzzeitraum.

Tabelle 4.18: Abweichungen der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten hydrometeorologischen Größen gegenüber dem Referenzzeitraum (Mittelwert aller 10 Realisierungen)

			Biese	Rossel	Holtemme	Aller	Weida	
Niederschlag	[mm/a]	1971–2000	564	640	699	614	556	
	%	2011–2040	-2,6	-0,3	-2,3	-2,5	-2,4	
	% -Abweichung	%	2041–2070	-6,9	-6,3	-7,1	-7,2	-6,3
		%	2071–2100	-9,7	-10,1	-10,6	-11,8	-10,3
Potenzielle Verdunstung	[mm/a]	1971–2000	612	659	649	610	630	
	%	2011–2040	6,4	6,1	8,9	6,4	5,4	
	% -Abweichung	%	2041–2070	18,9	18,3	23,0	17,4	17,3
		%	2071–2100	30,0	28,3	36,6	27,9	26,2
Klimatische Wasserbilanz	[mm/a]	1971–2000	-49	-19	50	4	-74	
	Absolute Abweichung	[mm/a]	2011–2040	-54,0	-41,7	-73,9	-54,4	-47,3
		[mm/a]	2041–2070	-154,4	-161,4	-198,6	-150,3	-143,7
		[mm/a]	2071–2100	-237,9	-251,2	-312,0	-242,2	-222,3

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die hydrometeorologischen Veränderungen für die einzelnen Gebiete nur im Detail voneinander unterscheiden, im Allgemeinen jedoch sehr ähnlich verlaufen. Aus diesem Grund lassen sich die Gebiete hinsichtlich der Wasserhaushaltskomponenten und Abflüsse im Folgenden gut miteinander vergleichen. Denn Änderungen dieser Größen lassen sich nun eher auf gebietsspezifische Randbedingungen als auf die Hydrometeorologie zurückführen.

4.3.7.2 Gebietshydrologie

Im Folgenden wird ein Vergleich der Gebiete vorgenommen, die hinsichtlich der Änderungen in der Gebietshydrologie das gesamte Spektrum abdecken (geringste Änderungen vs. stärkste Änderungen). Hintergrund dieser Entscheidung ist die Tatsache, dass das komplexe Zusammenspiel zwischen Klimaänderungen,

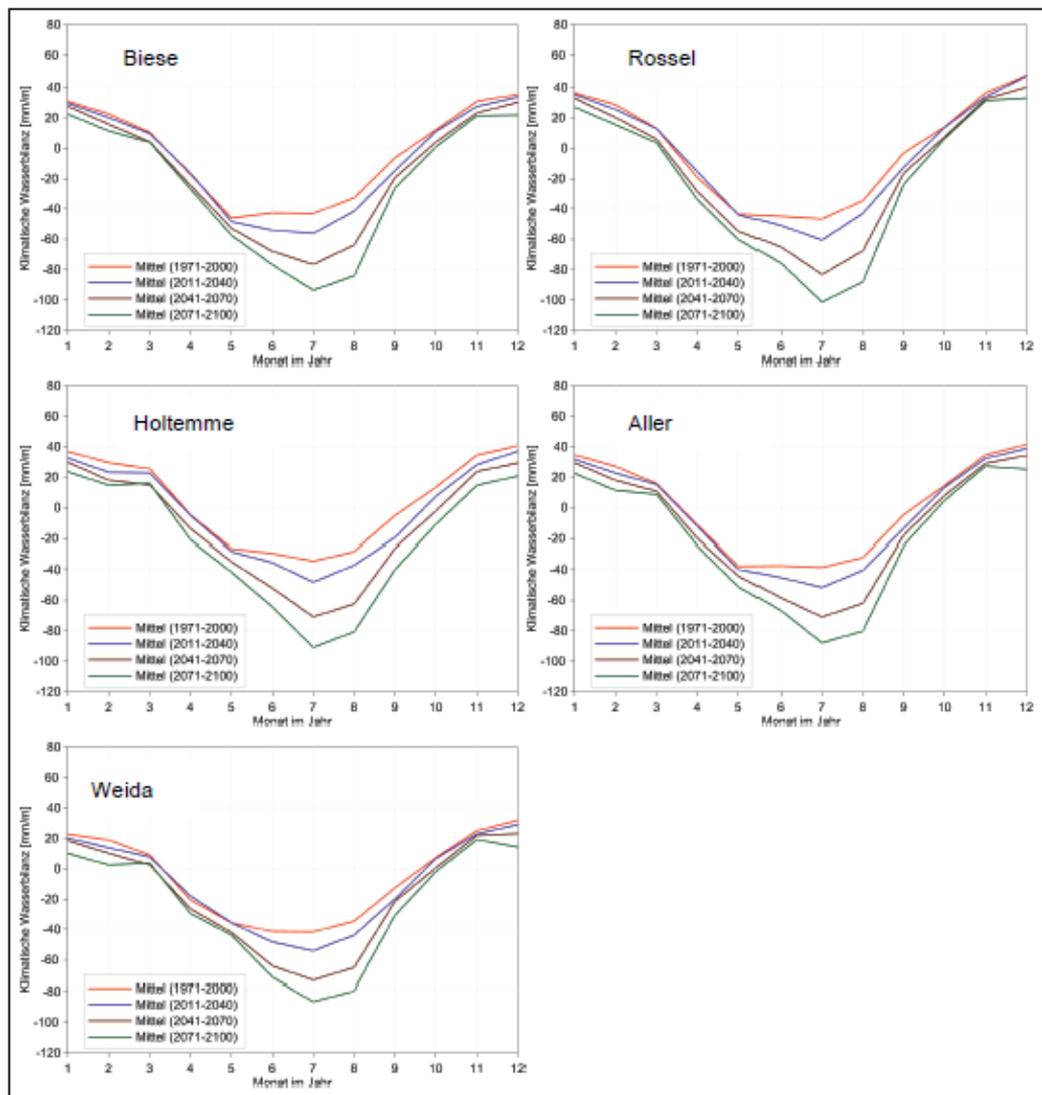


Abbildung 4.45: Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Klimatischen Wasserbilanz (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete

Landnutzungen, Boden- und anderer Gebietseigenschaften eine eindeutige Interpretation solcher Gebiete erschwert, die sich zwischen den Extrembeispielen befinden. Die Auswirkungen werden für die folgenden Regionen dargestellt:

1. Tieflandgebiete, die durch große Anteile grundwassernaher Flächen geprägt sind. Diese werden hier durch das Referenzgebiet der Biese repräsentiert.
2. Niederschlagsarme Gebiete mit vorwiegend bindigen Böden, für die die Weida charakteristisch ist.
3. Mittelgebirgsregionen mit vergleichsweise hohen Niederschlägen, die hier durch die Holtemme vertreten sind.

Hinsichtlich des Abflusses werden für die Weida die gravierendsten Änderungen berechnet. Hier verringert sich für den Zeitraum 2071–2100 der Abfluss im Vergleich zum Referenzzeitraum um 65 % (Tab. 4.19). Der bestimmende Faktor ist das Wechselspiel zwischen dem ohnehin geringen Niederschlag, der bis zum Zeitraum 2071–2100 im Mittel um 10 % zurückgeht, und den bindigen (feinkörnigen) Böden mit hohem Wasserrückhaltevermögen. Schon im Referenzzeitraum verdunstet ein beträchtlicher Anteil (95 %) des geringen Niederschlages (Tab. 4.20), weil die mächtigen Lössböden, die knapp die Hälfte des Gebietes bedecken, mit ihren hohen Kapillarwasserspeicherkapazitäten große Anteile des Niederschlages in der wechselfeuchten Bodenzone speichern und nur geringe Sickerwassermengen zulassen. Das gespeicherte Wasser steht der Vegetation und damit der Verdunstung zur Verfügung. Wenn in Zukunft jedoch noch weniger Niederschlag fällt, führt dies zu einer Abnahme der realen Verdunstung um bis zu 5 % (Tab. 4.21). Zunächst mag dies im Vergleich zu den Änderungen des Abflusses gering erscheinen, allerdings ist zu bedenken, dass der Abfluss nur einen relativ geringen Anteil des Niederschlags ausmacht, wohingegen eine fünfprozentige Änderung der Verdunstung eine Differenz von 25 mm/a ausmachen kann. Für die Weida bedeutet die Verminderung des Niederschlags, dass im Zeitraum 2071–2100 in etwa die Menge an Wasser verdunstet, die als Niederschlag dem Gebiet zur Verfügung steht. Damit tendiert der Gebietsabfluss gegen Null (Tab. 4.21).

Die Reduzierung der Verdunstung betrifft wie in den anderen Referenzgebieten insbesondere die Sommermonate (Abb. 4.46). Dabei besteht die stärkste Reduzierung in den Monaten Mai bis Juli um bis zu ein Drittel für den Zeitraum 2071–2100. In den Monaten November bis April sind in allen Gebieten erhöhte Werte zu verzeichnen. Ebenso ergeben sich für alle Gebiete nur geringe Veränderungen zwischen August und Oktober.

Tabelle 4.19: Prozentabweichungen der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflüsse gegenüber dem Referenzzeitraum (Mittelwert aller 10 Realisierungen) in %

Gebiet	Pegel	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Biese	Dobbrun	-14	-40	-52
Rossel	Mühlstedt	-4	-27	-37
Holtemme	Nienhagen	-9	-26	-35
Aller	Weferlingen	-13	-38	-55
Weida	Stedten	-23	-52	-65

Die Entwicklung des Abflusses wird in der Biese hauptsächlich von der erhöhten Verdunstung geprägt. Da das Gebiet einen sehr großen Anteil an grundwassernahen Flächen besitzt, wird auch hier ein relativ großer Anteil (91 %) des Niederschlags von den gesättigten Böden verdunstet (Tab. 4.20). Aufgrund der zukünftigen starken Erwärmung und der erhöhten Sonnenscheindauer (beschrieben im Teilbericht zum Los 1.1 und 1.2: Klima und Extreme) steigt die reale Verdunstung um bis zu 4 % an (Tab.4.21). Ab 2041–2070 überwiegt die reale Verdunstung den simulierten Niederschlag (Tab. 4.20).

4.3 Ergebnisse: Klimafolgen für die Gebietshydrologie

Table 4.20: Anteil der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung zum Niederschlag der jeweiligen Zeitperiode (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für alle Referenzgebiete in %. (* Hier überwiegt die Verdunstung den Niederschlag, d. h. es wird aus den Bodenspeichern gezehrt)

	Biese	Rossel	Holtemme	Weida	Aller
1971–2000	91	87	78	86	95
2011–2040	95	88	81	88	96
2041–2070	100*	92	84	93	99
2071–2100	100*	94	87	97	100

Table 4.21: Abweichungen der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusskomponenten gegenüber dem Referenzzeitraum (Mittelwert aller 10 Realisierungen)

			Biese	Rossel	Holtemme	Aller	Weida
Reale Verdunstung	[mm/a]	1971–2000	514	556	545	525	527
	%	2011–2040	1	1	1	1	-1
	%-Abweichung	2041–2070	3	-1	1	1	-2
	%	2071–2100	4	-3	0	0	-5
Grundwasserabfluss		1971–2000	6	70	109	58	15
	[mm/a]	2011–2040	-15	-6	-17	-16	-8
	Absolute Abweichung	2041–2070	-38	-31	-44	-41	-20
	[mm/a]	2071–2100	-51	-44	-60	-59	-26
Direktabfluss	[mm/a]	1971–2000	47	17	46	37	18
	[mm/a]	2011–2040	-6	-1	-3	-3	-2
	Absolute Abweichung	2041–2070	-17	-4	-10	-9	-4
	[mm/a]	2071–2100	-24	-6	-15	-15	-7
Gesamtabfluss	[mm/a]	1971–2000	53	87	156	95	32
	[mm/a]	2011–2040	-21	-7	-21	-19	-10
	Absolute Abweichung	2041–2070	-56	-35	-54	-50	-24
	[mm/a]	2071–2100	-75	-50	-75	-75	-32

Es ist jedoch sehr wichtig anzumerken, dass die reale Verdunstung vom Modell eher überschätzt wird: Das durch die Zehrung bedingte Absinken der Grundwasserflurabstände führt zu einer Dämpfung der Verdunstung. Diese Rückkopplung auf die Grundwasserverhältnisse kann vom verwendeten hydrologischen Modell nicht abgebildet werden (siehe Kapitel 5.2). Für die Biese ist demnach eher von moderateren Rückgängen des Abflusses auszugehen, als es hier dargestellt werden kann.

In der Harzregion fallen die Auswirkungen des Klimawandels wesentlich geringer aus als in den bisher beschriebenen Gebieten. Hier geht der mit 699 mm/a im Vergleich höchste Niederschlag um maximal 11 % bis zum Zeitraum 2071–2100 zurück (Tab. 4.18). Die reale Verdunstung bleibt im Mittel jedoch für die Zukunftszeiträume auf dem Niveau des Referenzzeitraums, so dass sich lediglich der verminderte Niederschlag auf die Abflussverhältnisse auswirkt. Eine Interpretation hinsichtlich der Bodeneigenschaften ist hier nicht ohne weiteres möglich, da es sich pedologisch um ein sehr heterogenes Gebiet handelt. Das

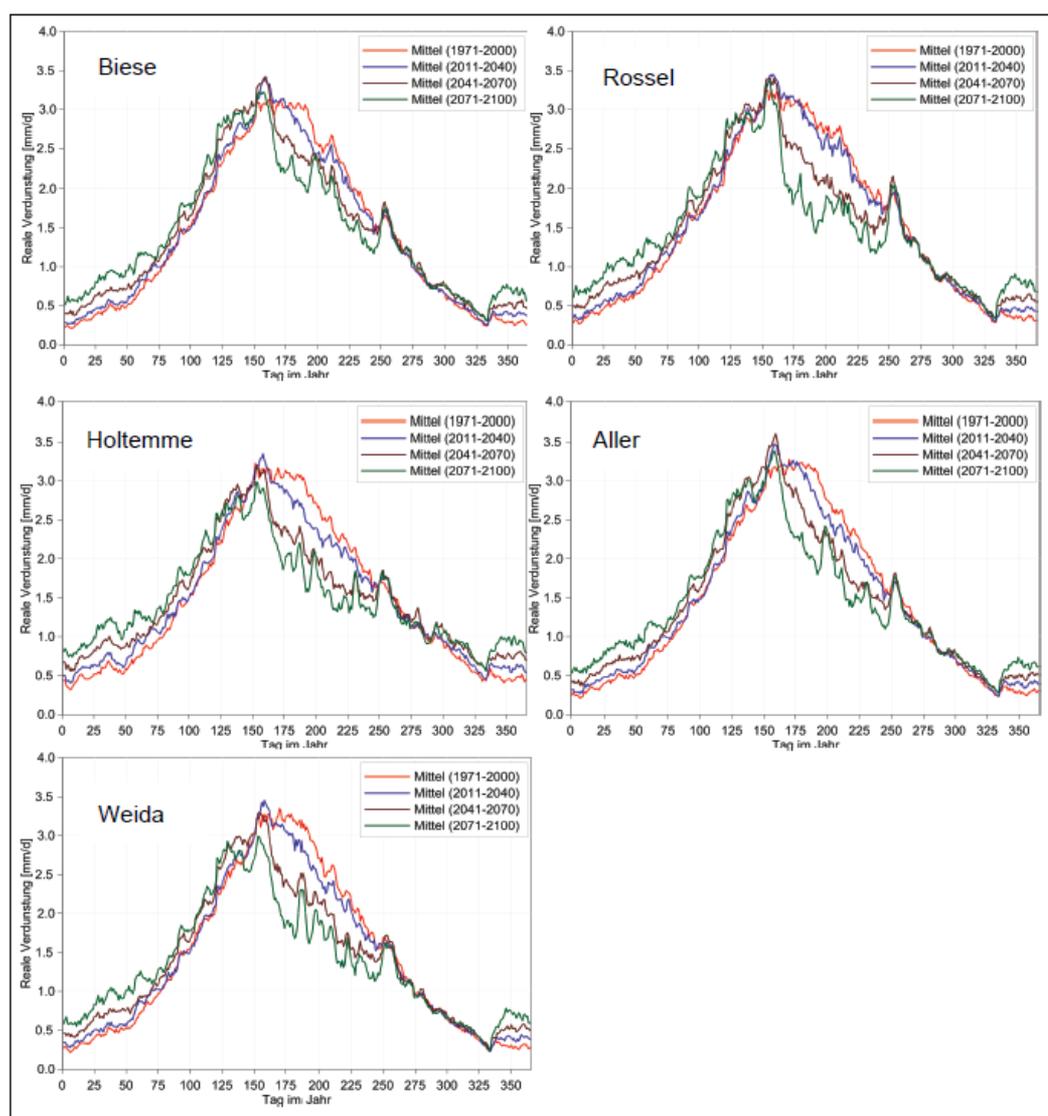


Abbildung 4.46: Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete

Einzugsgebiet der Holtemme ist durch zwei unterschiedliche Naturräume gekennzeichnet. Der Oberlauf befindet sich in den Hanglagen des Harzes mit Hartgesteinsverwitterungsböden und forstlicher Nutzung. Im Unterlauf durchquert sie das lössgeprägte nördliche Harzvorland mit dominierender Ackernutzung. Dies erklärt, warum die dominante Bodenform nur einen Anteil von 26 % für das gesamte Gebiet ausmacht (Abb. 4.1).

4.3.7.3 Grundwasserabfluss

Das langfristig zur Verfügung stehende Wasserdargebot spiegelt sich im Grundwasserabfluss der Gebiete wider. Daraus ergeben sich Informationen, die für die

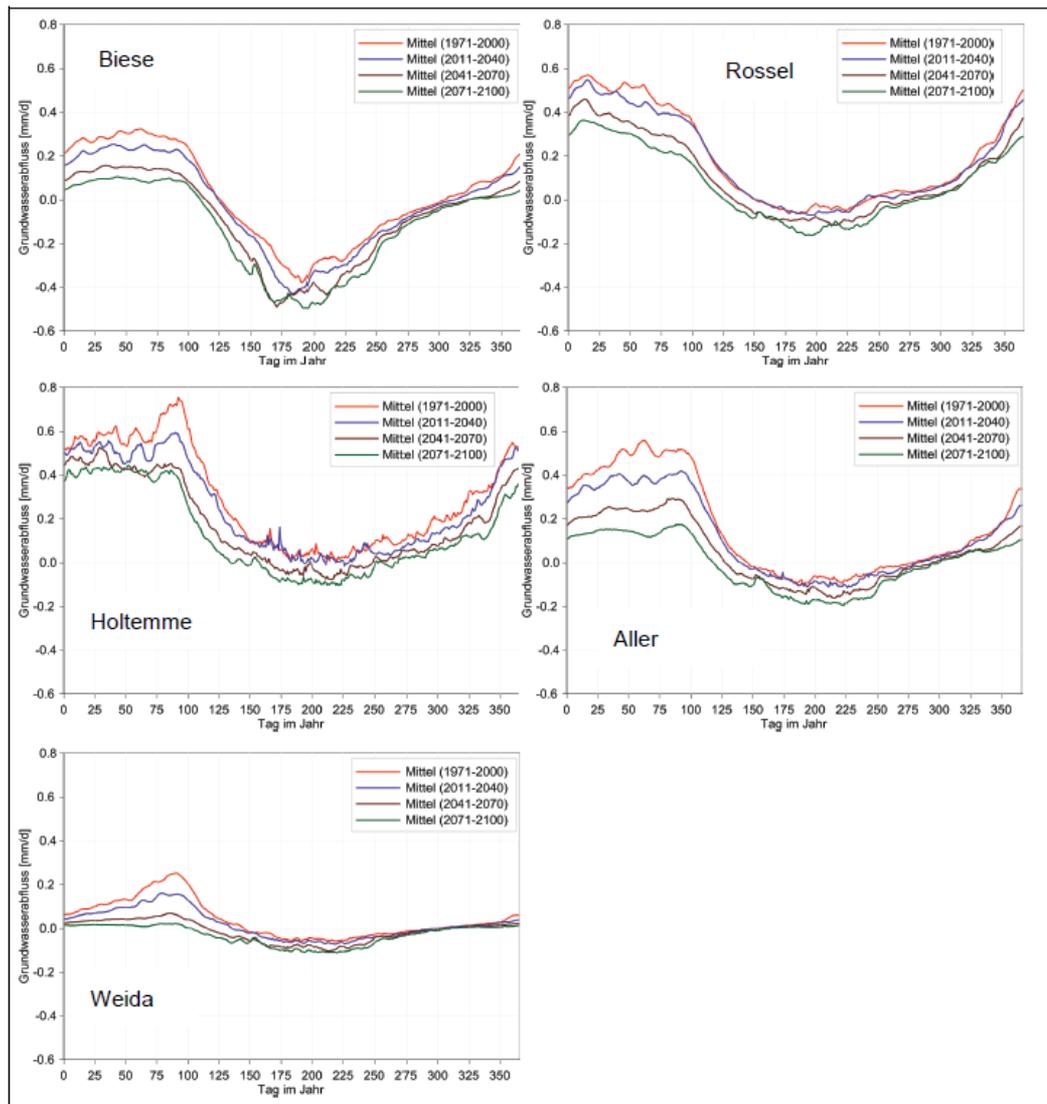


Abbildung 4.47: Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete

Bewirtschaftung von großer Bedeutung sind. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Jahrgänge des Grundwasserabflusses für die Gebiete vergleichend gegenübergestellt, auch wenn der Anteil des Grundwasserabflusses am Gesamt-abfluss zwischen den Gebieten stark variiert (Tab. 4.22).

Tabelle 4.22: Mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierte Anteile des Grundwasser- und Direktabflusses am Gesamt-abfluss (Mittelwert aller 10 Realisierungen)

	Aller	Biese	Holtemme	Rossel	Weida
Grundwasserabfluss/Gesamt-abfluss [%]	61	11	70	81	45
Direktabfluss/Gesamt-abfluss [%]	39	89	30	19	55

Abb. 4.47 zeigt, dass der Jahresgang des Grundwasserabflusses in jedem Referenzgebiet sehr unterschiedlich verläuft. So ist beispielsweise die Spannweite zwischen den Maxima im Winter und den Minima im Sommer für die Weida wesentlich geringerer ausgeprägt als in der Holtemme.

Als Gemeinsamkeit ergeben sich in den Sommermonaten für alle Gebiete abgesehen von der Holtemme bereits negative Werte für den Zeitraum 1971–2000. Bei den Gebieten Rossel, Aller und Weida beschränkt sich dieser Zeitraum auf die Monate Mai bis Juli, wohingegen für die Biese die Monate April bis September betroffen sind. Für den Zeitraum 2011–2040 verringern sich die Werte in allen Gebieten hauptsächlich in den Monaten Dezember bis März/April. In den Gebieten Rossel, Aller und Weida ergeben sich im Rest des Jahres nur geringfügige Verminderungen. Die Holtemme weist hingegen auch eine Reduzierung von August bis November auf. Für die Biese trifft dies für die Monate Mai bis Juli zu.

Wird der entfernte Zukunftszeitraum 2071–2100 betrachtet, ergibt sich in allen Gebieten eine Reduzierung der Werte im Winter und Frühjahr. Es verlängert sich zusätzlich der Zeitraum, für den sich negative Werte ergeben. Im Vergleich zum Referenzzeitraum ergeben sich für die Holtemme in den Monaten Mai bis Juli Zehrungen.

4.3.7.4 Gebietsabfluss

In Abb. 4.48 und Abb. 4.49 werden die Abflüsse bzw. Abflussspenden für die Pegel miteinander verglichen, die sich in der Nähe des Gebietsauslasses befinden und demzufolge als repräsentativ für die Abflussverhältnisse im Gebiet gelten können. Es werden beide Größen dargestellt, da anhand des Abflusses die Spannweite zwischen Winter- und Sommermonaten besser sichtbar wird, während die Abflussspende einen gebietsübergreifenden Vergleich ermöglicht.

In der Rossel ergeben sich bereits für den Referenzzeitraum nur geringe Unterschiede zwischen den Winter- und den Sommermonaten (Abb. 4.48, Abb. 4.49). Die Ursache dafür besteht darin, dass das Gebiet mit 81 % dominant vom Grundwasser geprägt ist (Tab. 4.22). Eine starke Reduzierung der Abflüsse/Abflussspenden ergibt sich vor allem zwischen den Zeiträumen 2011–2040 und 2041–2070.

In der Holtemme ergibt sich im Unterschied zu den anderen Gebieten eine sehr große Spannweite der Abflussspende zwischen den Winter- und Sommermonaten. Zum einen ist das Holtemmegebiet am höchsten gelegen und damit niederschlags- und schneereicher. Die Abflussbildung ist von der Schneeschmelze im Mittelgebirge geprägt. Zum anderen erreicht das Wasser aufgrund des Gefälles und der hydrogeologischen Verhältnisse (Festgesteinsbereich) wesentlich schneller den Vorfluter, als dies in den anderen Gebieten der Fall ist. Insgesamt ergeben sich in den Sommermonaten geringere Rückgänge der Abflüsse als in den anderen Gebieten.

4.3 Ergebnisse: Klimafolgen für die Gebietshydrologie

In der Weida bestehen für den Referenzzeitraum bei den Abflüssen bereits nur geringe Unterschiede zwischen den Winter- und den Sommermonaten. Im Mittel verringert sich der Abfluss von $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$ für den Zeitraum 1971–2000 auf $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ für den Zeitraum 2071–2100, was einer Austrocknung nahe kommt.

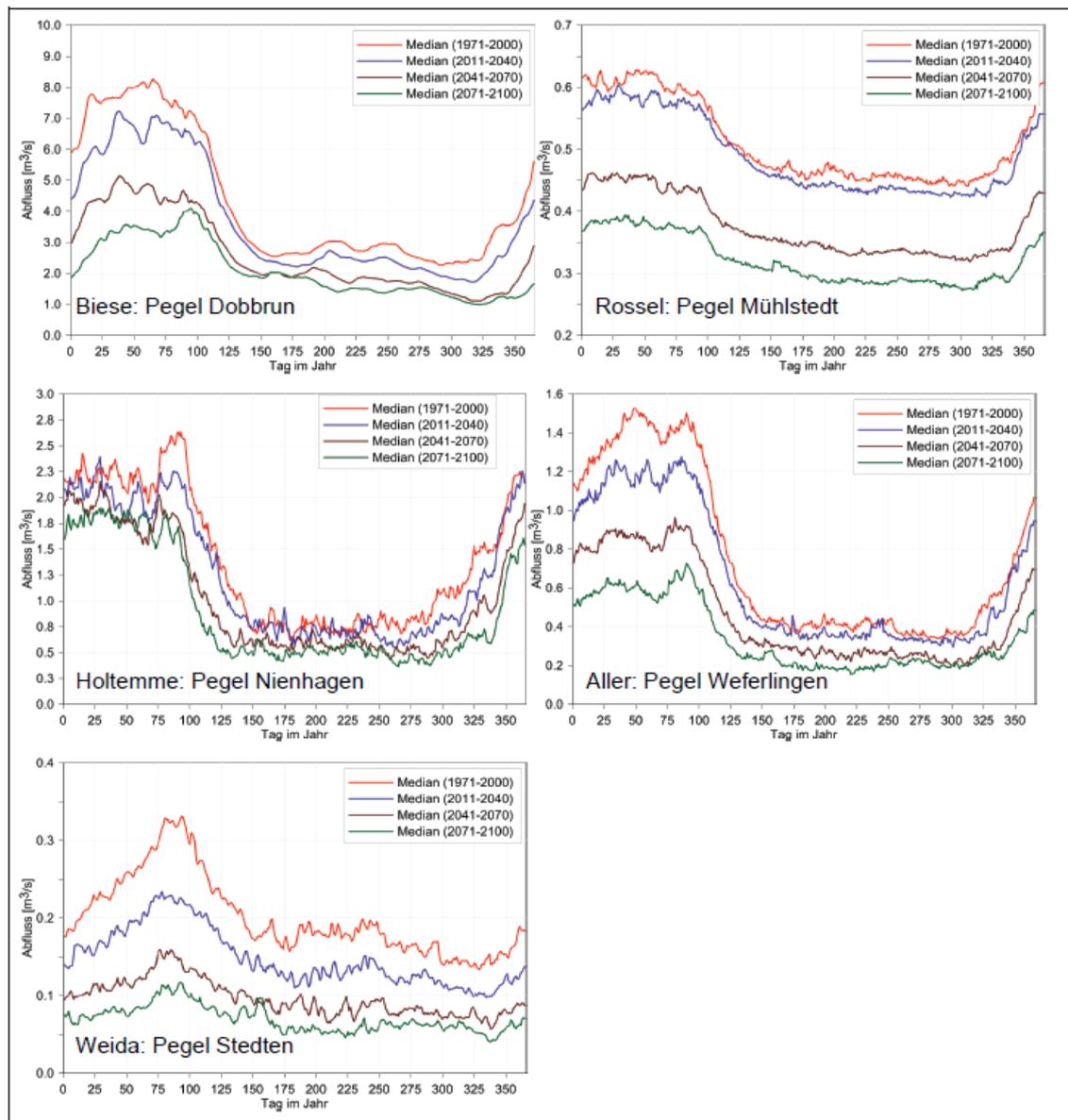


Abbildung 4.48: Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete

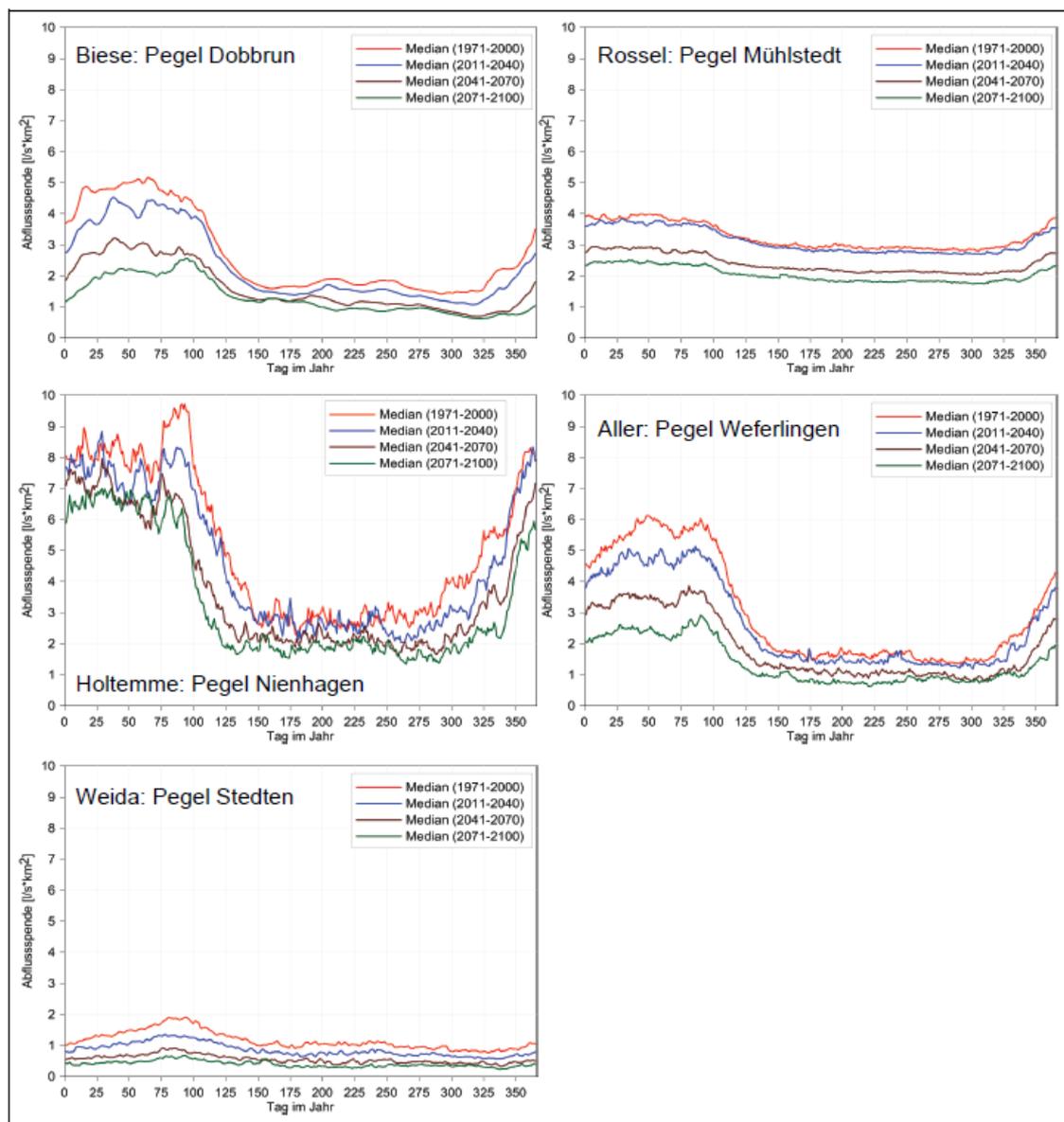


Abbildung 4.49: Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflussspende (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete

4.3.7.5 Hoch- und Niedrigwasserkennwerte

Hinsichtlich der Änderungen der Hochwasserkennwerte lassen sich Ähnlichkeiten zwischen der Biese und der Rossel feststellen. So bleibt das HQ₁₀₀ in beiden Gebieten für den Zeitraum 2011–2040 in etwa auf dem Niveau des Referenzzeitraums (Tab. 4.23). Für den Zeitraum 2041–2070 ist hingegen ein starker Rückgang von etwa 30 % gegenüber dem Ausgangsniveau zu verzeichnen (Tab. 4.24). In der entfernten Zukunft 2071–2100 bleiben die Werte auf dem Niveau der dreißig vorangegangenen Jahre.

Tabelle 4.23: Aus Tagesmittelwerten abgeleitete HQ₁₀₀ (Median über alle 10 Realisierungen) [Einheiten: m³/s]

Gebiet	Pegel	1971–2000	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Biese	Dobbrun	40,0	37,6	29,3	30,0
Rossel	Mühlstedt	2,1	2,0	1,4	1,3
Holtemme	Nienhagen	25,6	32,7	22,2	15,3
Aller	Weferlingen	12,1	19,0	11,4	5,1
Weida	Stedten	3,2	2,0	1,5	1,6

Tabelle 4.24: Prozentuale Abweichungen vom Referenzzeitraum der aus Tagesmittelwerten abgeleiteten HQ₁₀₀ (Median über alle 10 Realisierungen)

Gebiet	Pegel	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Biese	Dobbrun	-6	-27	-25
Rossel	Mühlstedt	-4	-30	-35
Holtemme	Nienhagen	28	-13	-40
Aller	Weferlingen	57	-6	-58
Weida	Stedten	-36	-51	-51

Die Entwicklungen der Holtemme und der Aller weichen von den anderen Gebieten ab. Hier steigen die Werte für den Zeitraum 2011–2040 zwischen 28 % (Holtemme) und 57 % (Aller) drastisch an (Tab. 4.24). In den folgenden 30 Jahren ist dann jedoch eine Abnahme der HQ₁₀₀ im Vergleich zum Referenzzeitraum festzustellen, die sich in der entfernten Zukunft 2071–2100 auf 40 % (Holtemme) bzw. 58 % (Aller) weiter verstärkt. Im Gegensatz zu den anderen Gebieten verfügen sowohl die Holtemme als auch die Aller für den Referenzzeitraum über eine positive KWB. Die KWB ist absolut betrachtet auch für den ersten Zukunftszeitraum 2011–2040 im Vergleich zu den restlichen Gebieten am höchsten. Das bedeutet, dass den Gebieten mehr Wasser zur Verfügung steht, so dass die Wahrscheinlichkeit, dass hochwasserauslösende Starkniederschläge auf ein trockenes Gebiet treffen, geringer als in den anderen Referenzgebieten ist.

In der Weida ergibt sich zwischen den ersten beiden Zeitperioden mit 36 % ein vergleichsweise starker Rückgang, der für den Zeitraum 2041–2070 weiter zunimmt, jedoch in der entfernten Zukunft auf demselben Niveau verbleibt (Tab. 4.24).

Tabelle 4.25: Entwicklung der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden

Gebiet	Pegel		10%-Perzentil der NM7Q Abflussdauerlinie			maxD	
Biese	Dobbrun	1971–2000	[m ³ /s]	1,8	2,8	[Tage]	14
		2011–2040		-19	-19		34
		2041–2070	[%]	-46	-47		76
		2071–2100		-56	-58		109
Rossel	Mühlstedt	1971–2000	[m ³ /s]	0,39	0,54	[Tage]	13
		2011–2040		-4	-4		28
		2041–2070	[%]	-27	-25		121
		2071–2100		-37	-38		189
Holtemme	Nienhagen	1971–2000	[m ³ /s]	0,31	0,41	[Tage]	4
		2011–2040		-14	-12		8
		2041–2070	[%]	-30	-38		13
		2071–2100		-39	-52		17
Aller	Weferlingen	1971–2000	[m ³ /s]	0,24	0,37	[Tage]	5
		2011–2040		-18	-17		10
		2041–2070	[%]	-48	-45		21
		2071–2100		-60	-64		29
Weida	Stedten	1971–2000	[m ³ /s]	0,08	0,27	[Tage]	11
		2011–2040		-32	-35		27
		2041–2070	[%]	-65	-68		49
		2071–2100		-77	-87		65

Insgesamt betrachtet ist in allen Gebieten eine Dämpfung der Hochwasser in den entfernten Zukunftszeiträumen 2041-2070 und 2071–2100 zu erwarten (Tab. 4.23). Dies spricht gegen die allgemein angenommene These, dass Extremereignisse sich im Zuge des Klimawandels häufen werden. Im Los 1.1 (siehe Teilbericht zu den Losen 1.1 und 1.2: Klima und Extreme, Ausführende: CEC Potsdam GmbH) wurden die Änderungen des maximalen Niederschlags für die Dauerstufen 2, 5 und 10 Tage untersucht. Hier ergaben sich für die nächsten neunzig Jahre vernachlässigbare Änderungen. Allerdings beschränkt sich diese Analyse auf die Beispielstation Wittenberg, so dass an dieser Stelle keine abschließende Interpretation möglich ist, da die Niederschlagsmengen hinsichtlich der Dauerstufen für alle Referenzgebiete näher untersucht werden müssten, um Rückschlüsse auf die Entwicklung der Extremabflüsse ziehen zu können.

Wird trotz der oben genannten Einschränkungen davon ausgegangen, dass sich hinsichtlich des Extremniederschlags auch in den Referenzgebieten kaum Änderungen ergeben, lässt sich der Rückgang der Extremabflüsse auf die allgemeine Erwärmung, den Rückgang des mittleren Niederschlags und die Zunahme der Sonnenscheindauer zurückführen, die insgesamt trockenere Bedingungen mit sich bringen. Zudem bewirkt die Erwärmung einen Rückgang des Schneeniederschlags und damit eine Reduzierung der Schneeschmelze, die insbesondere im Harz maßgeblich zu Extremabflüssen beiträgt.

Nehmen Trockenperioden insgesamt zu, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass länger anhaltende Dauerregen, die maßgeblich Hochwasserereignisse in größeren Einzugsgebieten prägen, auf „trockene“ Gebiete treffen. In diesem Fall würden dann erst Anteile des Niederschlages zu einer Gebietsaufweitung führen, bevor es zur Abflussbildung kommt. Dies wäre eine mögliche Erklärung, warum z.B. für die Biese als dem einzigen großen Gebiet, für das aus Tageswerten Hochwasserkennwerte ableitbar sind, zu einer Dämpfung der Hochwasser im Verlauf der nächsten 90 Jahre kommt.

Hinsichtlich der Niedrigwasserkennwerte ergibt sich in allen Gebieten eine kontinuierliche Zunahme der maximalen Unterschreitungsdauer des NMQ (maxD), wobei mit Abstand die stärkste Zunahme in der Rossel für den Zeitraum 2071–2100 um 176 Tage auftritt, während in der Holtemme die geringste Änderung von 13 Tagen vorliegt (Tab. 4.25). Werden die anderen Kennwerte miteinander verglichen, so ergeben sich in der Weida die gravierendsten Rückgänge um bis zu 87 % für den Zeitraum 2071–2100.

5 Abschätzung der Unsicherheiten

Die in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse beruhen auf einer langen Modellkette, deren Glieder jeweils mit Quellen der Unsicherheit verknüpft sind. Im Folgenden werden die Unsicherheiten auf der Ebene der Klimaprojektionen und auf Ebene des hydrologischen Modells näher diskutiert.

5.1 Klimatische Eingangsgrößen

Bereits die klimatischen Eingangsgrößen sind Modellergebnisse. Im Bericht für Los 1.1 und 1.2 wird darauf hingewiesen, dass das SRES-Szenario A1B ein Ergebnis des gekoppelten großräumigen Atmosphären-Ozean-Modells ECHAM5/MPI-OM darstellt. Aus diesem erfolgte dann mit WETTREG2010 eine Regionalisierung auf die lokale Skala. Die Autoren des ersten Teils weisen zudem darauf hin, dass diese Ergebnisse „nur einen Teil der möglichen Bandbreite eines zukünftigen Klimas“ darstellen.

Die Modellunsicherheiten, die sich durch die Klimadaten ergeben, werden im Folgenden für jedes Referenzgebiet über die Bandbreite der Ergebnisse und über die Abweichungen zu den Ergebnissen beschrieben, die sich aus den Beobachtungen ergeben. Dabei werden in Abbildung 5.1 für den Referenzzeitraum 1971–2000 die Abflüsse gegenübergestellt, die mit den beobachteten Klimadaten simuliert wurden („Kalibrierungslauf“) und denen, die sich bei Verwendung von WETTREG2010-Ergebnissen ergeben. Für alle Gebiete liegt der Kalibrierungslauf in etwa innerhalb des hellgrauen Bandes, das die Bandbreite für die 10 Realisierungen darstellt. Grob betrachtet bilden die WETTREG2010-Ergebnisse das Niveau des beobachteten Klimas ab.

Die Weida bildet jedoch eine Ausnahme: Hier wird der Kalibrierungslauf von den mit WETTREG simulierten Ergebnissen erheblich unterschätzt. Diese gravierenden Unterschiede zeigen sich bereits bei der KWB, die mit den WETTREG-Ergebnissen im Mittel um 14 mm/a geringer ausfällt als bei den Beobachtungsdaten (Tab. 5.1). Die potenzielle Verdunstung wird im Vergleich zu den Beobachtungen bei der Weida um 20 mm überschätzt (Tab. 5.2). Da dies bereits in der Größenordnung des Gesamtabflusses liegt, wirkt sich die Überschätzung der Verdunstung sehr stark auf die Ganglinie aus. In den anderen Gebieten wird die KWB mit den WETTREG2010-Ergebnissen im Mittel hingegen eher überstatt unterschätzt, so dass in der Rossel die Abflüsse mit den WETTREG2010-Ergebnissen etwas unterschätzt werden. In den anderen Gebieten ist dieser Effekt nur gering ausgeprägt. Hier wird das Niveau des Kalibrierungslaufs vom Median der auf WETTREG2010-Ergebnissen basierenden Simulationen recht gut abgebildet.

Auffällig ist, dass die Bandbreite des Jahresgangs in der Aller und in der Biese im Winter deutlich größer ist als für den Rest des Jahres, wohingegen die Bandbreite in der Rossel und in der Weida das ganze Jahr über relativ gleich groß ausfällt (Abb. 5.1).

Table 5.1: Vergleich der Klimatischen Wasserbilanz für den Referenzzeitraum des Kalibrierungslaufs und den aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Werten (Mittelwert über alle 10 Realisierungen)

KWB	Biese	Rossel	Holtemme	Aller	Weida
Kalibrierungslauf [mm/a]	-74	-51	28	-27	-60
WETTREG [mm/a]	-49	-19	50	4	-74
Differenz [mm/a]	25	32	22	31	-14

Table 5.2: Vergleich der potenziellen Verdunstung für den Referenzzeitraum des Kalibrierungslaufs und den aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Werten (Mittelwert über alle 10 Realisierungen)

Potenzielle Verdunstung	Biese	Rossel	Holtemme	Aller	Weida
Kalibrierungslauf [mm/a]	624	668	643	628	610
WETTREG [mm/a]	612	659	649	610	630
Differenz [mm/a]	-12	-9	6	-18	20

Die Abbildung 5.2 veranschaulicht, dass sich für die mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflüsse eine große Bandbreite ergibt, wenn alle 10 Realisierungen als gleich wahrscheinlich betrachtet werden. An dieser Stelle wird am Beispiel der Biese für den Pegel Dobbrun gezeigt, dass im Mittel etwa 3 m³/s Unterschied zwischen dem Minimum und dem Maximum der Realisierungen liegen.

Diese Unsicherheiten bei den mittleren Abflüssen verschärfen sich insbesondere bei der Betrachtung der Niedrigwasserstatistik. Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft anhand der Biese die Minima, Maxima und Mittelwerte über alle Realisierungen für die jeweiligen Zeitperioden. Dabei zeichnen sich Abweichungen um bis zu 100 % zwischen den Minimum- und den Maximumwerten ab. Bei der Unterschreitungsdauer ergibt sich für den Zeitraum 2011–2040 sogar ein Unterschied von 46 Tagen.

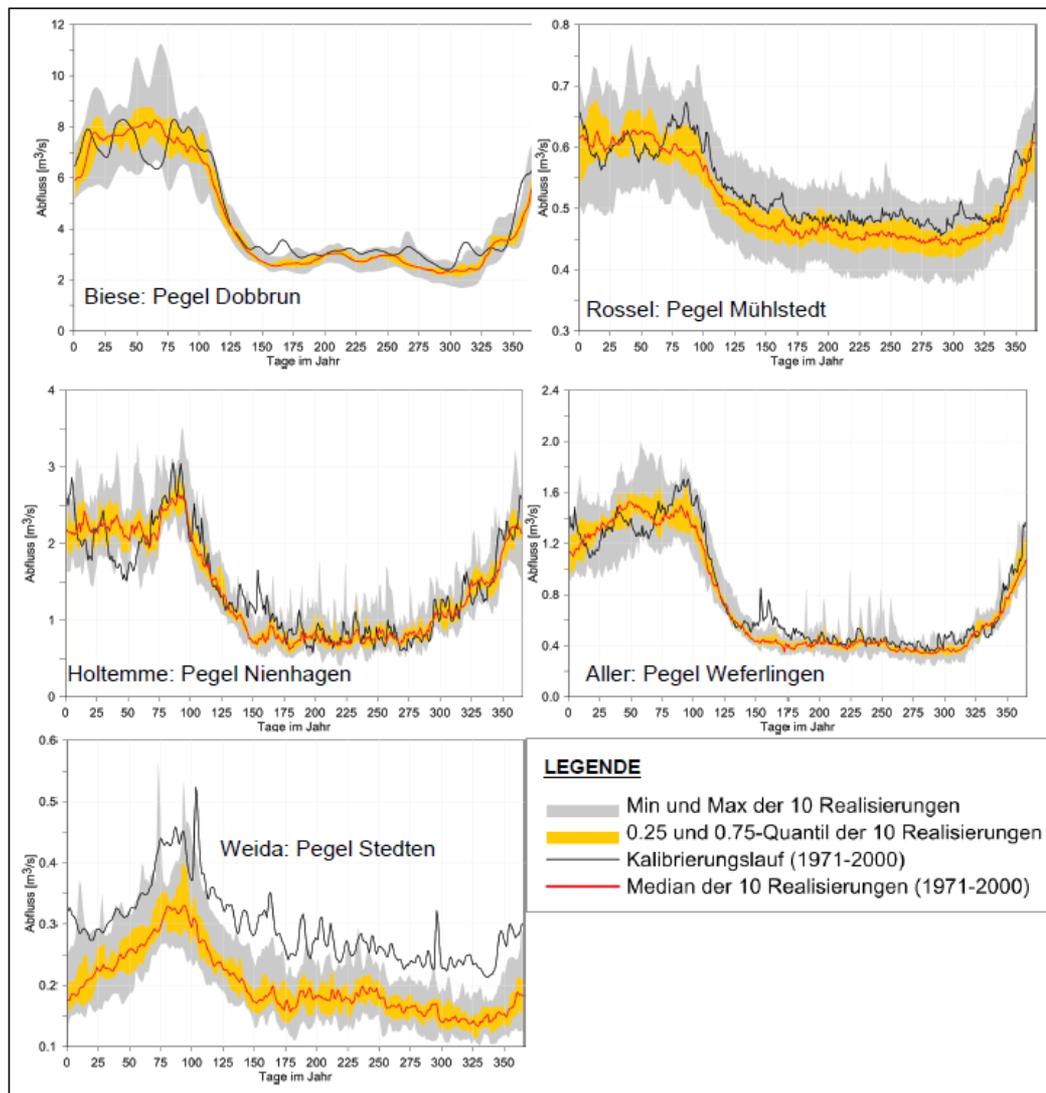


Abbildung 5.1: Innerjährlicher Gang der aus Beobachtungen simulierten („Kalibrierungslauf“) und der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflüsse (1971-2000)

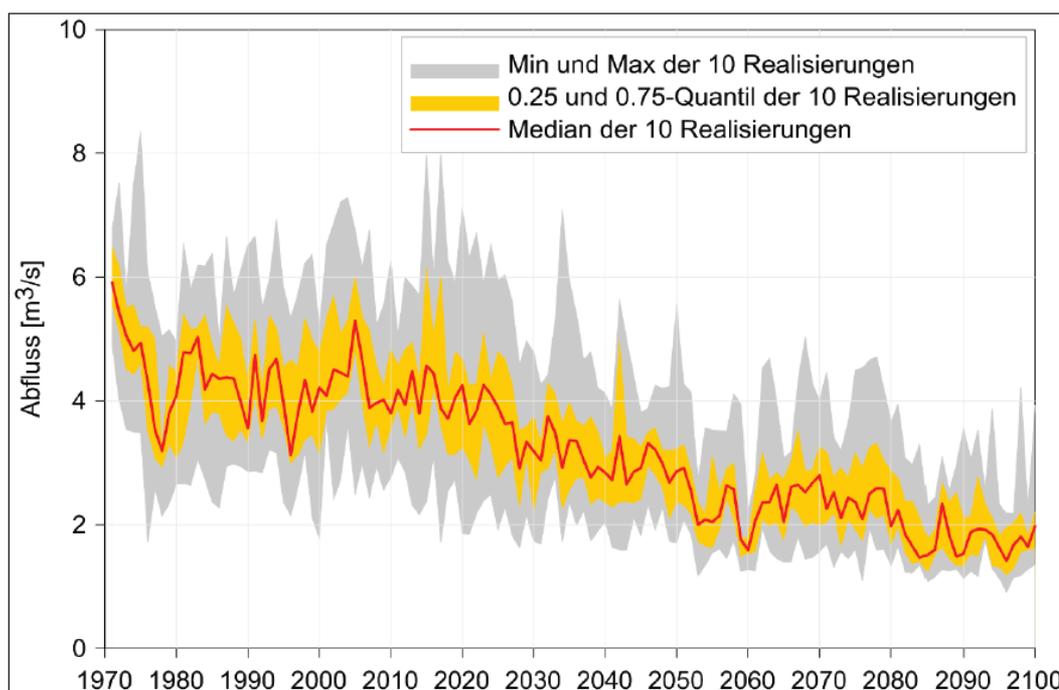


Abbildung 5.2: Mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflüsse für die Biese am Pegel Dobbrun (1971–2100)

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der für die Biese (Pegel Dobbrun) mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Minimum, Mittelwert und Maximum aller 10 Realisierungen)

	10%-Perzentil der Abflussdauerlinie			NM7Q			maxD		
	Min	Mit	Max	Min	Mit	Max	Min	Mit	Max
	[m ³ /s]			[m ³ /s]			[Tage]		
1971–2000	1,5	1,8	2,2	2,4	2,8	3,2	9	14	21
2011–2040	1,2	1,5	1,8	1,7	2,3	3,1	11	34	57
2041–2070	0,85	1,0	1,1	1,1	1,5	2,0	52	76	112
2071–2100	0,72	0,81	0,91	1,1	1,2	1,5	73	109	176

5.2 Hydrologische Modellierung

Neben der zu erwartenden Klimaänderung müssten bei den Zukunftssimulationen eigentlich auch Veränderungen in der Landnutzung berücksichtigt werden (KLÖCKING. et al., 2003). Aus methodischen Überlegungen wurde die Landnutzung jedoch konstant gehalten, um die Änderungen in den Ergebnissen allein auf den klimatischen Wandel zurückführen zu können. Die Simulationen wurden auf der Basis der derzeit typischen Fruchtfolgen (Acker) und Bestandszusammensetzungen (Forst) Sachsen-Anhalts durchgeführt. Nach Abschluss der Arbeiten von Los 2 (Landwirtschaft) und Los 3 (Forstwirtschaft) könnten in einem Nachfolgeprojekt die dort erarbeiteten Anpassungsstrategien bezüglich ackerbaulicher Fruchtfolgen und forstlicher Bestandszusammensetzung auch bei den hydrologischen Untersuchungen berücksichtigt werden.

Bei der Vegetationsmodellierung wurde in Absprache mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe die heutige Anbausituation auf den landwirtschaftlichen Flächen in die Zukunft übertragen. Dabei erfolgte eine Konzentration auf die derzeit hauptsächlich angebauten Fruchtarten. Zwischenfrüchte wurden generell vernachlässigt.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch angepasste neue Sorten, ein verändertes Anbauschema (Saat-, Erntetermine, Zwischenfrüchte) und andere Fruchtarten auf die veränderte Klimasituation reagiert wird. Das konnte jedoch bei der Simulation nicht erfasst werden. Dementsprechend besteht eine große Unsicherheit hinsichtlich der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, wenn das Management landwirtschaftlicher Flächen an veränderte klimatische Bedingungen angepasst wird.

Im Ergebnis der Modellanpassung muss auf folgende weitere Quellen der Unsicherheit hingewiesen werden:

- 1) Die verwendeten Klimadaten beinhalten nur Tageswerte des Niederschlages. Diese geringe zeitliche Auflösung ist nicht geeignet, die Hochwassergenese über den sogenannten Horton-Abfluss (Infiltrationsüberschuss) abzubilden, weil die Tagessummen keine Rückschlüsse auf die innertäglichen Spitzenintensitäten erlauben. Somit ist es nicht möglich für Einzugsgebiete, in denen Starkregenereignisse die maßgebenden Hochwässer auslösen, die Hochwassergenese prozessadäquat zu simulieren. Dies sind vor allem Gebiete mit Einzugsgebietsflächen von unter 300 km².
Im Ergebnis ist mit einer Unterschätzung der Hochwasserabflüsse in den kleinen Referenzgebieten (< 300 km²) zu rechnen. Dies betrifft alle Referenzgebiete abgesehen von der Biese. Da die verwendeten Niederschläge keinen Hinweis darauf geben, ob die innertäglichen Spitzenintensitäten zunehmen werden, können für die kleinen Referenzgebiete auch keine Aussagen zur künftigen Entwicklung der Hochwasserabflüsse abgeleitet werden.
- 2) Das verwendete, für die landesweite Nutzung konzipierte Modell ArcEGMO-ST bildet die Grundwasserzone mit konzeptionellen Ansätzen ab. Unsicher werden dabei die Wechselwirkungen zwischen Oberflächen-

und Grundwasser erfasst. Dies führt in Tieflandgebieten mit dominanten Anteilen grundwassernaher Flächen zu einer Überschätzung der Grundwasserzehrung, weil das Absinken der Grundwasserstände und die damit verbundene Dämpfung dieser Zehrung prozessadäquat nur über gekoppelte Oberflächen-Grundwassermodelle erfasst werden kann. Im Ergebnis ist mit einer Unterschätzung der Niedrigwasserabflüsse in Tieflandeinzugsgebieten zu rechnen.

- 3) Die dem Modell ArcEGMO-ST zu Grunde liegende Datenbasis beinhaltet die auf Landesebene verfügbaren, räumlich und inhaltlich fundiertesten Daten. Dadurch werden Unsicherheiten in den Modellaussagen gemindert, die sich aus den Datenunsicherheiten ergeben. Dennoch bleibt eine Restunsicherheit hinsichtlich der Eingangsdaten bestehen, wie etwa bei den Bodeneigenschaften, den ober- und insbesondere unterirdischen Einzugsgebietsgrenzen (insbesondere bei kleinen Gebieten) oder der Landnutzung.

In der hydrologischen Modellierung ist davon auszugehen, dass die Modellsicherheit mit der Größe des Modellgebiets ansteigt. Zwar wurden in diesem Projekt überwiegend kleine Gebiete von weniger als 300 km² modelliert, aber da die Auswirkungen des Klimawandels über Änderungen gegenüber einem Referenzzustand charakterisiert werden, heben sich die Modellunsicherheiten (Parameterfehler und Unschärfe in der Prozessbeschreibung) wieder auf. Aus diesem Grund spielt die Gebietsgröße bei der Ermittlung der Folgen von Klimaänderungen nicht die Rolle, wie es für die Simulation realer Zeiträume der Fall wäre.

6 Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Untersuchung baut auf der Nutzung des im Auftrag des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft für Sachsen-Anhalt durch das BAH erstellte ökohydrologische Modell ArcEGMO-ST auf, das den Wasserhaushalt und das hydrologische Regime der Gewässer in Sachsen-Anhalt räumlich hochauflösend abbildet. Ziel war, regionale, möglichst lokal differenzierbare Aussagen zum quasi-natürlichen Wasserdargebot und seiner klimabedingten Veränderungen zu treffen. Die Modelluntersuchung erfolgte räumlich und inhaltlich genestet: Zunächst wurde eine detaillierte Bodenwasserhaushalts- und Vegetationsmodellierung für repräsentative Standorttypen durchgeführt. Im zweiten Teil wurden Abflusssimulationen und Extremwertstatistiken für Einzugsgebiete durchgeführt, die typische Landschaftsräume in Sachsen-Anhalt repräsentieren. Die Wasserhaushaltssimulation erfolgte auf der Basis des Emissions-Szenarios A1B des IPCC-Sonderberichtes über Emissions-Szenarien (SRES, NAKIĆENović et al., 2000), das mit dem Globalen Klimamodell ECHAM5/MPI-OM berechnet wurde. Aus diesem erfolgte dann mit WETTREG2010 eine Regionalisierung auf die lokale Skala, wobei insgesamt 10 Realisierungen produziert wurden.

Im Vordergrund der Ergebnisauswertungen standen Analysen zu den Änderungen in den drei zukünftigen Zeiträumen gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000. Zusammenfassend ergeben sich folgende Ergebnisse:

Klimafolgen für den Bodenwasserhaushalt der LVG

- Die Klimatische Wasserbilanz als Kennwert der hydrometeorologischen Situation eines Gebietes ist schon in der Referenzperiode in Sachsen-Anhalt fast flächendeckend deutlich negativ. Unter Szenariobedingungen verschärft sich die Situation weiter, so dass für die Periode 2071–2100 für alle Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete bis auf den Unter- und Mittelharz (LVG 25) die simulierten Werte der KWB im Bereich –200 bis –400 mm/a liegen. Als besonders kritisch wird die hydrometeorologische Situation im Nördlichen Harzvorland/Harzrandmulde (LVG 21) simuliert. Hier sind wie im LVG 25 die Veränderungen im Vergleich zum Referenzzustand am größten.
- Entsprechend der hydrometeorologischen Bedingungen werden schon in der Referenzperiode für alle Standortkombinationen recht geringe Sickerwasserspenden simuliert. Die höchsten Werte ergeben sich für die Mittelgebirgsregionen mit den im Landesdurchschnitt vergleichbar hohen

Niederschlägen und für die durchlässigen Böden (Braunerden, Lessivés, Podsole). Hier zeigen sich auch die stärksten Veränderungen hinsichtlich Menge und Dauer der jährlichen Sickerwasserspenden. In der Schwarzerdere-region wird für die hier dominierenden ackerbaulich genutzten Tscherno-seme schon gegenwärtig nur eine geringe Grundwasserneubildung simuliert, die unter Szenariobedingungen zum Erliegen kommt. Die grundwasserbeeinflussten Gleye und Auenböden wirken bereits in der Referenzperiode zumeist als Zehrstandorte. Unter der Annahme, dass die Grundwasserhältnisse vergleichbar bleiben, kommt es in Zukunft auf diesen Standorten zu einem kontinuierlich starken Anstieg der Grundwasserzehrung.

- Schon heute besteht auf vielen grundwasserfernen Standorten Sachsen-Anhalts ein Dürrierisiko. Besonders auf den Schwarzerdeböden liegt entsprechend des Referenzzeitraums an mehr als 100 Tagen pro Jahr die Bodenfeuchte im Hauptwurzelraum unter 30 % der nutzbaren Feldkapazität. Bis 2100 wird sich die Situation drastisch verschärfen. Besonders auf den untersuchten Ackerstandorten im nördlichen Harzvorland/Harzrandmulde sind die Böden quasi ganzjährig trocken.
- Eine zu hohe Bodenfeuchte ist heute besonders auf den grundwasserbeeinflussten Standorten ein Problem. Da bei den Szenariountersuchungen die derzeitigen Grundwasserflurabstände ohne Veränderung auch für die Zukunft angenommen wurden, konnte keine wesentliche Verbesserung dieser Situation unter den Bedingungen des WETTREG2010-Szenarios festgestellt werden. Hier sind weitere Untersuchungen bei angemessener Berücksichtigung der zu erwartenden Veränderungen der Grundwasserstände durch die landesweit absinkenden Sickerwasserspenden erforderlich. Als belastbarste Lösung wird hierzu eine gekoppelte GW-NA-Modellierung in ausgewiesenen Problemgebieten empfohlen.
- Aufgrund der Bracheperioden bei Ackernutzung ist die zukünftige Bodenwasserhaushaltssituation auf ackerbaulich genutzten Standorten etwas besser als unter anderen Nutzungsbedingungen. Hier kann außerdem durch eine angepasste Fruchtfolge auf die veränderten Rahmenbedingungen reagiert werden.
Kritisch wird die Lage bei den Forststandorten bewertet. Die Simulationsergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit die derzeit laufenden Bemühungen eines klimaangepassten Umbaus besonders von nicht standortangepassten dichten Nadelreinbeständen.

Klimafolgen für den Wasserhaushalt der Landschaftsräume

- **Aus meteorologischer Sicht sind die meisten Landschaftsräume in Sachsen-Anhalt bereits heute von einem Feuchtedefizit betroffen.**

-
- Werden die gemessenen Klimadaten zugrunde gelegt, liegt in den Referenzgebieten bereits für den Zeitraum 1971–2000 eine negative Klimatische Wasserbilanz vor. Dies gilt insbesondere für den Landschaftsraum Altmark und Drömling sowie für die Schwarzerderegion im Regenschatten des Harzes. Eine Ausnahme bildet lediglich der Harz mit dem nördlichen Harzvorland, wo im Vergleich am meisten Niederschlag fällt und eine positive Klimatische Wasserbilanz vorliegt.
 - **In der Zukunft wird sich die meteorologische Situation verschärfen, indem es insgesamt trockener wird.**
 - Gemäß den verwendeten Klimaprojektionen werden die mittleren Niederschlagssummen künftig kontinuierlich zurückgehen - um bis zu 10% für den Zeitraum 2071–2100. Zusätzlich steht aufgrund der Erwärmung und der erhöhten Sonnenscheindauer mehr Energie für die Verdunstung zur Verfügung, was insgesamt trockenere Verhältnisse mit sich bringt.
 - **Der mittlere Abfluss wird in allen betrachteten Landschaftsräumen kontinuierlich zurückgehen.**
 - Die Änderungen des Klimas haben einen kontinuierlichen Rückgang des mittleren Abflusses zur Folge. Die Auswirkungen sind in den Gebieten am gravierendsten, für die bereits in der Vergangenheit (1971-2000) ein starkes Feuchtedefizit vorlag. Dies betrifft insbesondere die Schwarzerderegion im Regenschatten des Harzes. Etwas weniger wirkt sich der Klimawandel auf die Harzregion aus, wobei jedoch auch hier mit einem Rückgang der mittleren Abflüsse um bis zu 35% bis zum Zeitraum 2071-2100 zu rechnen ist.
 - **Die seltenen Hochwasser werden in naher Zukunft (2011-2040) im Harz und in der Schwarzerderegion deutlich ansteigen, während in den anderen Regionen keine signifikanten Änderungen gegenüber den derzeitigen Verhältnissen zu verzeichnen sind. In der entfernten Zukunft zeigte sich für alle Regionen eine Abnahme der seltenen Hochwasser.**
 - In der Harzregion und in der Schwarzerderegion ist für den ersten Zukunftszeitraum 2011–2040 ein Anstieg der hundertjährigen Hochwasser zu verzeichnen. In diesen im Mittel feuchteren Landschaftsräumen führt der hochwasserauslösende Starkniederschlag schneller zur Abflussbildung als in den Gebieten, in denen der Niederschlag zunächst zur Gebietsaufwechtung beiträgt.
 - Die hundertjährigen Hochwasser werden in allen Gebieten spätestens ab dem Zeitraum 2041–2070 gedämpft. Die zunehmende Trockenheit erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass ein erster Anteil des hochwasserauslösenden Starkniederschlags zunächst zur Gebietsaufwechtung beiträgt, bevor es zur Abflussbildung kommt. Zusätzlich

führt die Erwärmung dazu, dass die Schneeschmelze geringer ausfällt, die insbesondere im Harz maßgeblich zu Extremabflüssen beiträgt.

- **Die Niedrigwasserkennwerte weisen auf eine teilweise starke Verlängerung der Trockenperioden hin.**
 - Die insgesamt trockenen Verhältnisse zeichnen sich auch in den Niedrigwasserkennwerten ab, die auf eine Verlängerung der Trockenperioden hinweisen. Hier ist die Entwicklung für die Weida im Regenschatten des Harzes am gravierendsten, wo für die entfernte Zukunft 2071-2100 ein temporäres Trockenfallen des Flusses angezeigt wird.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG BODENKUNDE, 1995: Bodenkundliche Kartieranleitung – Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- AD-HOC-AG BODENKUNDE, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung – Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- ATV-DVWK, 1983: DVWK-Regel 120/1983. Niedrigwasseranalyse. Teil I: Statistische Untersuchung des Niedrigwasser-Abflusses. Bericht.
- ATV-DVWK, 1992: DVWK-Regel 121/1992. Niedrigwasseranalyse. Teil II: Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflußdefizits. Bericht.
- ATV-DVWK, 2002: Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Bericht M-504, Deutsche Vereinigung für Abfallwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Druckpartner Moser Theinbach, Hennef. ISBN: 3-936514-03-8.
- BAH, 2006: Modellgestützte Regionalisierung der mittleren Abflussspenden der Zeitreihe 1971 bis 2002 für das Land Sachsen-Anhalt, im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt (unveröffentlicht). Bericht.
- BAH, 2007: Modellgestützte Ermittlung von Abflusskomponenten für Wasserkörper des Landes Sachsen-Anhalt, im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt (unveröffentlicht). Bericht.
- BECKER, A., B. KLÖCKING, W. LAHMER, B. PFÜTZNER, 2002: Mathematical Models of Large Watershed Hydrology, Kapitel The Hydrological Modelling System ArcEGMO, 321–384. Water Resources Publications, Littleton-Colorado.
- BECKER, A., T. SOMMER, B. PFÜTZNER, 2005: Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet, Kapitel Das Unstrutgebiet - Modellierungen des Wasser- und Stoffhaushalts unter dem Einfluss des Globalen Wandels, 198–207. Weißensee Verlag.
- BIEGEL, M., 2006: Hydrologische Modellierung urbaner Nährstoffeinträge in Gewässer auf Flussgebietsebene Ph.D. thesis, TU Dresden.
- BOSWELL, V., 1926: The influence of temperature upon the growth and yield of garden peas. – Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. **23**, 162–168.
- DYCK, S., G. PESCHKE, 1983: Grundlagen der Hydrologie – Berlin: VEB. Verlag für Bauwesen.

- KLÖCKING., B., B. STRÖBL, S. KNOBLAUCH, U. MAIER, B. PFÜTZNER, A. GERICKE, 2003: Development and allocation of land use scenarios in agriculture for hydrological impact studies. – *Physics and Chemistry of the Earth* **28**, 1311–1321.
- KREIENKAMP, F., A. SPEKAT, W. ENKE, 2010: Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Bericht, Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- KROPP, J., O. ROITHMEIER, F. HATTERMANN, C. RACHIMOW, A. LÜTTGER, F. WECHSUNG, P. LASCH, E. CHRISTIANSEN, C. REYER, F. SUCKOW, M. GUTSCH, A. HOLSTEN, T. KARTSCHALL, M. WODINSKI, Y. HAUF, T. CONRADT, H. ÖSTERLE, C. WALTHER, T. LISSNER, N. LUX, V. TEKKE, S. RITCHIE, J. KOSSAK, M. KLAUS, L. C. L., T. VETTER, M. KLOSE, 2009: Klimawandel in Sachsen-Anhalt–Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Bericht, Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK).
- LASCH, P., F.-W. BADECK, F. SUCKOW, M. LINDNER, P. MOHR, 2005: Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). – *Forest Ecology and Management* **207(1-2)**, 59–74.
- MEYNEN, E., J. SCHMITHÜSEN, 1953-1962: Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands – Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen, 1339 S.
- NAKIĆENOVIĆ, N., J. ALCAMO, DE B. VRIES, J. FENHANN, S. GAFFIN, K. GREGORY, A. GRÜBLER, T. JUNG, T. KRAM, E. L. ROVERE, L. MICHAELIS, S. MORI, T. MORITA, W. PEPPER, H. PITCHER, L. PRICE, K. RAIHI, A. ROEHL, H.-H. ROGNER, A. SANDOVSKI, M. SCHLESINGER, P. SHUKLA, S. SMITH, R. SWART, S. VAN ROOIJEN, N. VICTOR, Z. DADI, 2000: Emissions Scenarios; A Special Reports of IPCC Working Group III – Cambridge University Press; Cambridge, UK., 570.
- NASH, J., J. SUTCLIFFE, 1979: River Flow Forecasting through Conceptual Models - Part I: A Discussion of Principles. – *J. Hydrol.* **10**, 282–290.
- NEITSCH, S., J. ARNOLD, J. KINIRY, J. WILLIAMS, 2005: Soil and water assessment tool – Theoretical documentation Version 2005. USDA Agricultural Research Service at the Grassland, Soil and Water Research Laboratory in Temple, Texas, USA, Section 5 and 6. Bericht.
- PFÜTZNER, B., 2002: Modelldokumentation ArcEGMO. Online 2002. ISBN 3-00-011190-5. Bericht.
- ROSEMANN, H., J. VEDRAL, 1971: Das Kalinin-Miljukov-Verfahren zur Berechnung des Ablaufs von Hochwasserwellen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, München, H. 6. Bericht.

- ROSSBERG, D., V. MICHEL, R. GRAF, R. NEUKAMPF, 2007: Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. – Nachrichtenblatt Deut. Pflanzenschutzdienst **59(7)**, 155–161.
- SCHRÖDER, H., 1997: Oelke, E. [Hrsg.]: Sachsen-Anhalt. Perthes Länderprofile. Gotha. 423 S., Kapitel Die natürliche Umwelt Sachsen-Anhalts, 33–95.
- SCHWARZE, R., 2009: Parametrisierung des SLOWCOMP - Modells für das Land Sachsen-Anhalt zur Darstellung unterschiedlich schneller Grundwasserabflusskomponenten im integrierten Konzeptmodell zum Nährstoffmanagement, im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (unveröffentlicht). Bericht.
- SCHWARZE, R., U. STODOLNY, C. SCHMIDT, 2004: Untersuchungen des Weg-Zeit-Verhaltens salinärer Einträge in die Unstrut mit isopenhydrologischen Methoden. Teilprojekt 3 innerhalb des Verbundvorhabens „Erstellung eines Management-Tools zur Wasserbewirtschaftung unter den Bedingungen bergbaubedingter salinärer Einträge im Einzugsgebiet der Unstrut“. BMBF Förderprogramm „Forschung für die Umwelt“ Thema „Flussgebietsmanagement“. Abschlussbericht. Bericht.
- WILLIAMS, J., C. JONES, J. KINIRY, D. SPANEL, 1989: The EPIC crop growth model. – Transactions of the ASAE **32**, 497–511.

Teil II
Anhänge

A Datenquellen und verwendete Unterlagen

Tabelle A.1: Auflistung der Datenquellen und verwendeten Unterlagen

Zitat im Text	Quelle
ArcEGMO-ST	Wasserhaushalts- und Niederschlags-Abfluss-Modell für Sachsen-Anhalt; Erläuterungen und verwendete Datenquellen in BAH 2006 und 2007
BAH 2006	Projektbericht „Modellgestützte Regionalisierung der mittleren Abflusspenden der Zeitreihe 1971 bis 2002 für das Land Sachsen-Anhalt“ im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt
BAH 2007	Projektbericht „Modellgestützte Ermittlung von Abflusskomponenten für Wasserkörper des Landes Sachsen-Anhalt“ im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt
Drainagekarte 2011	Shape „Pot.Entwässerung_LSA_2011“ und Erläuterungen in „Überprüfung und Validierung der Dränflächen Sachsen-Anhalts“; Projektbericht MISB (Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und Bodenschutz) im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt
Grundwasserflurabstandskarte 2011	Shape „V_GWL1.shp“ und Erläuterungen in „Ausweisung vernässungsgefährdeter Bereiche in Sachsen-Anhalt“; Projektbericht FUGRO im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt

B Ergänzende Tabellen – Bodenwasserhaushalt und Vegetation

Tabelle B.1: Tabellenanhang 1

LVG	BENENNUNG	Fläche [km ²]	Fl.-Anteil Acker [%]	Höhe [m ü.NN]	Gefälle [%]	Hang- ausr. [°]	Frucht- folge	B 1	Bodentyp 1	B 2	Bodentyp 2	B 3	Bodentyp 3
1	Westl. Altmarkpl.- Klötzer Heide	1209,3	46,4	52,6	1,1	172,7	1	1899	BBp-PP: p-(v)s/fg-(v)s	1974	BB-LF: p-ls/g-(v)el		
2	Mittlere Altmarkplatten	1281,1	47,3	38,75	0,6	182,8	2	2000	SS-BB: p-ls/g-(v)el	1974	BB-LF: p-ls/g-(v)el		
3	Östliche Altmark	623,9	60,8	39,14	0,5	176,7	3	2000	SS-BB: p-ls/g-(v)el	1974	BB-LF: p-ls/g-(v)el		
4	Nrdl. Elbaue mit Havelniederung	661,6	45,6	23,86	0,2	175,9	4	1839	GG-SS: fo-l/fo-t	1863	GG-AB: fo-l		
5	Kyritzter Pl. u. Schollener Land	196,4	23,2	33,58	0,8	167,9	5	3445	GG-BB: f-ls/f-s	2125	BB: p-s/fg-s		
6	Drömling	612,7	49,5	63,02	0,4	168	6	3261	GG: f-ls/f-s	3271	GG: f-s		
7	sandbestandene Heiden der südl. Altmark	626,6	25,8	60,73	0,9	174	7	1898	BBp-PP: p-(v)s/fg-s				
8	Elbtalniederung	922,8	37,9	36,9	0,4	171,4	8	1856	GG-AB: fo-ls/f-s	1839	GG-SS: fo-l/fo-t		
9	Mittlere Elbaue	379,5	45,4	52,08	0,3	179,9	9	2365	AB: fo-el	3271	GG: f-s		
10	Stüdliche Elbaue	538,9	52,2	70,95	0,3	167,1	10	1861	GG-AB: fo-l/f-s	1863	GG-AB: fo-l		
11	Muldeane	224,6	23,1	73,94	0,5	175,3	11	1863	GG-AB: fo-l	1861	GG-AB: fo-l/f-s		
12	Zerbstler Land	671,2	64,6	72,81	0,5	198,1	12	2001	SS-BB: p-ls/g-(v)l	1960	BBp-PP: p-s/fg-(v)s		
13	Nördlicher Vorflämung	471	33,3	64,06	0,8	181,6	13	2401	BB: p-(v)ls	2125	BB: p-s/fg-s		
14	Südlicher Vorflämung-Flämingshochfläche	680,9	36,3	107,03	1	191,3	14	1960	BBp-PP: p-s/fg-(v)s	2947	LF: p-ls/g-(v)el		
15	Dübener Heide	477,1	20	101,89	1,1	182,5	15	3530	BBp-PP: p-s/fg-(v)s	1960	BB: p-ls/fg-s		
16	Südliches Flämingshügelland und Elbe/ Elster-Tiefland	602,5	38,5	79,61	0,4	177,4	16	3271	GG: f-s	1815	BBp-PP: p-s/fg-s		
17	ostbraunschw. Flachland	245,2	43,4	112,83	1,5	162,9	17	2792	SS: p-ls/g-(v)l	3139	BB: c-(v)el		
18	nördl. Lössübergang	126,9	60,8	59,65	0,9	156,3	18	2314	BB-TT: p-u	2468	GG-TT: p-sl//f-(v)s		
19	nördl. Harzvorland-ostbraunschw. Hügell.	395,9	69,6	132,44	1,9	173	19	2201	TT: p-u				
20	Lössebene der nördl. Börde	1352,3	75,6	95,74	1,2	155,3	20	2201	TT: p-u				
21	nördl. Harzvorland-Harzrandmulde	1204,1	63,9	148,74	1,8	153,8	21	2201	TT: p-u	2601	RZ: p-u/c-(v)el		
22	Lössbedeckte wellige Hochflächen der südl. Börde	803,2	73,5	129,37	1,6	133,5	22	2201	TT: p-u	2597	RZ: p-u		
23	Köthener-hallesche Lössebene	842,2	75,3	96,91	1	167	23	2201	TT: p-u				
24	Sandlössgürtel	625,5	62,2	72,22	0,5	159,4	24	2953	LF: p-sl/g-(v)l	2544	BB-TT: p-sl/f-(v)s		
25	Unter- und Mittelharz	802,7	9,1	406,99	3,1	150	25	2650	LF: p-(v)u//c-vl	2406	BB: p-(v)u/c-vl		
26	östl. Harzvorland-Hornburger Sattel	434,8	33,3	271,97	3,6	144,3	26	2235	LF: p-u	2650	LF: p-(v)u//c-vl		
27	Pollebener/Gerbstaedter Lössplateau und Wettiner Hügelland	504	66,4	168,35	2,5	145,8	27	2201	TT: p-u	2597	RZ: p-u		
28	Osthallesches Sandlössplateau	233,5	66	110,57	0,6	194,6	28	3450	TT: p-sl/g-(v)el	2316	BB-TT: p-sl/fg-s		
29	Südharzabdachung mit Helme- und Unstrut- niederung	479,5	56	187,2	2,3	167,2	29	2201	TT: p-u	2424	RZ: p-(v)u/c-vel	2300	GG-AT: fo-eu
30	Saale- und Elsteraue	154,7	38,7	95,7	0,7	193,8	30	3038	AB: fo-eu	3522	BB-TT: p-sl/g-(v)el		
31	Querf. Platte und Hohenmöser Plateau	1018,7	70	156,55	1,5	146,6	31	2201	TT: p-u				
32	Lössbeeinflusste Unt. Unstrutplatten und Schichtstufenl. des Mittl. Saaletales	727,6	58,2	210,75	3	160,8	32	2612	LL: p-u	2601	RZ: p-u/c-(v)el		
33	Südl. Lösshügelland	425,7	59,6	227,97	2,4	164,8	33	2725	SS-BB: p-u				

Tabellenanhang 2

LVG	BENENNUNG	Flächen-Anteil Grünland [%]	Höhe [m ü.NN]	Gefälle [%]	Hang- ausrichtung [°]	B 1	Bodentyp 1	B 2	Bodentyp 2
1	Westliche Altmarkplatten und Klötzer Heide	17,6	39,98	0,6	165,9	1804	HNn: og-Hn	3293	GGh: f-ls
2	Mitlere Altmarkplatten	22,9	41,28	0,6	183,8	1804	HNn: og-Hn	3293	GGh: f-ls
3	Östliche Altmark	18,6	36,33	0,4	165,7	3293	GGh: f-ls		
4	Nördliche Elbaue mit Havelniederung	30,6	24,02	0,3	176,1	1839	GG-SS: fo-l/fo-t	1863	GG-AB: fo-l
5	Kyritzer Platte und Schollener Land	31,7	29,13	0,6	167,4	2118	HNn: og-Hn/fo-t		
6	Drömling	26,7	58,48	0,2	158,3	2994	GM: f-ls/f-s	1803	HNn: og-Hn/f-s
7	sandbestimmte Heiden der südl. Altmark	21,5	69,21	0,4	177,6	2378	BB-PP: p-ls/fg-s	1803	HNn: og-Hn/f-s
8	Elbniederung	22,3	35,93	0,8	165,8	1848	GGh: fo-ls/f-s		
9	Mitlere Elbaue	21,6	51,15	0,4	170,2	1863	GG-AB: fo-l		
10	Südliche Elbaue	24,1	67,89	0,4	169,7	1863	GG-AB: fo-l		
11	Mulde	21,1	71,38	0,7	179,8	1863	GG-AB: fo-l		
12	Zerbster Land	11,7	67,87	0,5	194,2	3283	GGh: f-(v)ls		
13	Nördlicher Vorflämung	22,5	52,99	0,5	165	1804	HNn: og-Hn		
14	Südlicher Vorflämung und Fläminghochfläche	12,3	100,27	1	194,9	1815	BBp-PP: p-s/fg-s	3002	GG: f-ls/f-s
15	Dübener Heide	13,1	88,97	1,1	181,9	2378	BB-PP: p-ls/fg-s	3271	GG: f-s
16	Südliches Fläminghügelland und Elbe/Elster-Tiefland	18,8	77,59	0,5	181,8	3271	GG: f-s	1863	GG-AB: fo-l
17	ostbraunsch. Flachland	16,2	108,24	1,8	169,5	2388	GG-AB: fo-el	2344	GGh: u-l
18	nördl. Lössübergang	17,3	55,7	1,1	162,5	2326	BBp-PP: p-ls/fg-s	2302	GG-AT: fo-l
19	nördl. Harzvorland - ostbraunsch. Hügelland	10	114,78	1,3	169	1804	HNn: og-Hn	2029	GGh: fo-el
20	Löseebene der nördl. Börde	5,7	77,62	1,2	165,6	2201	TT: p-u	2293	GG-AT: fo-el
21	nördl. Harzvorland - Harzrandmulde	8,4	177,15	3,1	158,4	2293	GG-AT: fo-el	3359	HNc: fo-el/og-Hn
22	Lössbedeckte wellige Hochflächen der südl. Börde	7	134,91	2,9	171,6	2201	TT: p-u	2293	GG-AT: fo-el
23	Köthener-hallesche Lössebene	10,2	94,73	2,1	180,4	3228	GG-AB: fo-el/fo-et		
24	Sandlössgürtel	11,2	68,6	0,6	164,1	2365	AB: fo-el		
25	Unter- und Mittelharz	18,8	467,28	4,9	162	2406	BB: p-(v)u/c-vl		
26	östl. Harzvorland und Hornburger Sattel	14,4	280,95	6,6	167,6	2406	BB: p-(v)u/c-vl	2646	GGh: fo-u/f-vl
27	Pollebener/Gerbstaedter Lössplateau und Wettiner Hügelland	10,1	139,36	5	163,6	2601	RZ: p-u/c-(v)el	3015	GG-TT: u-eu
28	Osthalleisches Sandlössplateau	7,3	97,85	1	181,5	3038	AB: fo-eu		
29	Südharzabdachung mit Helme- und Unstrumniederung	12,9	210,52	5,1	170,7	2424	RZ: p-(v)u/c-vel		
30	Saale- und Elsteraue	23,5	87,73	0,6	184,3	3038	AB: fo-eu		
31	Querfurter Platte und Hohenmölsener Plateau	8	132,75	2,6	171,2	2201	TT: p-u	3038	AB: fo-eu
32	Lössbeeinflusste Untere Unstruuplatten und Schichtstufenland des Mittleren Saaletales	10,5	174,47	4,7	177,8	2580	RR: c-vel	3038	AB: fo-eu
33	Südl. Lösshügelland	15,3	207,25	3,6	180,9	2767	SS: p-u/c-et	3038	AB: fo-eu

Tabelle B.3: Tabellenanhang 3

LVG	BENENNUNG	Flächen-Ant. Forst [%]	Höhe [m ü.NN]	Gefälle [%]	Hang- ausr. [°]	Wuchs- gebiet	B 1	Bodentyp 1	B 2	Bodentyp 2	B 3	Bodentyp 3
1	Westliche Altmarkplatten und Klötzer Heide	30,7	68,28	1,7	180	11	21899	BBp-PP: p-(v)s/fg-(v)s	21963	BB: p-(v)ls/fg-(v)s		
2	Mittlere Altmarkplatten	25	46,59	1,3	178,8	11	21899	BBp-PP: p-(v)s/fg-(v)s	21881	PP: a-s		
3	Östliche Altmark	12,7	45,28	0,8	173,1	22	21899	BBp-PP: p-(v)s/fg-(v)s	21974	BB-LF: p-ls/g-(v)el		
4	Nördliche Elbaue mit Havelniederung	17,1	31,9	0,9	186,6	11	21877	PP-BB: p-s/fg-s	21800	RQ: a-s		
5	Kyritzer Platte und Schollener Land	37,4	37,5	1,4	167,6	24	21877	PP-BB: p-s/fg-s				
6	Drömling	19,2	69,84	1	172,5	11	21899	BBp-PP: p-(v)s/fg-(v)s				
7	sandbestimmte Heiden der südl. Altmark	45,3	73,54	1,3	175,9	22	22378	BB-PP: p-ls/fg-s	22133	BB-PP: p-s/fg-s		
8	Elbainiederung	32,1	38,56	0,8	175,3	22	22102	PP-BB: p-(v)s/fg-s				
9	Mittlere Elbaue	19,5	53,86	0,7	175,8	22	21863	GG-AB: fo-l				
10	Südliche Elbaue	14,6	72,76	1	175	22	21877	PP-BB: p-s/fg-s	21863	GG-AB: fo-l		
11	Muldeane	28,8	79,89	0,9	183,7	22	21877	PP-BB: p-s/fg-s	21959	BBp-PP: p-ls/fg-(v)s		
12	Zerbster Land	18	75,79	0,8	185,1	22	21877	PP-BB: p-s/fg-s				
13	Nördlicher Vorfäming	38,2	62,43	1,1	183,1	22	21877	PP-BB: p-s/fg-s				
14	Südlicher Vorfäming und Fläminghochfläche	47,6	114,51	1,4	191,2	23	22121	BB: p-(v)s/fg-s	22378	BB-PP: p-ls/fg-s		
15	Dübener Heide	57,1	114,43	2	178,8	22	21877	PP-BB: p-s/fg-s	23271	GG: f-s		
16	Südliches Fläminghügelland und Elbe-/Elster-Tiefland	33,4	82,05	0,8	183,1	22	23271	GG: f-s	21877	PP-BB: p-s/fg-s		
17	ostbraunsch. Flachland	34,6	123,32	2,2	157,9	19	22102	PP-BB: p-(v)s/fg-s	21996	SS-BB: p-(v)ls/g-(v)l		
18	nördl. Lössübergang	11	64,6	1,5	176,3	22	22326	BBp-PP: p-ls/fg-s				
19	nördl. Harzvorland - ostbrnsw. Hügelland	13,6	164,51	2,7	175,4	19	23470	BB: p-sl/pfl-(v)t				
20	Lössebene der nördl. Börde	3,9	91,71	1,8	162,1	21	22201	TT: p-u	22326	BBp-PP: p-ls/fg-s		
21	nördl. Harzvorland - Harzrandmulde	19,6	353,24	9,6	161,4	19	22409	BB: p-vu/c-vl	23576	BB-PP: p-(v)sl/n-v		
22	Lössbed. wellige Hochfl. der südl. Börde	10,5	232,55	6,9	161,3	20	23592	BB-LF: p-(v)u/c-vl	22406	LF: p-u		
23	Köthener-hallesche Lössebene	2,9	99,23	3,9	177,7	21	22365	AB: fo-el				
24	Sandlössgürtel	11,4	76,08	0,7	166,1	22	21877	PP-BB: p-s/fg-s				
25	Unter- und Mittelharz	66,5	470,36	8,1	164,3	36	23592	BB-LF: p-(v)u/c-vl	23569	BB-PP: p-(v)sl/n-v		
26	östl. Harzvorland und Hornburger Sattel	46,4	319,22	9	177	36	23567	BB: p-vu/pfl-vl	23574	BB-PP: p-vu/n-v		
27	Pollebener/Gerbstaedter Lössplateau und Wettiner Hügelland	8,5	156,72	7,7	175,6	20	23568	BB: p-vu/n-v	22601	RZ: p-u/c-(v)el		
28	Osthallesches Sandlössplateau	3,5	97,77	1,6	183,9	21	23038	AB: fo-eu				
29	Südharzabdachung mit Helme- und Unstrutniederung	21,8	293,58	9,9	189,7	35	23567	BB: p-vu/pfl-vl	22826	RZ: p-(v)u/c-vel		
30	Saale- und Elsteraue	9,9	90,36	0,9	193,1	21	23038	AB: fo-eu				
31	Querfurter Platte und Hohenmölsener Plateau	5,5	154,78	4,6	171	21	22584	LL: p-u				
32	Lössbeeinflusste Untere Unstrutplatten und Schichtniederung des Mittleren Saaletales	22,3	226,42	7,8	187	35	22703	TT: p-u/g-(v)el	23103	BB: p-(v)sl/n-v	22755	SS-BB: c-(v)l/c-(v)t
33	Südl. Lösshügelland	12	224,26	5,9	186,3	31	22763	SS: p-u				

Tabelle B.4: Tabellenanhang 4

Bodentyp	ID	Horizont	Bodenart	Dicke [mm]	Skel [%]	Dichte [g/cm ³]	PWP —	FK [Vol %]	GPV —	nFK [mm]	kf [mm/d]
'BBp-PP: p-s/fg-s'	1815	Ap	Sl2	200	1	1,4	5,39	23,52	37,2	36,3	1536
	1815	Bsvs	mSfs	200	1	1,56	3,43	18,13	39,7	29,4	6192
	1815	C	mSfs	1600	1	1,6	3,43	18,13	39,7	235,2	6192
'GG-AB: fo-l'	1863	Ap	Ls3	300	1	1,62	18,13	32,83	43,1	44,1	192
	1863	M	Ls2	400	0	1,49	19,5	35	44	62	408
	1863	G	Ls3	1300	0	1,56	19	34	44,5	195	192
'BBp-PP: p-s/fg-(v)s'	1960	Ap	Sl2	200	1	1,4	5,39	23,52	37,2	36,3	1536
	1960	Bsvs	mSfs	200	1	1,56	3,43	18,13	39,7	29,4	6192
	1960	C	mSfs	1600	6	1,6	3,09	16,35	35,8	212,1	6192
'BB:p-s/fg-s'	2125	Ap	Sl2	200	1	1,4	5,39	23,52	37,2	36,3	1536
	2125	Bv	Su2	200	1	1,67	3,43	25,97	43,6	45,1	2664
	2125	C	mSfs	1600	1	1,6	3,43	18,13	39,7	235,2	6192
'TT: p-u'	2201	Ap	Ut4	300	0	1,51	15,5	36	44	61,5	216
	2201	Ah	Ut4	200	0	1,39	15,5	35,5	46	40	216
	2201	C	Ut3	1500	0	1,62	11	35	41,5	360	240
'SS-BB:p-u'	2725	Ap	Ut4	300	0	1,51	15,5	36	44	61,5	216
	2725	Bv	Ut4	200	0	1,48	16	35	41,5	38	216
	2725	Sw	Ut3	200	1	1,57	11,76	34,3	40,7	45,1	240
	2725	Sd	Lu	1300	6	1,48	17,23	31,37	36,2	183,8	312
'SS:p-u/c-et'	2767	Ap	Ut4	300	0	1,51	15,5	36	44	61,5	216
	2767	Sw	Ut3	200	1	1,57	11,76	34,3	40,7	45,1	240
	2767	Sd	Lt3	1500	0	1,4	28	39	43,5	165	192
'GG-AB: fo-l'	21863	L-O	MO	50	0	0,15	10	50	90	20	6000
	21863	Ap	Ls3	300	1	1,62	18,13	32,83	43,1	44,1	192
	21863	M	Ls2	400	0	1,49	19,5	35	44	62	408
	21863	G	Ls3	1300	0	1,56	19	34	44,5	195	192
'PP-BB:p-s/fg-s'	21877	L-O	MO	50	0	0,15	10	50	90	20	6000
	21877	Aehe	Su2	100	1	1,77	3,43	25,97	43,6	22,5	2664
	21877	Bshs	mSfs	100	2	1,4	11,52	29,29	42,3	17,8	6192
	21877	Bv	Su2	200	1	1,67	3,43	25,97	43,6	45,1	2664
	21877	C	mSfs	1600	1	1,6	3,43	18,13	39,7	235,2	6192
'BB:p-(v)s/fg-s'	22121	L-O	MO	50	0	0,15	10	50	90	20	6000
	22121	Ap	Sl2	300	4	1,6	5,07	22,12	35	51,1	1536
	22121	Bv	Su2	200	5	1,63	2,25	18,5	33,8	32,5	2664
	22121	C	mSfs	1500	1	1,6	3,43	18,13	39,7	220,5	6192
'TT: p-u'	22201	L-O	MO	50	0	0,15	10	50	90	20	6000
	22201	Ap	Ut4	300	0	1,51	15,5	36	44	61,5	216
	22201	Ah	Ut4	200	0	1,39	15,5	35,5	46	40	216
	22201	C	Ut3	1500	0	1,62	11	35	41,5	360	240
'SS: p-u'	22763	L-O	MO	50	0	0,15	10	50	90	20	6000
	22763	Ap	Ut4	300	0	1,51	15,5	36	44	61,5	216
	22763	Sw	Ut3	200	1	1,57	11,76	34,3	40,7	45,1	240
	22763	Sd	Lu	1500	6	1,48	17,23	31,37	36,2	212,1	312

C Verzeichnisse der Begriffe, Akronyme,
Abbildungen und Tabellen

Akronyme

a	Jahr
AEN	Aland-Elbe-Niederung
AFK100/150	Bodenfeuchte bis 1 (1,5) m Tiefe (Hauptwurzelraum) im Verhältnis zur Feldkapazität FK [%]
AG	Auftragsgeber
AN	Auftragsnehmer
AnFK100/150	Bodenfeuchte bis 1 (1,5) m Tiefe (Hauptwurzelraum) im Verhältnis zur nutzbaren Feldkapazität nFK [%]
ArcEGMO	GIS-EinzugsGebietsModell (PFÜTZNER, 2002; BECKER et al., 2002)
ArcEGMO-ST	Wasserhaushalts- und Niederschlags-Abfluss-Modell für Sachsen-Anhalt
Arten FFH-Anhang II	Arten der Flora-Fauna-Habitat - Richtlinie des Anhanges II (2003) - Tier- und Pflanzenarten von gemeinschaftlichem Interesse, für deren Erhaltung besondere Schutzgebiete ausgewiesen werden müssen
Arten FFH-Anhang IV	Arten der Flora-Fauna-Habitat - Richtlinie des Anhang IV (2003) - streng zu schützende Tier- und Pflanzenarten von gemeinschaftlichem Interesse
Arten FFH-Anhang V	Arten der Flora-Fauna-Habitat - Richtlinie des Anhanges V (2003) - Tiere von gemeinschaftlichem Interesse, deren Entnahme aus der Natur und Nutzung Gegenstand von Verwaltungsmaßnahmen sein können
ATKIS	Amtliches Topographisches Informationssystem (ATKIS) der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)
B	Berlin
BAH	Büro für Angewandte Hydrologie
BB	Brandenburg
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BKR	Boden-Klima-Raum
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung

Akronyme

BP	Brutpaar
BÜK	Bodenübersichtskarte
CIR	Color-Infrarot
CORINE-Landcover	Daten zur Bodenbedeckung Deutschland
d	Tag
DB	Datenbank
DGM	Digitales Höhenmodell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFL	Elementarfläche (Modellierungseinheit in ArcEG-MO)
EHZ	Erhaltungszustand
ELS	Einzellinearspeicher (konzeptioneller Modellansatz)
EP	potenzielle Verdunstung (auch GRV)
EPIC	Erosion-Productivity Impact Calculator Model (WILLIAMS et al. (1989); http://epicapex.brc.tamus.edu/)
EPkor	landnutzungskorrigierte potenzielle Verdunstung
ER	Verdunstung (reale)
EU	Europäische Union
EZG	Einzugsgebiet
FAG	Fruchtartengruppe
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FFG	Fruchtfolgeglied
FFH	Fauna-Flora-Habitat
FFH-RL	Flora-Fauna-Habitat - Richtlinie (2003)
FGW	Fließgewässerabschnitt
FK	Feldkapazität
GIS	Geographisches Informationssystem
GRV	FAO Gras-Referenzverdunstung (auch EP)
GW	Grundwasser
GWFA	Grundwasserflurabstand
GWneu	Grundwasserneubildung (auch SWR, GWN)
GWP	Gewässerpunkt
ha	Hektar
HBU	Hainbuche
HQ100	Jahrhunderthochwasser

HU	Wärmeeinheit (heat unit)
HW	Hochwert
Hyk	Hydrogeologische Karte
i. d. R.	in der Regel
ID	Identifikationsnummer
IDSa	Landesschlüssel Sachsen-Anhalt für forstliches Wuchsgebiet,
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODENKUNDE, 2005)
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KWB	Klimatische Wasserbilanz
LAGB	Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt
LAI	Blattflächenindex
LAU	Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LHW	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
Lit.	Literatur
LLFG	Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau des Landes Sachsen-Anhalt
LN	landwirtschaftliche Nutzfläche
LRT	Lebensraumtyp
LUGV	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg
LVG	Landwirtschaftliche Vergleichsgebiete
M	Mais
m	Meter, Monat
m. o. w.	mehr oder weniger
MaxD	maximale zusammenhängende Unterschreitungsdauer eines Abflussschwellenwertes Q_s
MF	Mahlpfuhler Fenn
MHGW	mittlerer Grundwasserhochstand
MHQ	Mittlerer Hochwasserabfluss [m^3/s]
MNGW	mittlerer Grundwassertiefstand
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss [m^3/s]
MQ	mittlerer Abfluss [m^3/s]
MV	Mecklenburg-Vorpommern
NA	Niederschlag-Abfluss

Akronyme

NAO	North Atlantic Oscillation
nFK	nutzbare Feldkapazität [mm]
Nied	korrigierter Niederschlag [mm/a]
NMxQ	Kleinstes arithmetisches Mittel des Abflusses an x aufeinander-folgenden Tagen
NRG	Naturraumgruppe nach MEYNEN und SCHMITHÜSEN (1962)
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient
NSG	Naturschutzgebiet
OWK	Oberflächenwasserkörper
PET	potenzielle Evapotranspiration
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
ppm	parts per million - Teile pro Million = 0,000001 %
PSCN	Plant-Soil-Carbon-Nitrogen Model im Rahmen von ArcEGMO (Klöcking, 2009)
PWP	Äquivalent- (permanenter) Welkepunkt [Vol.%]
Q	Durchfluss
QDR	Durchflussanteil aus Drainageabfluss
QGW	Durchflussanteil aus Grundwasserabfluss (Basisabfluss)
QRO	Durchflussanteil aus Oberflächenabfluss
Qs	Schwellenwert des Durchflusses
QURB	Abfluss von versiegelten Flächen
R	Abflusspende
Ra	Winterraps
RD	Drainageabfluss
RG	Grundwasserabfluss
RH	hypodermischer Abfluss (interflow)
RHB	Rückhaltebecken
RKT	Abfluss über die Trennkanalisation
RO	Oberflächenabfluss
RP	Revierpaar
RW	Rechtswert
s	Sekunde
SDB	Standard-Datenbogen
SG	Sommermenggetreide
SN	Sachsen
SRES	IPCC-Sonderbericht über Emissions-Szenarien
ST	Sachsen-Anhalt

STAR	Statistische Regionalisierungsmethode, entwickelt am PIK-Potsdam
SWAT	Einzugsgebietsmodell: Soil Water Assessment Tool (NEITSCH et al., 2005), auch SWAT2000 und SWAT2005
SWR	Sickerwasserrate (auch GWneu)
t	Tonne
TEI	Traubeneiche
TK	Topographische Karte
UG	Untersuchungsgebiet
UIS	Umweltinformationssystem
URBAN	Wasser- und Stoffmodell für urbane Räume (BIEGEL, 2006)
USDA	United States Department of Agriculture
UV	Ultraviolett
VBK50	Vorläufige Bodenkarte 1:50.000 von Sachsen-Anhalt (04.10.2004)
VEGEN	Generisches Vegetationsmodell in PSCN
Vogelarten Anhang I VRL (2009)	Vogelarten nach Anhang I der VRL, für die besondere Schutzgebiete zu schaffen sind
VRL	Vogelschutzrichtlinie
vWG	Wintergerste
WB	forstlicher Wuchsbezirk
WR	Winterroggen
WRRL	EU-Wasserrahmenrichtlinie
WW	Winterweizen
ZR	Zucker- und Futterrüben

Abbildungsverzeichnis

2.1	Simulation der Abflussbildung im Modul PSCN (oben) und nachgeschaltetes Einzellinearspeichermodell der Abbildung der lateralen unterirdischen Flüsse (unten)	7
2.2	Teileinzugsgebiete und Oberflächenwasserkörper im Modellgebiet	9
2.3	Höhenverhältnisse im Modellgebiet	12
2.4	Landnutzung im Modellgebiet	13
2.5	Naturräumliche Gliederung Sachsen-Anhalts (SCHRÖDER, 1997)	16
3.1	Landwirtschaftliche Vergleichsgebiete des Landes Sachsen-Anhalt und Referenzeinzugsgebiete	19
3.2	Zuordnung der Forstliche Wuchsgebiete im Land Sachsen-Anhalt zu den LVG	24
3.3	Synthetisierter Jahresgang des GWFA für 10 GWFA-Klassen (MNGW: mittlerer Grundwassertiefstand, MHGW: mittlerer Grundwasserhochstand)	26
3.4	Phänologische Stationen und Naturraumgruppen in Sachsen-Anhalt	27
3.5	Jahresmittel der Lufttemperatur 1971–2000 (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete (LVG) und Nutzungsarten	31
3.6	Jahresmittel der Lufttemperatur 2071–2100 (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete (LVG) und Nutzungsarten	31
3.7	Jahresniederschlag 1971–2000 (Median, Minima und Maxima der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten	32
3.8	Jahresniederschlag 2071–2100 (Median, Minima und Maxima der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten	32
3.9	Klimatische Wasserbilanz 1971–2000 (Median, Minima und Maxima der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten	33
3.10	Klimatische Wasserbilanz 2071–2100 (Median, Minima und Maxima der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten	33
3.11	Veränderung der Niederschläge 2071–2100 im Vergleich zur Referenzsituation (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten	34

3.12	Veränderung der KWB 2071–2100 im Vergleich zur Referenzsituation (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Nutzungsarten	34
3.13	Sickerwasserspenden GWN 1971–2000 der untersuchten Ackerstandorte (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Bodentypen	35
3.14	Zusammenhang zwischen Sickerwasserspenden GWN [mm/a] und Andauer der jeweiligen Sickerwasserperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (jeweils Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 1971–2000)	35
3.15	Abnahme der Sickerwasserspenden GWN 2071–2100 der untersuchten Ackerstandorte im Vergleich zur Referenzperiode (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Bodentypen	36
3.16	Abnahme der Sickerwasserspenden GWN und Länge der Abflussbildungsperioden 2071–2100 im Vergleich zur Referenzperiode (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen) für die einzelnen LVG und Bodentypen auf den untersuchten Ackerstandorten	36
3.17	Dauer von Dürreperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 1971–2000) . .	37
3.18	Dauer von Dürreperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 2071–2100) . .	37
3.19	Änderung der Dauer von Dürreperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten 2071-2100 gegenüber 1971-2000	38
3.20	Dauer von Sättigungsperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 1971–2000)	38
3.21	Dauer von Sättigungsperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten (Median der 10 WETTREG2010-Realisierungen für 2071–2100)	39
3.22	Änderung der Dauer von Sättigungsperioden [d] auf den untersuchten Ackerstandorten 2071–2100 gegenüber 1971–2000	39
3.23	Sickerwasserspende (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung	40
3.24	Mittlere Bodenfeuchte (Median mit Extrema pro Zeitperiode) in Abhängigkeit von der Nutzung	40
3.25	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema) einer Gley-Vega mit Ackernutzung	42
3.26	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema) einer Gley-Vega unter einem Kieferbestand	42
3.27	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema) einer Gley-Vega unter einem Laubwaldmischbestand	43

3.28	Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte unter Grünland und Acker auf Tagesbasis	43
3.29	Verhältnis zwischen realer Verdunstung (ER) und potenzieller Verdunstung (EPkor) für die 4 Perioden unter Acker im innerjährlichen Verlauf	44
3.30	Sickerwasserspende eines Pseudogleys (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung	44
3.31	Mittlere Bodenfeuchte eines Pseudogleys (Median mit Extrema pro Zeitperiode) in Abhängigkeit von der Nutzung	45
3.32	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende eines Pseudogleys (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema)	45
3.33	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Tagesbasis .	46
3.34	Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte auf Monatsbasis . . .	46
3.35	Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte eines Pseudogleys auf Tagesbasis mit Dürre-Grenzwert (30% nFK) und Feldkapazität FK .	47
3.36	Sickerwasserspende eines Tschernosem (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung	47
3.37	Mittlere Bodenfeuchte eines Tschernosem (Median mit Extrema pro Zeitperiode) in Abhängigkeit von der Nutzung	48
3.38	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema)	48
3.39	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Tagesbasis .	49
3.40	Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte auf Monatsbasis . . .	49
3.41	Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte eines Tschernosem auf Tagesbasis mit Dürregrenzwert (30% nFK)	50
3.42	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende einer Braunerde (mittlere Monatssummen pro Zeitperiode als Median mit Extrema) .	50
3.43	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Tagesbasis .	51
3.44	Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte einer Braunerde auf Tagesbasis mit Dürregrenzwert (30% nFK)	51
3.45	Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte auf Monatsbasis . . .	52
3.46	Sickerwasserspende von Braunerden in den LVG 13 und 14 (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung	52
3.47	Mittlere Bodenfeuchte der ausgewählten Braunerden in den LVG 13 und 14 (Median mit Extrema pro Zeitperiode) in Abhängigkeit von der Nutzung	52
3.48	Sickerwasserspende (mittlere Jahressumme pro Zeitperiode als Median mit Extrema) in Abhängigkeit von der Nutzung	53
3.49	Mittlere Bodenfeuchte im Hauptwurzelraum (1/1.5 m) als Mediane mit Extrema pro Zeitperiode in Abhängigkeit von der Nutzung . . .	53
3.50	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Tagesbasis .	54
3.51	Innerjährliche Veränderung der Sickerwasserspende auf Monatsbasis	54

3.52	Innerjährliche Veränderung der Bodenfeuchte einer Sandrosterde auf Tagesbasis mit Dürregrenzwert (30% nFK)	55
4.1	Referenzgebiete	58
4.2	Lithofazies der Referenzgebiete	59
4.3	Biese (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)	61
4.4	Biese (Landnutzung, Höhenverhältnisse)	62
4.5	Biese (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)	63
4.6	Rossel (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)	64
4.7	Rossel (Landnutzung, Höhenverhältnisse)	65
4.8	Rossel (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)	66
4.9	Holtemme (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)	67
4.10	Holtemme (Landnutzung, Höhenverhältnisse)	68
4.11	Holtemme (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)	69
4.12	Aller (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)	70
4.13	Aller (Landnutzung, Höhenverhältnisse)	71
4.14	Aller (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)	72
4.15	Weida (Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Pegel)	73
4.16	Weida (Landnutzung, Höhenverhältnisse)	74
4.17	Weida (Grundwasserflurabstand, Meliorationsflächen, Hangneigung)	75
4.18	Mittlere Tagesabflüsse am Pegel Nienhagen	79
4.19	Monatsmittelwerte der mittleren Tagesabflüsse am Pegel Nienhagen	79
4.20	Innerjähriger Gang der mittleren Tagesabflüsse am Pegel Nienhagen (1983-2010)	80
4.21	Übersicht der Auswertungspunkte aller Referenzgebiete (Biese halb so groß wie die anderen Gebiete; Lage der Gebiete zueinander nicht maßstabsgetreu)	83
4.22	Innerjähriger Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Biese (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	85
4.23	Innerjähriger Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Biese (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	85
4.24	Innerjähriger Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Biese (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	86
4.25	Innerjähriger Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Biese am Pegel Dobbrun (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)	86
4.26	Innerjähriger Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Biese am Pegel Goldbeck (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)	87

4.27	Innerjährlicher Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Rossel (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	90
4.28	Innerjährlicher Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Rossel (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	90
4.29	Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Rossel (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	91
4.30	Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Rossel am Pegel Mühlstedt (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)	92
4.31	Innerjährlicher Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Holtemme (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	94
4.32	Innerjährlicher Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Holtemme (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	94
4.33	Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Holtemme (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	95
4.34	Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Holtemme am Pegel Nienhagen (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)	95
4.35	Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Holtemme am Pegel Mahndorf (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)	96
4.36	Innerjährlicher Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Aller (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	99
4.37	Innerjährlicher Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Aller (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	99
4.38	Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Aller (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	100
4.39	Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Aller am Pegel Weferlingen (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)	100
4.40	Innerjährlicher Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Aller am Pegel Walbeck (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)	101
4.41	Innerjährlicher Gang der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung für die Weida (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	104

4.42	Innerjähriger Gang der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Klimatischen Wasserbilanz für die Weida (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	104
4.43	Innerjähriger Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses für die Weida (Vergleich der mittleren Szenarien für die vier Zeitperioden)	105
4.44	Innerjähriger Gang des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses für die Weida am Pegel Stedten (Vergleich des Medians aller 10 Realisierungen für die vier Zeitperioden)	105
4.45	Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Klimatischen Wasserbilanz (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete	109
4.46	Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete	112
4.47	Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Grundwasserabflusses (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete	113
4.48	Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs des mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusses (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete	115
4.49	Gegenüberstellung des innerjährlichen Gangs der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusspende (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden aller Referenzgebiete	116
5.1	Innerjähriger Gang der aus Beobachtungen simulierten („Kalibrierungslauf“) und der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflüsse (1971-2000)	123
5.2	Mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflüsse für die Biese am Pegel Dobbrun (1971–2100)	124

Tabellenverzeichnis

2.1	Verwendete Datengrundlagen – Quellenangaben s. Kap. 6 ArcEGMO-ST	10
2.2	Landschaftsraum und zugeordnete Naturräume	17
3.1	Zuordnung der Referenzeinzugsgebiete (EZG, s. Abbildung 3.1) zu den LVG und den Landschaftsräumen Sachsen-Anhalts	21
3.2	Zuordnung der LVG zu den Naturraumgruppen (NRG, s. Abbildung 3.4) in Sachsen-Anhalt mit je zehngliedriger Fruchtfolge	22
3.3	Forstliche Wuchsgebiete mit Ausdehnung und Anzahl der Wuchsbezirke (WB) in Sachsen-Anhalt, Haupt-Bestandestypen und -zieltypen (IDSA - Landesschlüssel, TEI -Traubeneiche, HBU - Hainbuche) . . .	23
3.4	Klassifizierung der berücksichtigten Bodenformen und Verteilungsmatrix mit dominierenden Landnutzungen	25
3.5	Ergebnisgrößen der Wasserhaushaltssimulation	30
3.6	Erklärung der Quartile	31
3.7	Ausgewählte Bodentypen, ID: Boden-ID, GWFA: Grundwasserflurabstand, Bodenparameter s. Tabelle Anhang-4	41
4.1	Übersicht der Landschaftsräume und der Referenzeinzugsgebiete . .	60
4.2	Gewässerkundliche Hauptzahlen, HQ_{100} (aus Tagesmittelwerten abgeleitet) und Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) für die Abflüsse an ausgewählten Pegeln	78
4.3	Gegenüberstellung der für die Biese mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden (* Erläuterung zum Eintrag „kein Abfluss“: siehe Kapitel 4.3.1 auf S. 81)	84
4.4	Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässerkundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ_{100} (Median aller 10 Realisierungen) für die Pegel Dobbrun und Goldbeck [Einheit: m^3/s]	88
4.5	Gegenüberstellung der für die Biese mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden	88
4.6	Gegenüberstellung der für die Rossel mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden	89

4.7	Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässer- kundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ ₁₀₀ (Median aller 10 Realisierungen) für den Pegel Mühlstedt [Ein- heit: m ³ /s]	92
4.8	Gegenüberstellung der für die Rossel mit WETTREG2010- Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden	93
4.9	Gegenüberstellung der für die Holtemme mit WETTREG2010- Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden	93
4.10	Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässer- kundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ ₁₀₀ (Median aller 10 Realisierungen) für die Pegel Nienhagen und Mahndorf [Einheit: m ³ /s]	97
4.11	Gegenüberstellung der für die Holtemme mit WETTREG2010- Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden	97
4.12	Gegenüberstellung der für die Aller mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisie- rungen) für die vier Zeitperioden (* Erläuterung zum Eintrag „kein Ab- fluss“: siehe Kapitel 4.3.1 auf S. 81)	98
4.13	Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässer- kundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ ₁₀₀ (Median aller 10 Realisierungen) für die Pegel Weferlingen und Walbeck [Einheit: m ³ /s]	102
4.14	Gegenüberstellung der für die Aller mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisie- rungen) für die vier Zeitperioden	102
4.15	Gegenüberstellung der für die Weida mit WETTREG2010- Ergebnissen simulierten Wasserhaushaltsgrößen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden (* Erläuterung zum Eintrag „kein Abfluss“: siehe Kapitel 4.3.1 auf S. 81)	103
4.16	Aus Simulation mit WETTREG2010-Ergebnissen ermittelte gewässer- kundliche Hauptzahlen (Mittelwert aller 10 Realisierungen) und HQ ₁₀₀ (Median aller 10 Realisierungen) für den Pegel Stedten [Ein- heit: m ³ /s]	106
4.17	Gegenüberstellung der für die Weida mit WETTREG2010- Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden	106
4.18	Abweichungen der aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten hydrometeorologischen Größen gegenüber dem Referenzzeitraum (Mittelwert aller 10 Realisierungen)	108
4.19	Prozentabweichungen der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulier- ten Abflüsse gegenüber dem Referenzzeitraum (Mittelwert aller 10 Realisierungen) in %	110

4.20	Anteil der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten realen Verdunstung zum Niederschlag der jeweiligen Zeitperiode (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für alle Referenzgebiete in %. (* Hier überwiegt die Verdunstung den Niederschlag, d. h. es wird aus den Bodenspeichern gezehrt)	111
4.21	Abweichungen der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Abflusskomponenten gegenüber dem Referenzzeitraum (Mittelwert aller 10 Realisierungen)	111
4.22	Mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierte Anteile des Grundwasser- und Direktabflusses am Gesamtabfluss (Mittelwert aller 10 Realisierungen)	113
4.23	Aus Tagesmittelwerten abgeleitete HQ ₁₀₀ (Median über alle 10 Realisierungen) [Einheiten: m ³ /s]	117
4.24	Prozentuale Abweichungen vom Referenzzeitraum der aus Tagesmittelwerten abgeleiteten HQ ₁₀₀ (Median über alle 10 Realisierungen) .	117
4.25	Entwicklung der mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Mittelwert aller 10 Realisierungen) für die vier Zeitperioden	118
5.1	Vergleich der Klimatischen Wasserbilanz für den Referenzzeitraum des Kalibrierungslaufs und den aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Werten (Mittelwert über alle 10 Realisierungen)	122
5.2	Vergleich der potenziellen Verdunstung für den Referenzzeitraum des Kalibrierungslaufs und den aus WETTREG2010-Ergebnissen abgeleiteten Werten (Mittelwert über alle 10 Realisierungen)	122
5.3	Gegenüberstellung der für die Biese (Pegel Dobbrun) mit WETTREG2010-Ergebnissen simulierten Niedrigwasserkennwerte (Minimum, Mittelwert und Maximum aller 10 Realisierungen) . . .	124
A.1	Auflistung der Datenquellen und verwendeten Unterlagen	A.1
B.1	Tabellenanhang 1	B.2
B.2	Tabellenanhang 2	B.3
B.3	Tabellenanhang 3	B.4
B.4	Tabellenanhang 4	B.5

Herausgegeben
durch das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
Stabsstelle Fachbereichsübergreifende Aufgaben, Klimawandel, Öffentlichkeitsarbeit

Impressum

Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt - Halle (2013) Heft 5 (Band 1):

Klimafolgenstudie 2012, Wasser (Band 1)

Autoren:

Büro für Angewandte Hydrologie
B. Pfützner
B. Klöcking
A. Schumann
P. Hesse

Redaktion:

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
Dr. Christiane Röper
Manfred Unglaube

Foto Titelseite: Manfred Unglaube (2012)

Herausgeber und Bezug:

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, PSF 200 841, 06009 Halle (Saale)
Sitz: Reideburger Str. 47, 06116 Halle (Saale), Telefon +49 345 5704-0
E-Mail: poststelle@lau.mlu.sachsen-anhalt.de

Diese Schriftenreihe wird kostenlos abgegeben und darf nicht verkauft werden. Der Nachdruck bedarf der Genehmigung.

Die Autoren sind für den fachlichen Inhalt ihrer Beiträge selbst verantwortlich. Die von ihnen vertretenen Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

März 2013

Diese Schrift darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben politischer Informationen oder Werbemittel. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Schrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner Gruppen verstanden werden könnte.

ISSN 0941-7281

