



POTSDAM-INSTITUT FÜR
KLIMAFOLGENFORSCHUNG

Expertise 2 "Klimawandel und Hydrologie in der Region Havelland-Fläming"

Bericht zum

Modellvorhaben der Raumordnung

**Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel für die Region
Havelland-Fläming**



Auftraggeber:

Regionale Planungsgemeinschaft Havelland-Fläming

Oderstraße 65

14513 Teltow

Autor: Fred Hattermann

Forschungsbereich „Klimawirkung und Vulnerabilität“

Inhaltsverzeichnis

2. Hydrologie	58
2.1. Aufgabenstellung	58
2.2. Einleitung	58
2.2.1. Natürliches Wasserdargebot	59
2.2.2. Daten und Methoden	63
2.2.2.1. Das ökohydrologische Modell SWIM.....	63
2.2.2.2. Datengrundlage.....	66
2.2.2.3. Modellierungsstrategie	72
2.3. Ergebnisse	72
2.3.1. Kalibrierung und Parametrisierung für den Referenzzeitraum...72	
2.3.2. Klimafolgen für den Wasserhaushalt unter STAR- Szenarienbedingungen.....	73
2.3.2.1. Die Elbe	73
2.3.2.2. Die Nuthe.....	75
2.3.3. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf.....	78
2.3.4. Zusammenfassung	79
2.3.5. Anpassungsoptionen.....	83
2.4. Literatur	86

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Mittlere jährliche Niederschläge 1961-1990.....	60
Abb. 2.2:	Simulierte mittlere jährliche aktuelle Verdunstung 1961-1990	60
Abb. 2.3:	Simulierte mittlere jährliche Grundwasserneubildung 1961-1990.....	61
Abb. 2.4:	Signifikanz für eine Zunahme von Trockenperioden im Sommerhalbjahr (Krysanova, et al. 2008) (Erläuterung s. Text).....	62
Abb. 2.5:	Signifikanz für eine Zunahme von Starkniederschlagsereignissen im Winterhalbjahr (Krysanova, et al. 2008) (Erläuterung s. Text). In rot: Abnahme, in blau: Zunahme.....	63
Abb. 2.6:	Verwendetes Höhenmodell für die hydrologischen Simulationen	67
Abb. 2.7:	Verwendetes Modell für die Landnutzung (Corine land cover).....	68
Abb. 2.8:	Verwendetes Bodenmodell für die hydrologischen Simulationen	69
Abb. 2.9:	Verwendete räumliche Informationen der SWIM-Teileinzugsgebiete für die hydrologischen Simulationen.....	70
Abb. 2.10:	Langjähriges Mittel des simulierten und beobachteten täglichen Abflusses für die Elbe am Pegel Neu Darchau (links) und für die Nuthe am Pegel Babelsberg für die Periode 1981-1989	73
Abb. 2.11:	Abflussentwicklung in der Elbe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 2°C (STAR, 100 Realisationen), Änderungen der durch SWIM simulierten, mittleren täglichen Abflüsse der Elbe im Jahresverlauf am Pegel Neu Darchau unter Szenarienbedingungen als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2031-2060 (100 Realisationen).	74
Abb. 2.12:	links: Differenz in der Verdunstung für die Jahre 2031-60 gegenüber 1961-90 im 2K Szenario, (Mittel von 100 simulierten Werten), rechts: Differenz in der Grundwasserneubildung für die Jahre 2031-60 gegenüber 1961-90 im 2K Szenario, (Mittel von 100 simulierten Werten)..	75
Abb. 2.13:	Entwicklung der Grundwasserneubildung in der Nuthe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 2°C (STAR, Mittel aus 100 Realisationen) als Vergleich der mittleren simulierten Werte 1981-1990 und der Szenarienperiode 2011-2040 links und 2031-2060 rechts (Mittel aus jeweils 100 Realisationen).	76
Abb. 2.14:	Abflussentwicklung in der Nuthe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 2°C (STAR, 100 Realisationen), Änderungen der durch SWIM simulierten, mittleren täglichen Abflüsse der Nuthe im Jahresverlauf am Pegel Babelsberg unter Szenarienbedingungen, links als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1981-1990 und der Szenarienperiode 2011-2040 (100 Realisationen) und rechts als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1981-1990 und der Szenarienperiode 2031-2060 (100 Realisationen)	77
Abb. 2.15:	Abflussentwicklung in der Nuthe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 3°C (STAR, 100 Realisationen), Änderungen der durch SWIM simulierten, mittleren täglichen Abflüsse der Nuthe im Jahresverlauf am Pegel Babelsberg unter Szenarienbedingungen, links als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1981-1990 und der Szenarienperiode	

2011-2040 (100 Realisationen) und rechts als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1981-1990 und der Szenarienperiode 2031-2060 (100 Realisationen)	77
Abb. 2.16: Anzahl der Tage mit einem Abfluss geringer als durchschnittlich $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ für die STAR-Temperaturzenarien T0, T2 und T3 (Anstieg der Temperatur um 0K, 2K und 3K) für die Periode 2031-60	78
Abb. 2.17: Schematische Darstellung der Änderung des natürlichen Abflussregimes unter Temperaturanstieg in Mitteleuropa. In blau: Abfluss ohne Klimaänderung; in rot: Abfluss unter Klimawandel	81

Boxenübersicht

Box 2.1: Das ökohydrologische Modell SWIM.....	63
Box 2.2: Die mögliche Rolle der europäischen Rahmenrichtlinien in der Umsetzung der Anpassungsstrategien in der wasserwirtschaftlichen Planung	82
Box 2.3: Weiterführende Informationen.....	85

Kernaussagen:

- Es sind bereits Änderungen im Abflussregime und der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Elbe und deren Nebenflüsse beobachtet worden: Dies zeigt sich auch im Projektgebiet, u.a. am Beispiel der Nuthe, durch eine Verschiebung der Abflussspitzen in das zeitige Frühjahr und durch weniger Abfluss im Sommer.
- Insbesondere auf den Hochflächen des Flämings wird wahrscheinlich der Stand des Grundwasserspiegels weiter sinken, da die Grundwasserneubildung insgesamt zurückgeht und vorfluterferne Gebiete stärker darauf reagieren.
- Für die Vergangenheit wurde in der Projektregion Havelland-Fläming, wie im gesamten Elbeeinzugsgebiet, ein signifikanter Anstieg der Trockenperioden während des Sommerhalbjahrs von Mai – Oktober für die Jahre 1951-2003 beobachtet.
- Für das Winterhalbjahr konnten für die Vergangenheit weder eine Zunoch eine signifikante Abnahme von Starkniederschlägen im Zeitraum von 1951-2003 festgestellt werden.

2. Hydrologie

2.1. Aufgabenstellung

Bisher durchgeführte Untersuchungen deuten auf eine vom Klimawandel stark beeinflusste Wasserverfügbarkeit für das regionale Gewässernetz im Elbe-Einzugsgebiet (GLOWA Elbe) hin. Die Region Havelland-Fläming ist hiervon unmittelbar betroffen. Das zukünftige Wasserdargebot für die Region wird unter der Annahme eines Klimawandels, wie er im STAR-Modell mit dem Szenarien der Temperaturerhöhung um 0K, 2K und 3K denkbar ist, als Grundwasserneubildung und punktuell als Abfluss an einer Pegelmessstelle dargestellt. Daneben wird das Auftreten von Extremereignissen wie Starkniederschläge oder Dürreperioden in der Vergangenheit statistisch für die Region ausgewertet.

2.2. Einleitung

Über die letzten hundert Jahre ist ein globaler Klimawandel zu beobachten, welcher sich durch Änderungen im Niederschlag, der Temperatur und der Strahlungsbilanz auf den regionalen Wasserhaushalt auswirkt (IPCC 2007). Diese Trends können für die Regionen in Europa aufgrund von Änderungen in den großskaligen Zirkulationsverhältnissen und lokaler orographischer Verhältnisse sehr unterschiedlich sein (Hattermann, et al. 2007). Die regionale Ausprägung des Klimawandels hat zur Folge, dass mögliche Anpassungsmaßnahmen an die lokalen klimatischen, naturräumlichen, wirtschaftlichen und auch sozialen Gegebenheiten angepasst sein müssen. Voraussetzung für die Initialisierung ist die Kenntnis über die aktuelle, spezifisch-regionale Wassersituation sowie eine Abschätzung deren zukünftiger Entwicklung. Die Analyse der Wasservorkommen im Projektgebiet erfolgte daher in fünf aufeinander aufbauenden Schritten:

- i) Analyse des Ist-Zustandes
- ii) Recherche der für das Projektgebiet relevanten Studien (z.B. GLOWA-Elbe, Wechsung et al. 2008) und Aufbereitung der zur Verfügung stehenden Daten
- iii) Analyse der lokalen Wasserbilanz unter Klimawandel für das Projektgebiet
- iv) Simulation der Wasserflüsse in einem ausgewählten Einzugsgebiet
- v) Statistische Auswertung der Ergebnisse und Darstellung in Karten und Diagrammen

Dabei müssen zur Betrachtung der Wasserressourcen im Projektgebiet die hydrologischen Verhältnisse in den Oberliegergebieten der Havel und Elbe einbezogen werden, da beide Flüsse nicht in West-Brandenburg entspringen und daher wasserspezifische Faktoren und Parameter außerhalb des Projektgebietes Einfluss auf die regionalen Wasserverhältnisse besitzen.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse bauen zu großen Teilen auf bereits bestehenden Untersuchungen auf, da für eine tiefer gehende Analyse die im Projekt vorhandenen Ressourcen nicht ausreichten. Dabei wurden vor allem die Ergebnisse des BMBF-Projektes GLOWA-Elbe (Wechsung, et al. 2008) berücksichtigt, in dem am PIK das Einzugsgebiet der Elbe für die hydrologische Modellierung aufbereitet wurde. Zusätzlich wurden aber weitere Arbeiten im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführt. Dazu gehört die Analyse der Klimafolgen für einen im Projektgebiet entspringenden Fluss, die Nuthe. Die Ergebnisse zur Auswirkung des Klimawandels auf die Nuthe sind, da ähnlich klimatische Randbedingungen vorliegen, auch auf die Buckau, Nieplitz und Plane in ähnlicher Form übertragbar. Als Klimarandbedingung wurden wie auch im Projekt GLOWA-Elbe Simulationen des regionalen Klimamodells STAR gewählt, und zwar für unterschiedliche Temperaturszenarien (0K, 2K und 3K Temperaturanstieg bis 2060, s. Kapitel 1.2.2.)

Die vorgelegten Simulationsergebnisse betreffen ausschließlich das natürliche und damit durch Wassermanagement unbeeinflusste Wasserdargebot. Weitergehende Analysen unter Berücksichtigung des anthropogenen Einflusses auf Wasserkreisläufe sind weitaus komplexer und sollten auf Basis der Ergebnisse aus dem GLOWA-Projekt diskutiert werden. Darauf aufbauende Untersuchungen und weitergehende Studien im Austausch mit den örtlichen Wassernutzern sind anzuraten. Dies gilt auch für die Formulierung spezifischer Anpassungsoptionen im Wassersektor.

Aufgrund dieser Analyse und der verwendeten Daten können nur großräumige und allenfalls regionale Aussagen getroffen werden. Dies trifft insbesondere auf die Generierung von Hochwassern zu, da außerdem nur mit täglichen Daten gearbeitet wurde, die Abflussbildung unter Starkniederschlagsereignissen aber oft in Bruchteilen von Stunden geschieht und damit z.B. Sturzfluten durch das verwendete Modellsystem nicht abgebildet werden können.

2.2.1. Natürliches Wasserdargebot

Das Elbeeinzugsgebiet hat bezogen auf die Bevölkerung von den großen Flüssen Europas mit ca. 700 m³ pro Kopf das zweitniedrigste Wasserdargebot. Zum Vergleich: Im Einzugsgebiet der deutschen Donau stehen pro Kopf und Jahr ca. 4000 m³ zur Verfügung. Die höchsten Abflussspenden mit über 800 mm pro Jahr werden aufgrund der hohen Niederschläge und der niedrigen Verdunstung im Bereich des Nordharzes erreicht, wo z.B. die Bode und die in die Weser fließende Oker entspringen. Die niedrigsten Werte findet man im östlichen Windschatten des Harzes, also in den Bördestandorten im Süden von Magdeburg bis in den Süden von Brandenburg hinein. Im Projektgebiet liegen die Niederschläge bei ca. 550 bis 650 mm pro Jahr, wobei im Sommer etwas mehr Niederschläge fallen als im Winterhalbjahr. Abb. 2.1 bis Abb. 2.3 zeigen die Werte der mittleren jährlichen Niederschlagssummen, der mittleren jährlichen aktuellen Verdunstung und

der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung für den Referenzzeitraum 1961-1990 für das Elbegebiet und ausgeschnitten für das Projektgebiet.

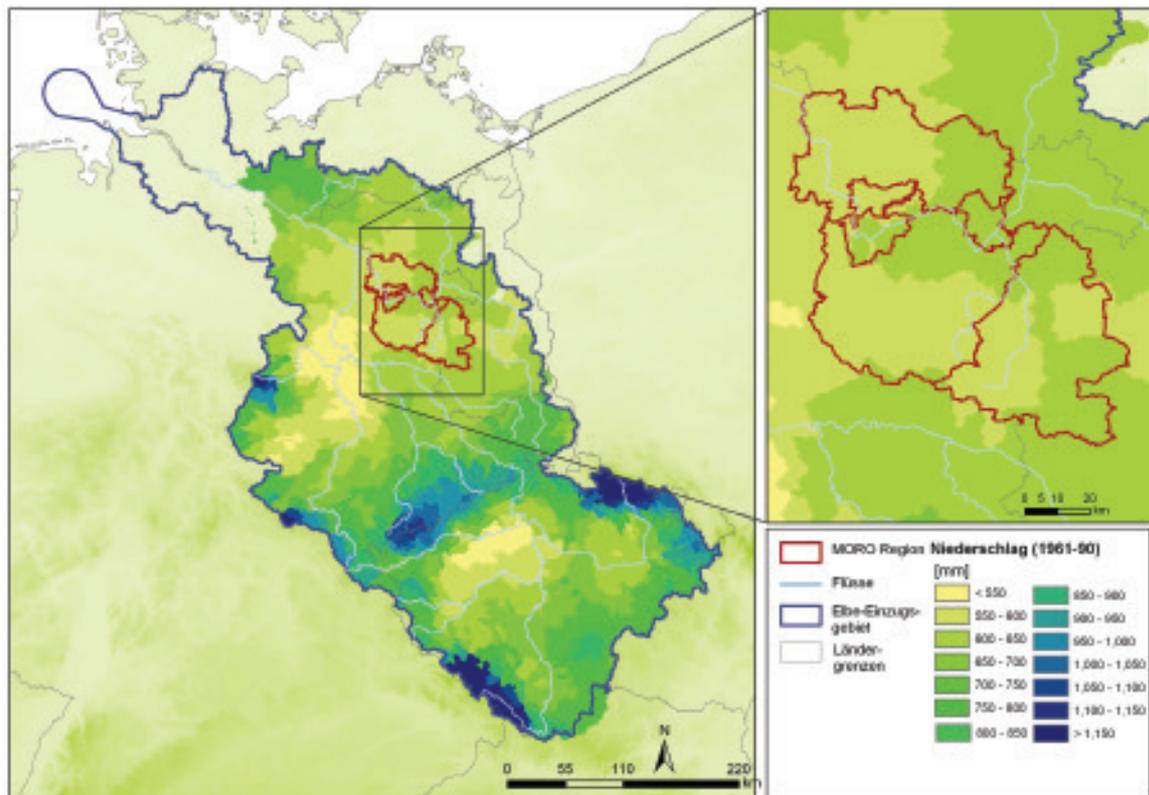


Abb. 2.1: Mittlere jährliche Niederschläge 1961-1990

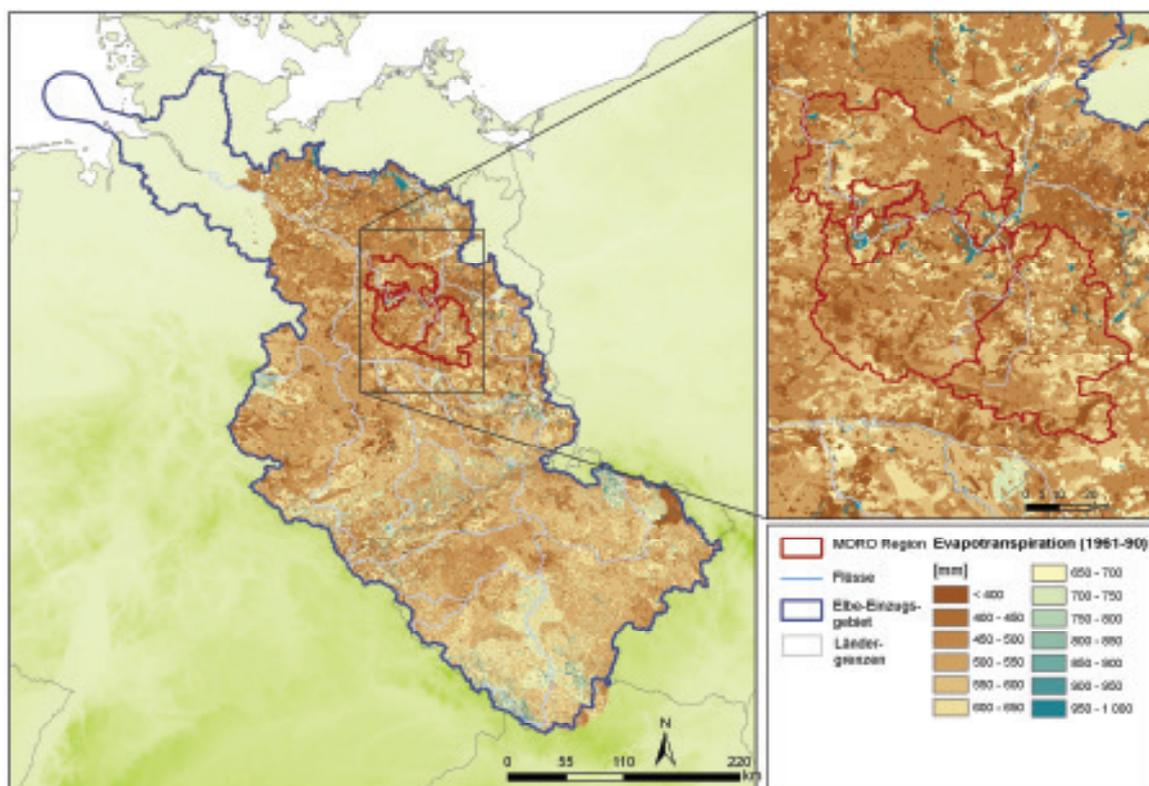


Abb. 2.2: Simulierte mittlere jährliche aktuelle Verdunstung 1961-1990

Die Grundwasserneubildung ist das Restglied der örtlichen Abflussbildung und damit sehr sensitiv für Änderungen in den Niederschlägen und der Verdunstung. Die geringsten Werte der Grundwasserneubildung werden dadurch ebenfalls im Windschatten des Harzes mit Ausstrahlung bis nach Brandenburg erreicht, während sie im Bereich des Harzes deutlich höher liegen können (Abb. 2.3). Negativ ist die Grundwasserneubildung dort, wo z.B. wie in Feuchtgebieten die Pflanzen mehr Wasser zur Verfügung haben (durch lateralen Zufluss), als vor Ort Grundwasser gebildet wird. So liegen z.B. in der Havelniederung und dem Baruther Urstromtal Grundwasserzehrgebiete.

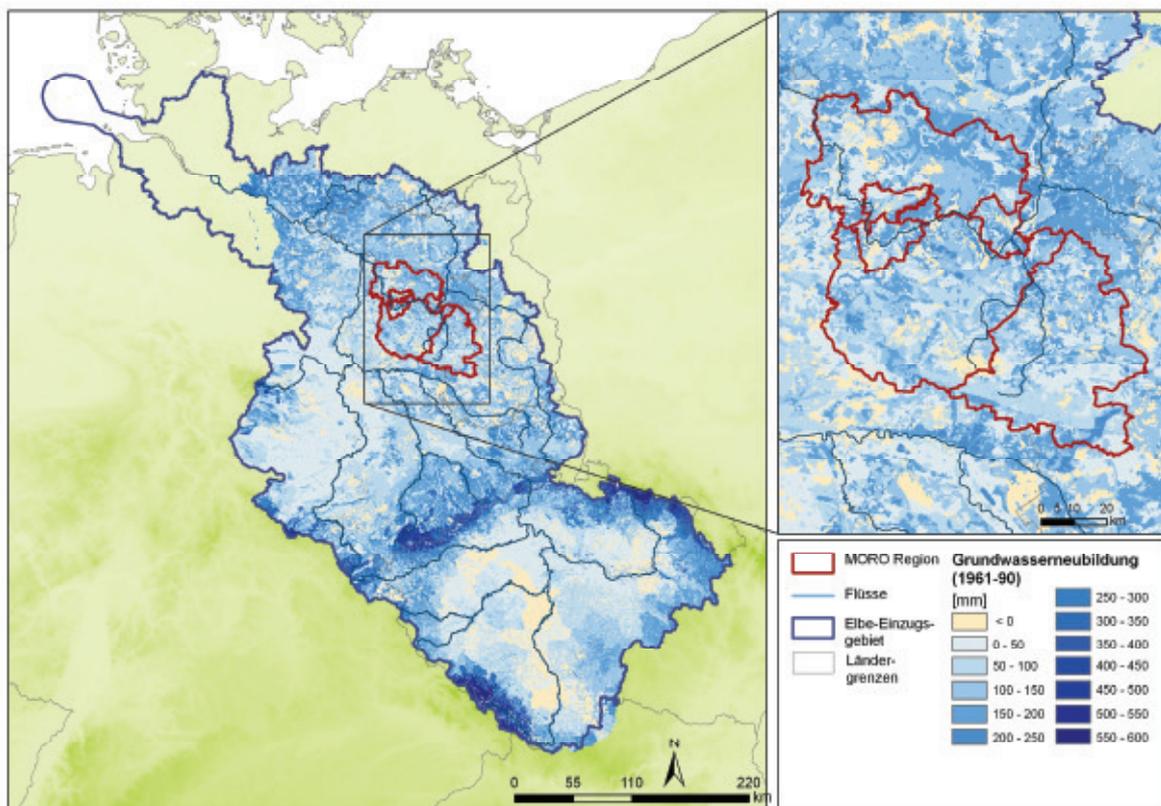


Abb. 2.3: Simulierte mittlere jährliche Grundwasserneubildung 1961-1990

Abb. 2.4 zeigt die Signifikanz für einen Trend zu längeren Trockenperioden (mindestens 20 aufeinander folgende Tage mit Niederschlägen nicht höher als 1 mm pro Tag) im Untersuchungsgebiet über den Zeitraum 1951-2003. Dazu wurden die entsprechenden Perioden pro Jahr aufgezählt, eine diskrete Verteilung angepasst, und dann getestet, ob sich die Verteilungen über die Zeit verändern. Die Fehlerwahrscheinlichkeit für die Annahme eines Trends wurde dann als Karte dargestellt. Umso kleiner die Fehlerwahrscheinlichkeit, desto größer die Signifikanz des Ergebnisses. Man erkennt einen Trend zu längeren Phasen ohne Niederschläge im Windschatten des Harzes und speziell auch im Süden des Projektgebietes, also z.B. im Hohen Fläming.

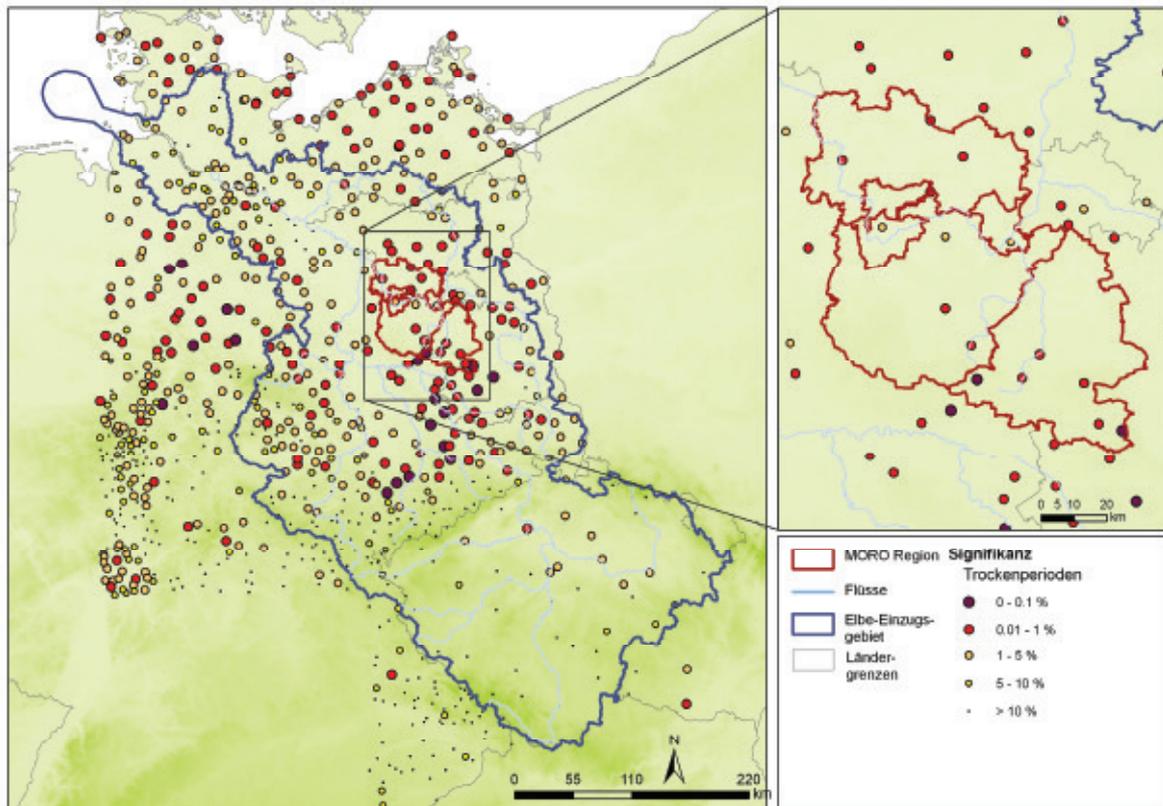


Abb. 2.4: Signifikanz für eine Zunahme von Trockenperioden im Sommerhalbjahr (Krysanova, et al. 2008) (Erläuterung s. Text)

Abb. 2.5 zeigt dagegen die Signifikanz für einen Trend zu intensiveren Niederschlägen (höher als 30 mm pro Tag) für das Winterhalbjahr. Stärkere Niederschläge lassen sich insbesondere in den Mittelgebirgslagen (Harz, Thüringer Wald) und für den Winter beobachten, nicht stark ausgeprägt auch in den Quellgebieten der Spree. Im Sommerhalbjahr ist dagegen kein starker Trend oder aber einer zu zurückgehenden Starkniederschlägen zu beobachten.

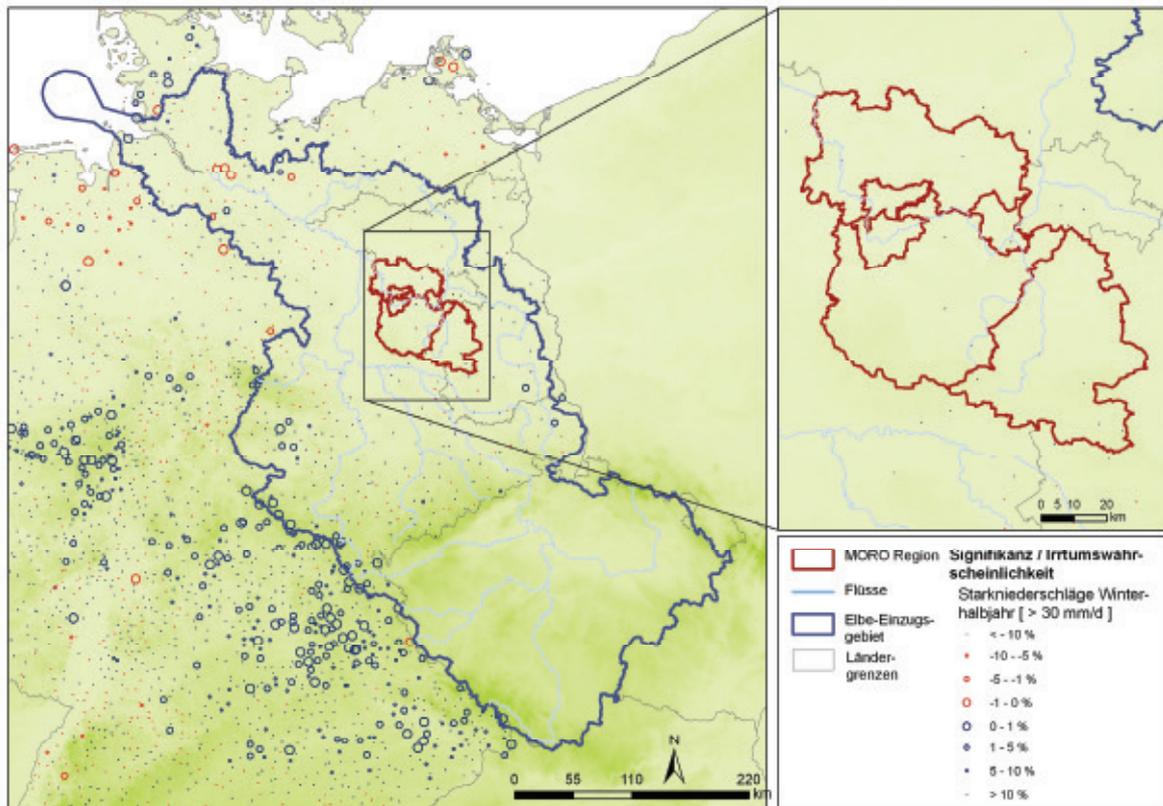


Abb. 2.5: Signifikanz für eine Zunahme von Starkniederschlagsereignissen im Winterhalbjahr (Krysanova, et al. 2008) (Erläuterung s. Text). In rot: Abnahme, in blau: Zunahme

2.2.2. Daten und Methoden

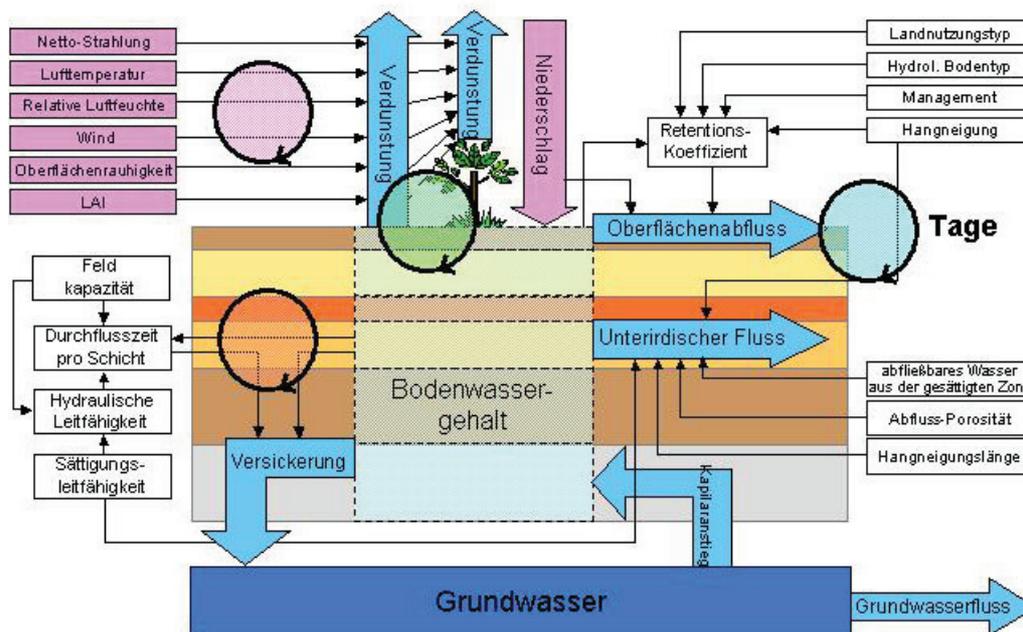
2.2.2.1. Das ökohydrologische Modell SWIM

Zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt wurde das ökohydrologische Modell SWIM (Soil and Water Integrated Model, (Krysanova 1998, Hattermann, et al. 2005)) verwendet, in dem Module zur Berechnung der Hydrologie, des Pflanzenwachstums (Landwirtschaft und Forst), des Nährstoffkreislaufes (Stickstoff und Phosphor) und der Erosion integriert sind. Um die Aussagekraft der Simulationsergebnisse zu untermauern, wurde in dem Projekt GLOWA-Elbe das Modell für die hydrologischen Prozesse angepasst. Zu weiteren Details zum Modell SWIM (s. Box 2.1).

Box 2.1: Das ökohydrologische Modell SWIM

Das Modellsystem SWIM ist ein zeitlich kontinuierlich arbeitendes, räumlich gegliedertes Einzugsgebietsmodell für die regionale Skala. Die Flächendisaggregation erfolgt in drei Ebenen (der in ihren geographischen Eigenschaften homogenen Hydrotopebene, der aus den Hydrotopen zusammengesetzten Teileinzugsgebietsebene und der alles integrierenden Einzugsgebiete). Die unterste Ebene, die Hydrotopebene, entsteht aus der Verschneidung verschiedener

räumlicher Informationen (digitales Geländemodell, Teileinzugsgebiete, Bodenkarte, Landnutzung, Grundwasserflurabstand etc.). Sie spiegelt die in der Landschaft (oder den Daten) vorhandene Heterogenität flächenscharf wider. Die auf der Hydrotopebene errechneten vertikalen und lateralen Wasser- und Stoffflüsse werden auf der Teileinzugsgebietsebene aggregiert und durch das Flusssystem zum Gebietsauslass des Einzugsgebietes weiterverschoben. Das hydrologische Modul in SWIM umfasst vier Teilsysteme: die Bodenoberfläche, die Wurzelzone (wobei entsprechend den Bodeninformationen bis zu 12 Bodenschichten unterschieden werden), den oberen und den unteren Grundwasserleiter und das Wasser im Vorfluter.



Schematische Darstellung der in SWIM abgebildeten hydrologischen Prozesse (LAI - Blattflächenindex)

Zur Berechnung der Verdunstung stehen in SWIM verschiedene Verfahren zur Verfügung. Im Rahmen dieser Studie wurde konsistent die Methode nach Priestley-Taylor angewandt. Hiernach wird die potentielle Evapotranspiration E_p [mm d^{-1}] mithilfe der Strahlung R_a [MJ m^{-2}] und der Temperatur durch folgende Formel berechnet:

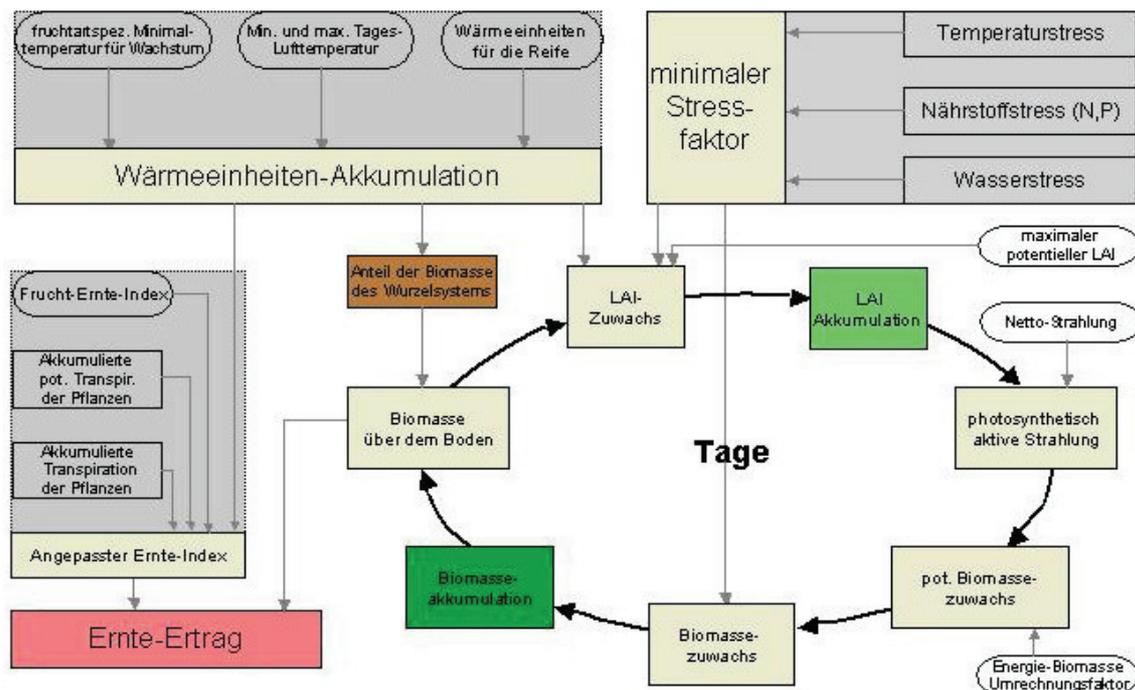
$$E_{P_t} = 1.28 * \left(\frac{R_{a_t}}{H_t} \right) * \left(\frac{\delta}{\delta - \gamma} \right). \quad (1)$$

Dabei ist die latente Wärme H [MJ kg^{-1}] eine Funktion der mittleren täglichen Temperatur T [K], δ ist die Steigung der gesättigten Dampfdruckkurve [kPa C^{-1}] und γ die Psychrometernkonstante [kPa C^{-1}].

SWIM modifiziert die hiermit erhaltenen, potentiellen Verdunstungswerte hydro-

topgenau gemäß der Landnutzung, des täglich berechneten Blattflächenindex und der jeweiligen Bodenfeuchtigkeit, um die tatsächliche Verdunstung für jeden Standort zu erhalten.

Wichtig für die Modellierung der hydrologischen Verhältnisse unter Klimawandel ist eine dynamische Modellierung der Vegetationsentwicklung, da sich unter höheren Temperaturen die Phänologie der Pflanzen (ihre „Jahreszeitenuhr“) ändert und die Pflanzen früher im Jahr anfangen zu wachsen und später im Jahr ihre Blätter verlieren, was über die Pflanzentranspiration starke Rückkopplungen auf den regionalen Wasserhaushalt hat.



Schematische Darstellung der in SWIM abgebildeten Pflanzenwachstumsprozesse

Das Pflanzenwachstum wird auf der Basis eines vereinfachten EPIC-Ansatzes (siehe oben) berechnet (Williams, et al. 1984). Dabei wird eine spezielle, für die Region parametrisierte Datenbasis benutzt, mit deren Hilfe verschiedene Kulturarten (Weizen, Gerste, Mais, Kartoffeln, Raps usw.) sowie auch natürliche Vegetationsbestände (Wald, Grasland) dynamisch – auf Tagesbasis – modelliert werden können.

Eine detaillierte Beschreibung der in SWIM abgebildeten Prozesse findet sich im SWIM-Handbuch unter

<http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr69.pdf>.

2.2.2.2. Datengrundlage

Als Datengrundlage zur Abbildung der räumlichen Heterogenität im Projektgebiet dienten hauptsächlich Informationen aus dem Projekt GLOWA-Elbe, in dem wiederum verschiedene Boden- und Landnutzungsparameter und die Topografie (Geländeoberfläche, Flussläufe) sowie zur Abbildung der Klimavariabilität Niederschläge, Temperaturen und Globalstrahlung von täglicher Auflösung dienten.

Da die Flüsse im Projektgebiet ihren Ursprung meist in anderen Regionen haben, diese aber in der Einzugsgebietsmodellierung mit abgebildet werden mussten, wurden aus Konsistenzgründen in GLOWA-Elbe hauptsächlich deutschlandweit verfügbare Datengrundlagen zur Modellierung genutzt. Für die Modellierung der Nuthe wurde aber auf stärker regionale Daten zurückgegriffen (Verteilung der Böden nach Bodenübersichtskarte 300, Biotopkartierung des Landes Brandenburg).

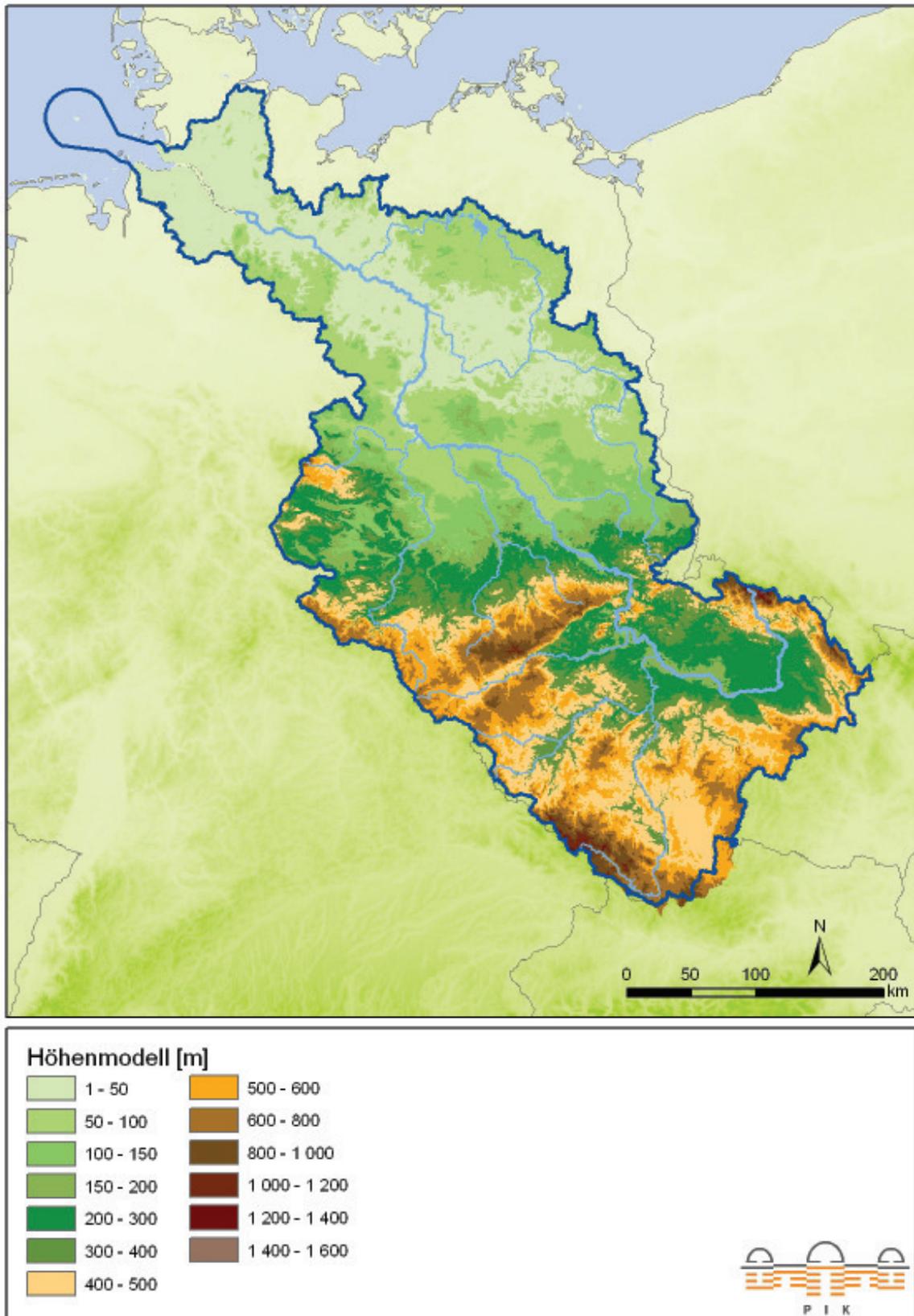


Abb. 2.6: Verwendetes Höhenmodell für die hydrologischen Simulationen

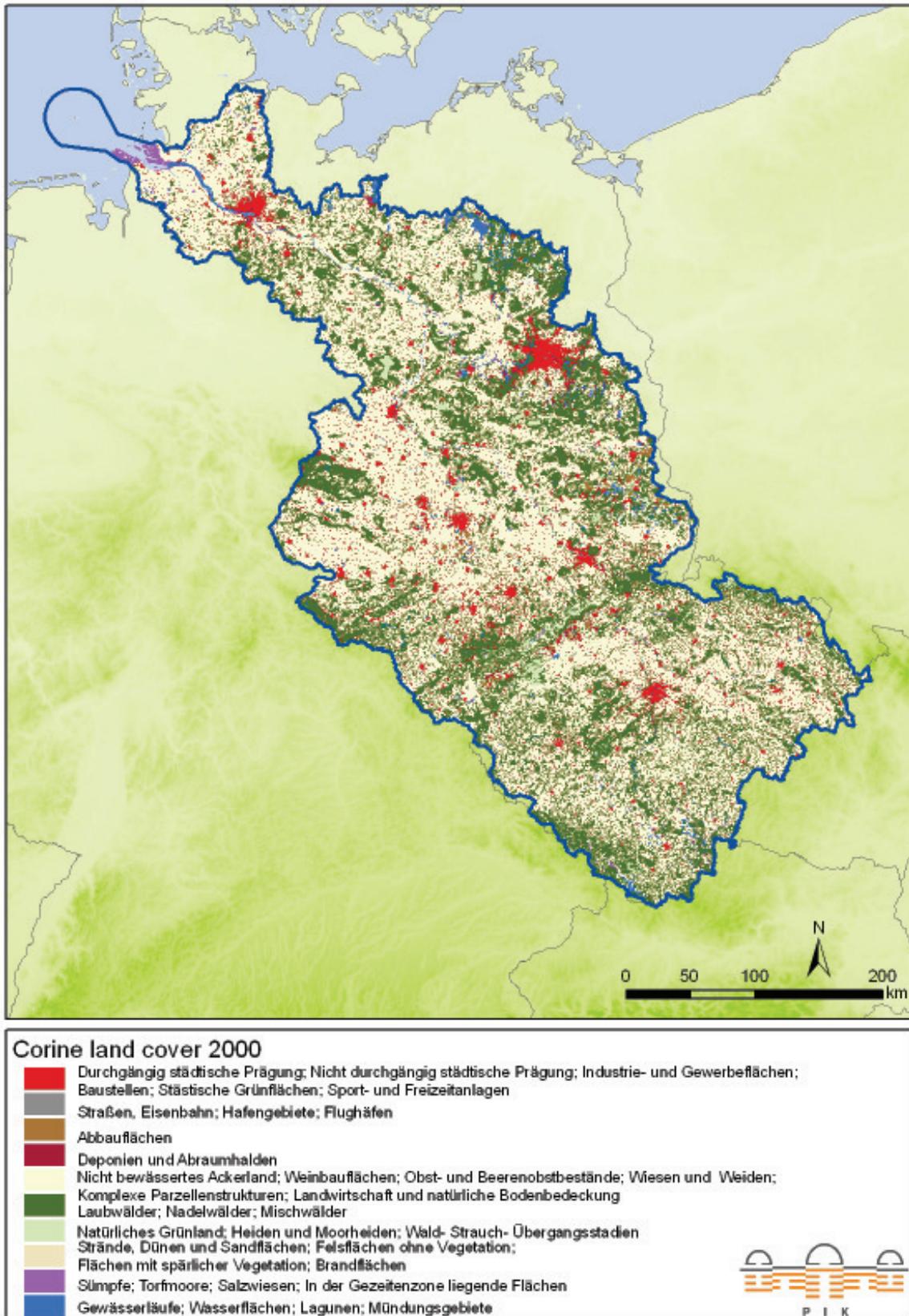


Abb. 2.7: Verwendetes Modell für die Landnutzung (Corine land cover)

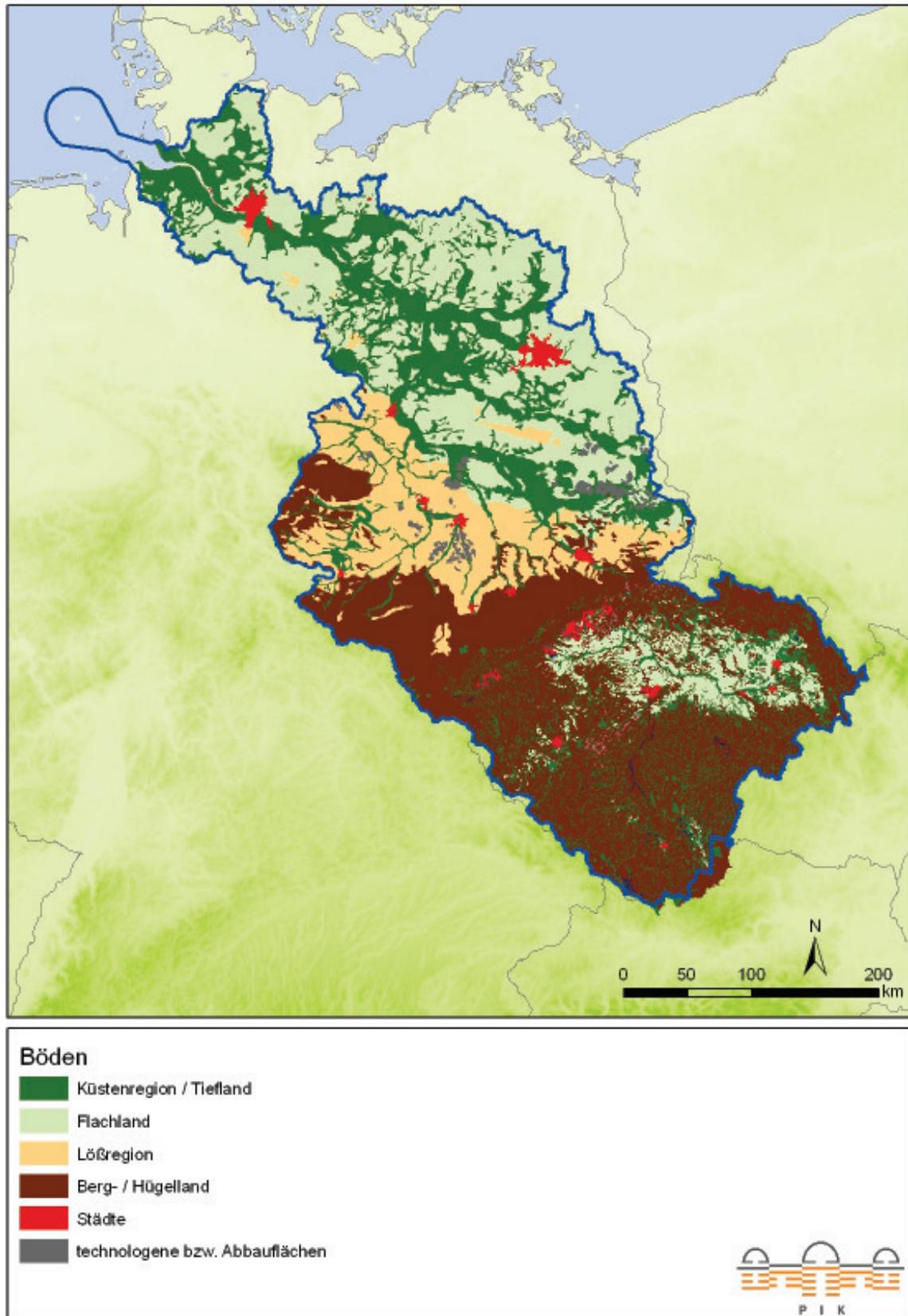


Abb. 2.8: Verwendetes Bodenmodell für die hydrologischen Simulationen

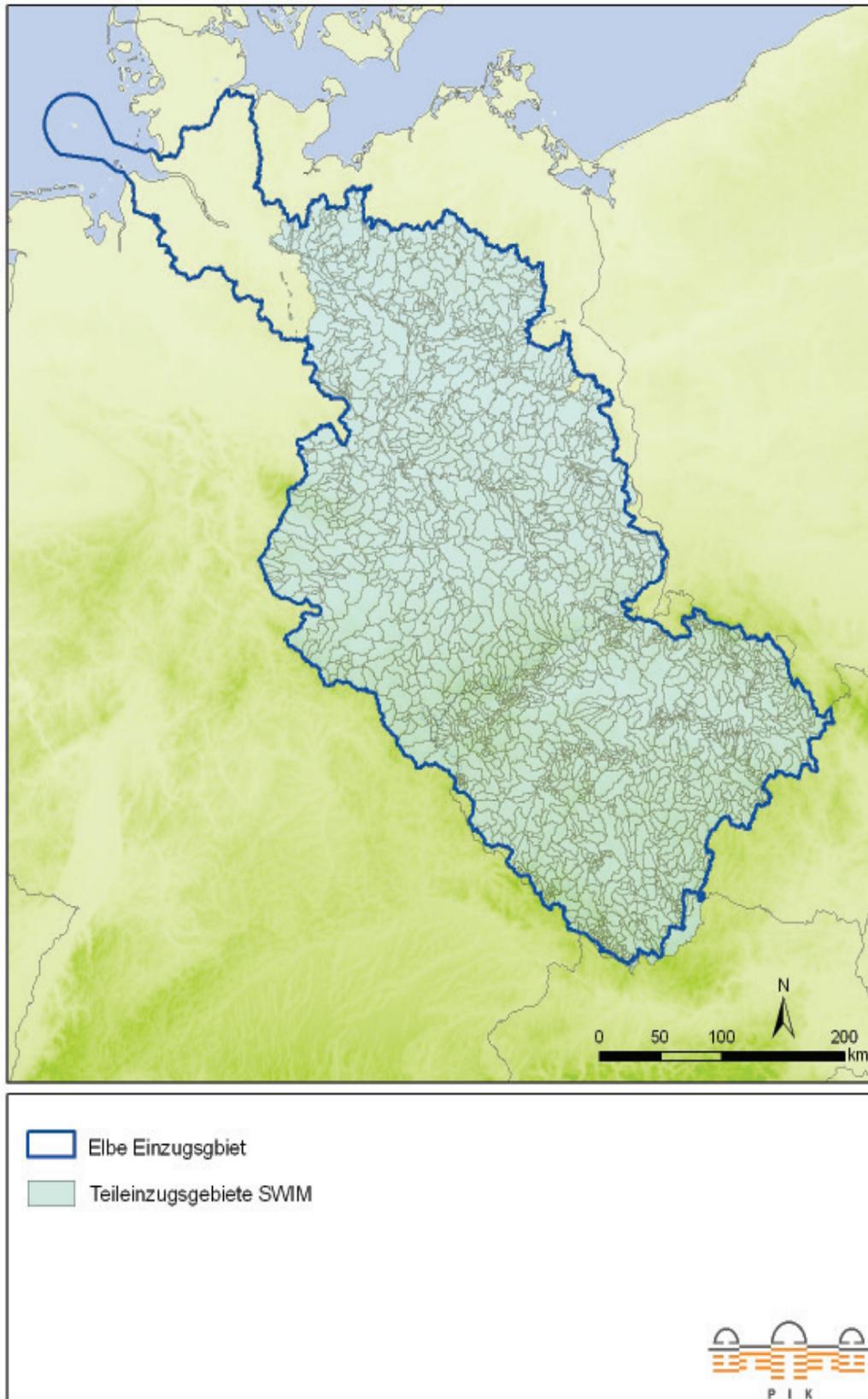


Abb. 2.9: Verwendete räumliche Informationen der SWIM-Teileinzugsgebiete für die hydrologischen Simulationen

Alle räumlichen Daten (Landnutzungs- und Bodeninformationen, Teileinzugsgebietsgrenzen und digitales Geländemodell) wurden im Projekt GLOWA-Elbe in ein einheitliches Rasterformat mit einer Zellengröße von 250 m überführt. Grundlage der Bodenparameter ist die deutsche Bodenübersichtskarte (BUEK 1000¹), Grundlage der Landnutzungsdaten die CORINE 2000-Klassifikation². Insgesamt werden 109 unterschiedliche Leitbodentypen und 15 Landnutzungstypen unterschieden. Die Teileinzugsgebietsgrenzen stammen vom Umweltbundesamt in Berlin³ (2.268 für das Elbeeinzugsgebiet bis zum Pegel Neu Darchau). Für die Modellierung standen meteorologische Daten von Klimastationen und Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung, welche am PIK weiter aufbereitet wurden (s. Kap. 1.2.1. und Kap. 1.2.2.). Vier unterschiedliche Verfahren zur Interpolation der Klimadaten wurden verglichen (Thiessen-Polygone, Inverse Distance, Ordinary Kriging und External Drift Kriging). Durch eine Kreuzvalidierung wurden die für die jeweiligen Klimavariablen am besten geeigneten Verfahren ermittelt. Es zeigte sich, dass das Verfahren Inverse Distance bei der Dichte der verfügbaren Daten eine ähnlich gute Qualität wie die geostatistischen Verfahren ergab, aber deutlich weniger rechenintensiv und damit „schneller“ ist, was für stochastische Anwendungen (multiple Realisationen pro Klimaszenario) von Bedeutung ist.

Als Klimarandbedingung für die Projektionen in die Zukunft bis zum Jahr 2060 dienten die unter Kapitel 1.3 beschriebenen Ergebnisse des regionalen Klimamodells STAR.

Zur Simulation des Nutheeeinzugsgebietes wurde eine einheitliche Aufbereitung der Eingangsdaten (Boden, Landnutzung, Grundwasserflurabstand und Einzugsgebiete) in einem 50 m Raster vorgenommen. Auch hier wurden multiple Realisationen pro Szenario durchgeführt.

¹ Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK N2.3), BGR, Hannover, Stand 2007

² CORINE Land Cover 2000, Umweltbundesamt, DLR-DFD 2004

³ Einzugsgebiete des DLM1000 W (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Umweltbundesamt), Version: Juni 2004

2.2.2.3. Modellierungsstrategie

Die simulierten Abflüsse des Modells SWIM wurden im Projekt GLOWA-Elbe an verschiedenen Pegeln mit den beobachteten Abflüssen verglichen, von denen allerdings nur Havelberg im Projektgebiet liegt. Für den später im Fokus stehenden Fluss Nuthe sei auf die Ergebnisse im Kapitel 2.3.2.2 verwiesen.

Um einen Vergleich der ortsbezogenen Ergebnisse z.B. zur lokalen Abflussbildung treffen zu können, wurden die Resultate für den Referenzzeitraum außerdem mit den Werten des Hydrologischen Atlases Deutschlands (HAD) und der Wasserhaushaltsmodellierung (Hattermann, et al. 2008) verglichen. Für die langjährige Abflusspende stimmen die Werte auch in der räumlichen Verteilung gut überein. Zur Untersuchung der Klimawirkungen auf den Wasserhaushalt wurden die durch STAR simulierten 100 Klimarealisationen pro Temperatur-Szenario durch das Modell SWIM in Änderungen der hydrologischen Größen transformiert (Verdunstung, Grundwasserneubildung, Gebietsabfluss etc.). Da auf diese Weise alle Klimarealisationen auch in der hydrologischen Analyse genutzt wurden, hat man ebenso 100 mögliche Realisationen der Klimafolgen auf den Wasserhaushalt. Diese wurden genutzt, um zusätzlich Aussagen über die Robustheit der Simulationsergebnisse machen zu können (gibt es z.B. Ausreißer, stimmen alle Realisationen in einem bestimmten Trend überein?). Der Ergebnisteil stellt diese Bandbreite an möglichen zukünftigen Gebietsabflüssen dar und erläutert sie. Eine weitere Konsistenzprüfung erfolgte mit Ergebnissen aus anderen Studien.

Das Modell STAR gibt die statistischen Kennwerte des Klimas des Referenzzeitraumes 1961-1990 sehr gut wieder (Orlowsky et al. 2008). Verglichen wurden für die in den folgenden Kapiteln dargestellten Analysen immer die jeweiligen Simulationsergebnisse unter STAR-Klima für die Szenarienperioden 2011-2040 und 2031-2060 gegen die hydrologische Dekade 1961-1990 als Referenzzeitraum.

2.3. Ergebnisse

2.3.1. Kalibrierung und Parametrisierung für den Referenzzeitraum

Zur Simulation der hydrologischen Verhältnisse im Elbeeinzugsgebiet im Projekt GLOWA-Elbe mussten zunächst die entsprechenden Beobachtungsdaten für die Modellierung aufbereitet werden.

Außerdem mussten die Abflussdaten, an denen das Modell eingestellt wurde, umfangreich auf anthropogene Einflüsse untersucht werden. Grund dafür ist, dass nur die Änderungen in der natürlichen Abflussbildung untersucht werden sollten und gewährleistet werden musste, dass anthropogenes Management nicht in die Parametrisierung für den Referenzzeitraum einfließt. Im Einzugsgebiet der Havel ist z.B. der Einfluss der Sümpfungswässer aus dem Lausitzer Braunkohletagebau zu nennen, welcher den gemessenen Abfluss in der Havel anthropogen bedingt

erhöht. Für die genestete Untersuchung im Nutheinzugsgebiet wurde das Modell speziell für die Studie aufgesetzt und kalibriert. Da die Nuthe über die Havel in die Elbe entwässert, sind Übereinstimmungen zwischen den simulierten und beobachteten Ergebnissen sowohl des absoluten Durchflusses als auch der saisonalen Abfolge an einer Pegelmeßstellen für die Elbe (Neu-Darchau) und der Nuthe (Babelsberg) von Bedeutung. Wie man in Abb. 2.10 sieht, ist das Modell in der Lage, die beobachteten saisonalen Abflüsse im Referenzzeitraum in der Nuthe und Elbe gut wiederzugeben. Bei der Interpretation der Modellergebnisse für die Abflüsse der Nuthe muss allerdings erwähnt werden, dass es sich bei ihr um einen stark regulierten Fluss handelt und damit in der Regel der natürliche Abfluss anthropogen überprägt ist. Die Saisonalität des Abflusses, also hohe Abflüsse im Winter und geringe im Sommer, bleibt aber trotz Management erhalten (s. Abb. 2.10).

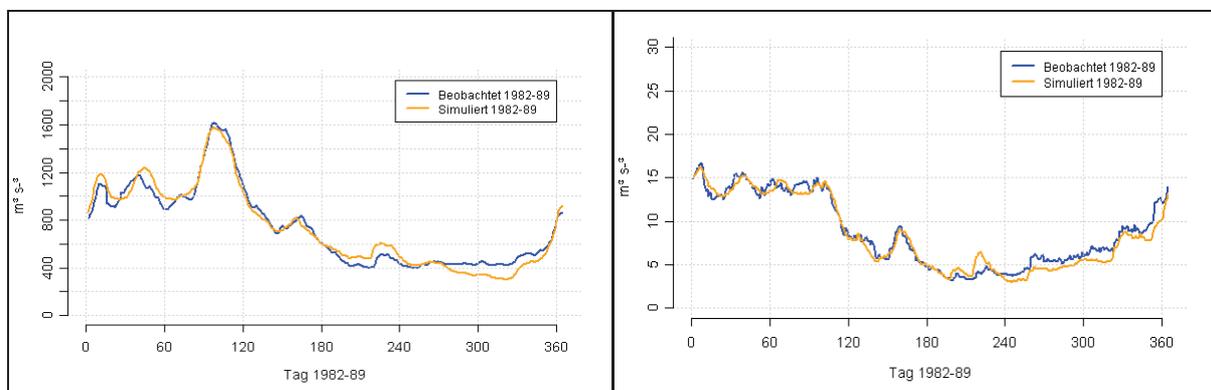


Abb. 2.10: Langjähriges Mittel des simulierten und beobachteten täglichen Abflusses für die Elbe am Pegel Neu Darchau (links) und für die Nuthe am Pegel Babelsberg für die Periode 1981-1989

2.3.2. Klimafolgen für den Wasserhaushalt unter STAR-Szenarienbedingungen

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Klimafolgen für die Elbe und die Nuthe, berechnet durch das Modell SWIM unter STAR-Szenarienbedingungen, jeweils als Unterschied der mittleren täglichen Abflüsse der Jahre 1961-1990 und 2011-2040 und 2031-60.

2.3.2.1. Die Elbe

Abb. 2.11 zeigt zunächst die Klimafolgen für die Elbe am Pegel Neu Darchau im Vergleich der Periode 2031-60 gegen die Periode 1961-90 und das 2K-Szenario. Da für das Szenario 100 Klimarealisationen vorlagen, konnten auch 100 hydrologische Simulationen mit sonst gleichbleibender Parametrisierung durchgeführt werden. Das Ergebnis zeigt eine Verschiebung der Abflusskurve zu früheren Hochwassern schon im Februar, einen früheren Rückgang der Abflüsse schon im

zeitigen Frühjahr, da durch die höheren Temperaturen sich auch die Pflanzen früher entwickeln und eine insgesamt ausgeprägtere und länger andauernde Trockenphase im Sommer. Im Frühjahr und Herbst liegen alle 100 mittleren täglichen Abflüsse für die Periode 2031-60 unter denen der Referenzperiode 1961-90.

Insgesamt ist ein Rückgang der mittleren, täglichen Abflüsse im Vergleich zur Referenzperiode von 1961-90 zu beobachten. Auch die Dauer der hohen, täglichen Abflüsse verkürzt sich Anfang des Jahres um ca. einen Monat. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Kurven einen langjährigen täglichen Durchschnitt zeigen. Einzelne Tageswerte sind extremer, sowohl was Hoch- als auch was Niedrigwasser betrifft.

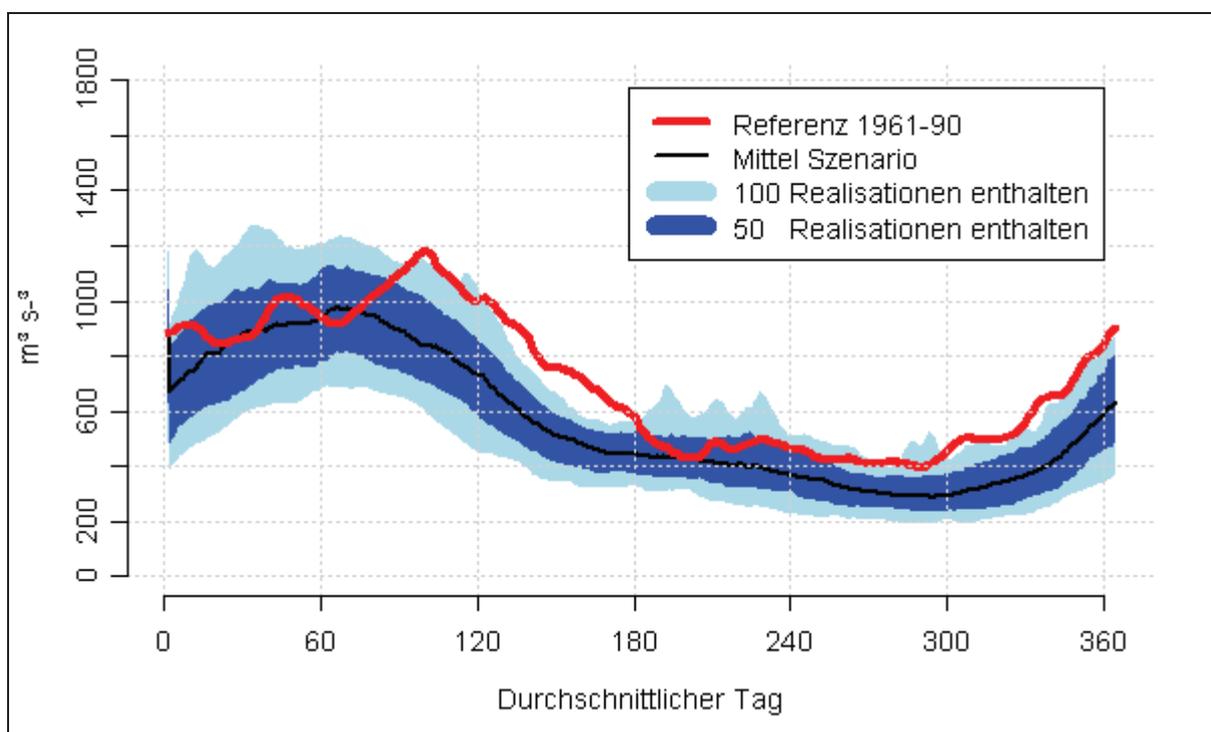


Abb. 2.11: Abflussentwicklung in der Elbe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 2K (STAR, 100 Realisationen), Änderungen der durch SWIM simulierte, mittleren täglichen Abflüsse der Elbe im Jahresverlauf am Pegel Neu Darchau unter Szenarienbedingungen als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2031-2060 (100 Realisationen).

Abb. 2.12 zeigt die Änderung in der Verdunstung und der Grundwasserneubildung im Vergleich der zweiten Szenarienperiode zum Referenzzeitraum in Form von Karten für die Projektregion im 2K-Szenario. Die Verdunstung steigt in den westlichen Regionen des Landes Brandenburg an. Im Osten Brandenburgs, wo aufgrund der rückläufigen Niederschläge das Wasserdargebot fällt und damit insgesamt weniger Wasser für die Verdunstung zur Verfügung steht, sinkt die Verdunstung dagegen.

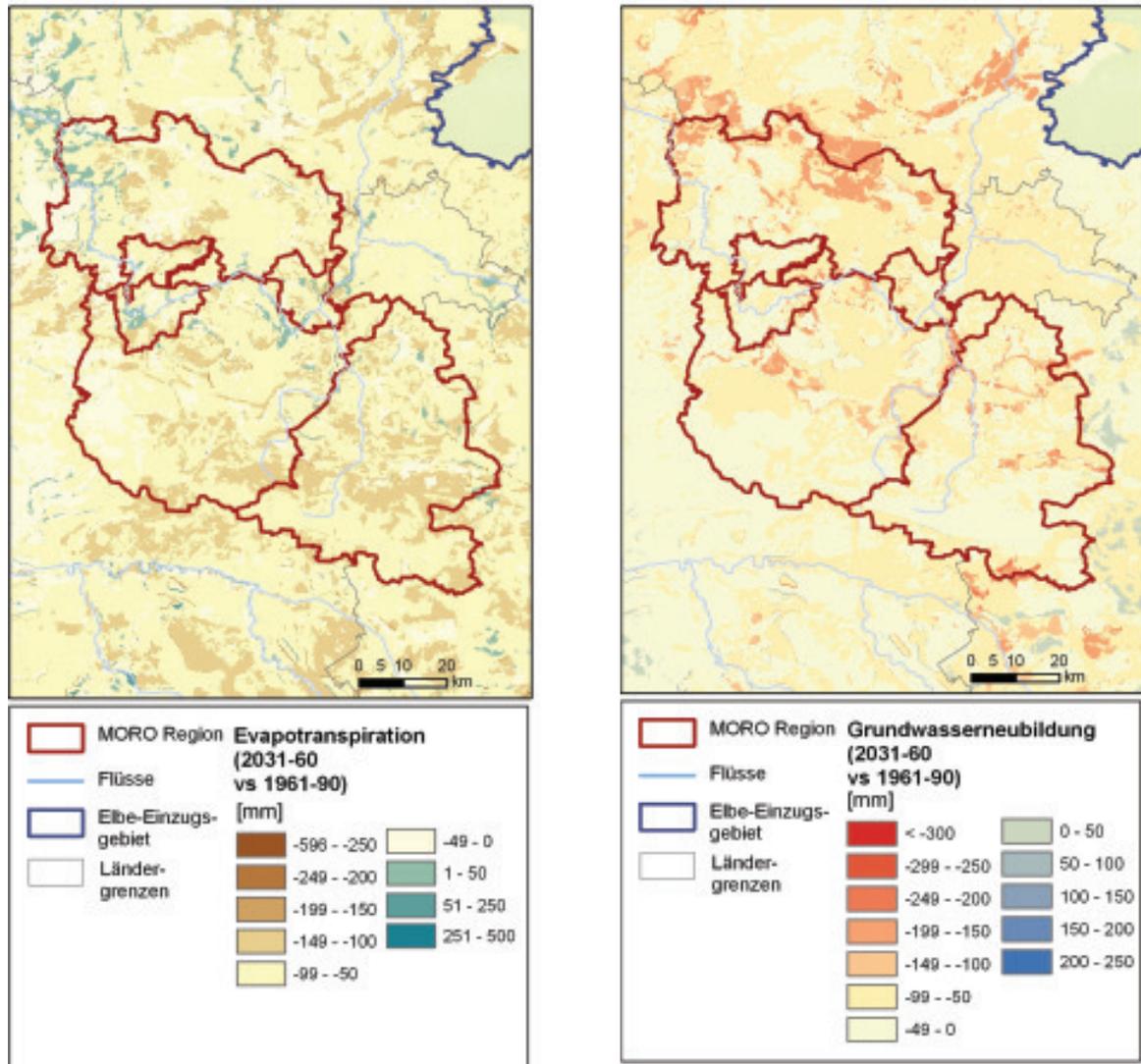


Abb. 2.12: links: Differenz in der Verdunstung für die Jahre 2031-60 gegenüber 1961-90 im 2K Szenario, (Mittel von 100 simulierten Werten), rechts: Differenz in der Grundwasserneubildung für die Jahre 2031-60 gegenüber 1961-90 im 2K Szenario, (Mittel von 100 simulierten Werten)

Grundwasserneubildung ist das Restglied der lokalen Wasserbilanz und als solche besonders sensitiv gegenüber Änderungen im Niederschlag oder in der Verdunstung. Die Grundwasserneubildung fällt in praktisch allen Regionen im Projektgebiet. Nur dort, wo insgesamt mehr Niederschlag fällt, steigt die Grundwasserneubildung etwas. Besonders stark ist der Rückgang in der zweiten Szenarienperiode.

2.3.2.2. Die Nuthe

Für das Nutheinzugsgebiet wurde beispielhaft eine höher aufgelöste Modellierung durchgeführt, da die Nuthe einer der wenigen Flüsse ist, welche mit ihrer vollen Laufstrecke im Projektgebiet liegen. Die Abb. 2.13 zeigt die Änderungen

der Grundwasserneubildung als Vergleich der Periode 2011-60 gegen die Referenzperiode 1981-90 als Karten für das Einzugsgebiet und für das 2°C Temperaturszenario.

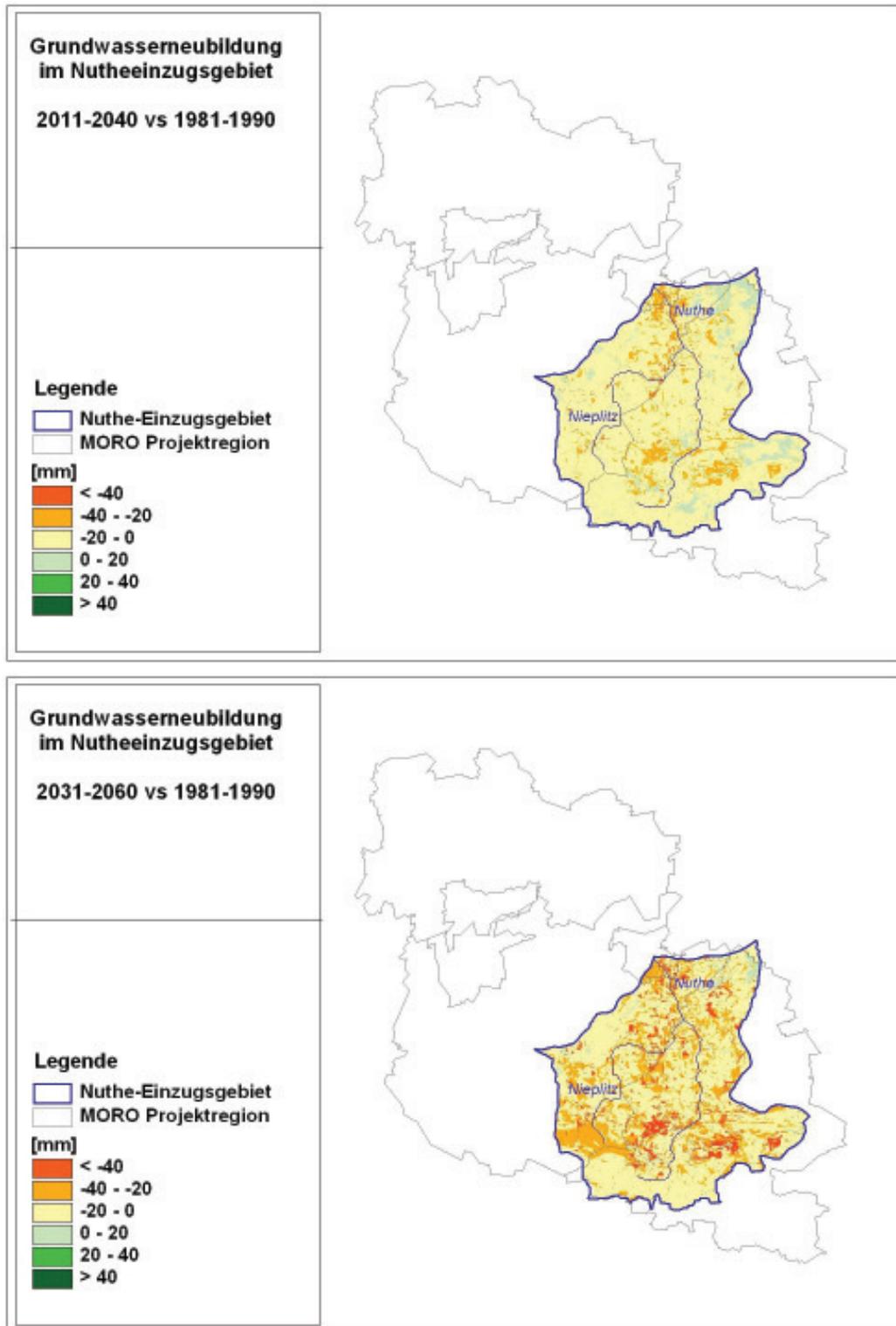


Abb. 2.13: Entwicklung der Grundwasserneubildung in der Nuthe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 2K (STAR, Mittel aus 100 Realisationen) als Vergleich der mittleren simulierten Werte 1981-1990 und der Szenarienperiode 2011-2040 links und 2031-2060 rechts (Mittel aus jeweils 100 Realisationen).

Aufgrund des teilweisen Rückganges der Niederschläge bei gleichzeitiger Zunahme der Verdunstung geht in den meisten Bereichen des Einzugsgebietes die Grundwasserneubildung zurück, in einigen Regionen sogar bis zu 40 mm pro Jahr. Dieser Rückgang wird sich zur Mitte des Jahrhunderts verstärken.

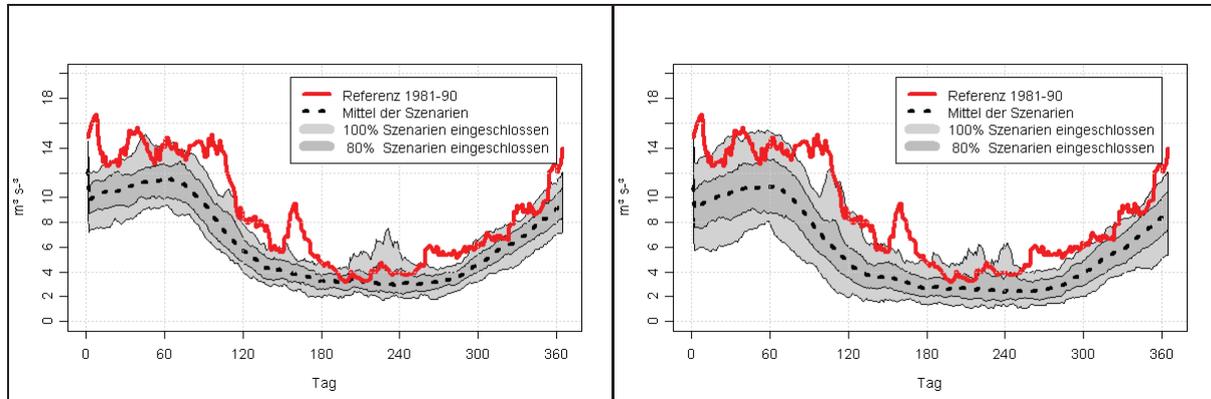


Abb. 2.14: Abflussentwicklung in der Nuthe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 2K (STAR, 100 Realisationen), Änderungen der durch SWIM simulierte, mittleren täglichen Abflüsse der Nuthe im Jahresverlauf am Pegel Babelsberg unter Szenarienbedingungen, links als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1981-1990 und der Szenarienperiode 2011-2040 (100 Realisationen) und rechts als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1981-1990 und der Szenarienperiode 2031-2060 (100 Realisationen)

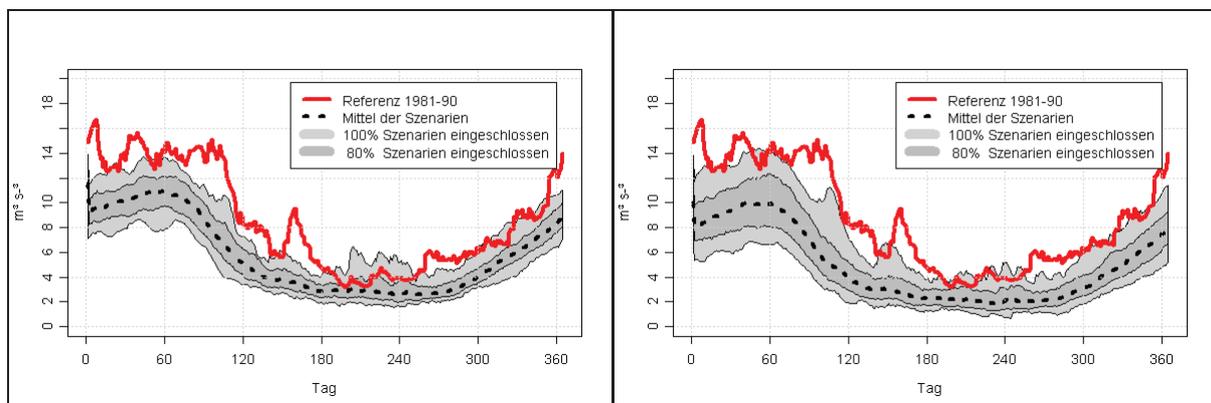


Abb. 2.15: Abflussentwicklung in der Nuthe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 3K (STAR, 100 Realisationen), Änderungen der durch SWIM simulierte, mittleren täglichen Abflüsse der Nuthe im Jahresverlauf am Pegel Babelsberg unter Szenarienbedingungen, links als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1981-1990 und der Szenarienperiode 2011-2040 (100 Realisationen) und rechts als Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1981-1990 und der Szenarienperiode 2031-2060 (100 Realisationen)

Die Abb. 2.14 und Abb. 2.15 zeigen die Klimafolgen für die Nutheabflüsse am Pegel Babelsberg jeweils im Vergleich der Perioden 2011-40 und 2031-60 gegenüber der Referenzperiode 1981-90 für das 2K und 3K Szenario. Wie auch in der Gesamtelbe verschiebt sich die Saisonalität der Abflüsse in beiden Szenarien. In der Nuthe ist zudem ein deutlicher Rückgang der Gesamtabflussmenge zu erkennen. Vergleicht man die unterschiedlichen Szenarienperioden, so wird deutlich, dass in der zweiten Szenarienperiode die sommerlichen Abflüsse noch stärker zu-

rückgehen und dass zusätzlich die Bandbreite der Ergebnisse größer und damit die Ergebnisse unsicherer werden. Es ist dabei wieder darauf zu achten, dass die Kurven einen langjährigen täglichen Durchschnitt zeigen. Einzelne Tageswerte sind extremer, sowohl was Hoch- als auch was Niedrigwasser betrifft.

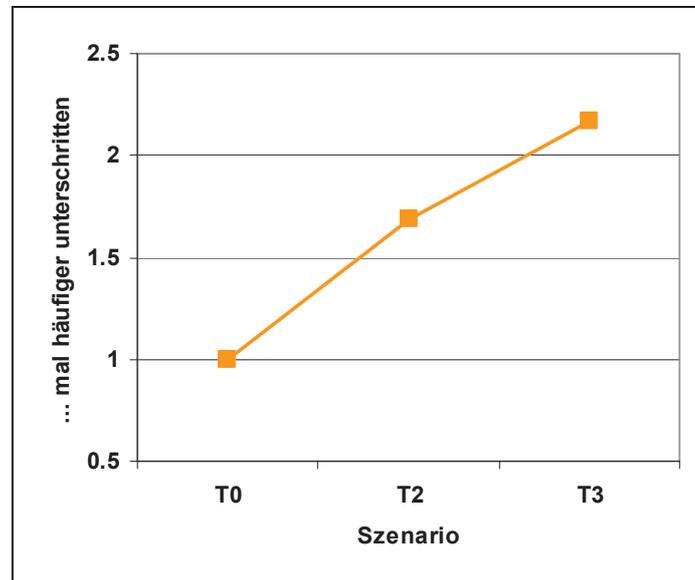


Abb. 2.16: Anzahl der Tage mit einem Abfluss geringer als durchschnittlich $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ für die STAR-Temperatur szenarien T0, T2 und T3 (Anstieg der Temperatur um 0K, 2K und 3K) für die Periode 2031-60

Abb. 2.16 zeigt eine verdichtete Auswertung der Szenarienergebnisse für die Nuthe: Für die beiden Szenarienperioden und für jedes Temperaturszenario wurde die Anzahl der Tage mit mittleren Abflüssen von unter $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ errechnet, wobei das Temperaturszenario T0 als Referenz (also 100 % oder 1) gilt. Deutlich wird, dass dieser Indikator für die Niedrigwasserabflüsse deutlich mit der Temperatur des Szenarios ansteigt.

2.3.3. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf

Für die Berechnung der Folgen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in einer Region müssen Modelle angewandt werden, welche die wesentlichen hydrologischen Prozesse in der Landschaft abbilden. Trotzdem erfordert jede Modellbildung immer eine Abstraktion und Vereinfachung. Kein Modell kann also die Wirklichkeit vollkommen abbilden. Im Folgenden sollen zur besseren Einordnung der Ergebnisse einige Limitierungen in der für das Projektgebiet durchgeführten hydrologischen Modellierung und deren mögliche Auswirkungen auf die Ergebnisse genannt werden. Diese Limitierungen ergeben sich z.B. aufgrund der verwendeten Klimadaten und aufgrund zukünftiger Randbedingungen, welche nicht in der Modellierung abgebildet wurden.

Um die Entwicklung der Wassermengen in den für Brandenburg wichtigen Flüssen wie der Elbe, der Havel und der Nuthe untersuchen zu können, musste deren gesamtes Einzugsgebiet, welches größtenteils nicht im Projektgebiet liegt, im Modell abgebildet werden. Das hatte zur Folge, dass auch überregionale Datenquellen für den Modellaufbau verwendet wurden, obwohl für Brandenburg selbst teilweise Daten in besserer Auflösung vorhanden wären (z.B. die Bodenkarte). Die Kombination dieser Datenquellen hätte zu inkonsistenten Ergebnissen geführt. Daher sollte beachtet werden, dass die in diesem Kapitel gemachten Aussagen immer für eine Region stehen und keinesfalls als sehr lokale Planungsgrundlage dienen können. Trotzdem wurde mit der genesteten Modellierung für das Nutheinzugsgebiet versucht, Aussagen für ein rein im Projektgebiet liegendes Einzugsgebiet zu erlangen.

Das verwendete Modell SWIM berechnet die hydrologischen Flüsse im Tagestakt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da auch die überwiegende Zahl der Klimadaten nur als tägliche Information zur Verfügung steht.

Ein ebenfalls relativ robustes Signal scheint die Abnahme der Abflüsse im Sommer zu sein, da diese auch in anderen Studien bestätigt wird. Dem stehen allerdings teilweise andere Studien entgegen (Hattermann et al. 2010), die mit dynamischen Klimamodellen als Randbedingung arbeiten. Zwar steigt hier oft die Varianz der Ergebnisse, aber die Abflüsse im Sommer nehmen kaum oder gar nicht ab.

Eine weitere Unsicherheit stellt die mögliche Entwicklung in der zukünftigen Landnutzung dar. Unter Klimawandel wird es z.B. möglich sein, zweimal Ackerfrüchte im Jahr zu kultivieren. Dadurch erhöht sich die Wasseraufnahme durch die Pflanzen. Unter diesen Bedingungen würden die Abflüsse im Sommer noch einmal deutlich zurückgehen (s. z.B. Projekt GLOWA-Elbe). Da es aber sehr spekulativ ist, wie die vorhandenen Agrarflächen in Zukunft bewirtschaftet werden, z.B. in Hinsicht auf eine Ausweitung der bewässerten Flächen, gingen diese Randbedingungen nicht in die obigen Kapitel ein. Insgesamt kann man sagen, dass die hier diskutierten Landnutzungsänderungen die Wasserressourcen im Sommer eher stärker beanspruchen würden und dadurch zu einer geringeren Grundwasserneu- und Abflussbildung führen würden.

2.3.4. Zusammenfassung

Für die zukünftige Klimaentwicklung lautet das übergreifende Ergebnis vieler Studien (IPCC 2007, Leipprand, et al. 2008), dass sich trotz der bestehenden Unsicherheiten über die Stärke des Klimaänderungssignals der allgemeine Klimaänderungstrend fortsetzen oder verstärken wird, wobei regionale Ausprägungen eine Rolle spielen. Die Folgen für die Wasserwirtschaft in Brandenburg sind deutlich abzusehen, können je nach Region und Sektor unterschiedlich ausgeprägt sein und sollten im Sinne eines nachhaltigen Ressourcenmanagements in der

wasserwirtschaftlichen Planung berücksichtigt werden. Diese Studie soll dazu dienen, die nötigen Hintergrundinformationen zu liefern.

Der Fokus des Interesses lag bisher meist auf Änderungen im Niederschlag und dessen Auswirkungen, welche noch am ehesten Rückschlüsse auf den Landschaftswasserhaushalt zulassen. Übersehen wird dabei oft, dass in vielen Regionen Europas Änderungen in der Verdunstung einen ähnlich starken Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt haben (Hattermann, et al. 2007). Diese können durch Trends im regionalen Energiehaushalt, d.h. insbesondere durch Änderungen in der Temperatur und der Strahlung, hervorgerufen werden. Während die Szenarientrends für den Niederschlag, errechnet durch globale oder regionale Klimamodelle, für regionale Anwendungen noch relativ unsicher sind, erweisen sich die Trends der Temperatur in den Szenarien als relativ robust. Daraus lassen sich für die Bewirtschaftung der Wasserressourcen in Brandenburg wichtige Folgerungen ableiten:

Durch die steigenden Temperaturen wird die Evapotranspiration in Zukunft stimuliert, und zwar sowohl durch den direkten Energieinput, als auch durch die gesteigerte Vegetationsaktivität.

Auch in Gebieten, in denen insgesamt der Niederschlag nicht abnimmt oder sogar leicht zunimmt, kann dadurch trotzdem das Wasserdargebot sinken.

Grundwasserneubildung ist das Restglied der lokalen Wasserbilanz und als solches besonders sensitiv gegen Änderungen im Niederschlag oder in der Verdunstung.

Wichtig sind saisonale Trends: Insbesondere im Sommer kann aufgrund der verstärkten Transpiration und zurückgehender Niederschläge Wasserknappheit auftreten.

Hochwasserspitzen im Frühling treten früher und oft auch höher auf, da die Schneeschmelze früher einsetzt.

Verschiedene Autoren beschreiben einen wahrscheinlichen Zusammenhang zwischen dem global beobachteten Anstieg der Niederschläge und den gestiegenen Temperaturen (Kundzewicz und Schellnhuber 2004). Abb. 2.17 zeigt schematisch die möglichen Änderungen im Abflussregime eines mitteleuropäischen Flusses unter Klimawandel, wie sie auch in Brandenburg angetroffen werden, wobei als Klimaänderungssignal nur eine Temperaturerhöhung angenommen wird. Durch die frühere Schneeschmelze wird der maximale Monatsabflussscheitel früher im Jahr erreicht. Je nach Flusseinzugsgebiet und orografischen Verhältnissen kann der Winterabfluss durch die frühere Schneeschmelze insgesamt ansteigen, was einen Anstieg der kleinen bis mittleren Hochwasser zur Folge haben würde. Danach fällt der Abfluss relativ schnell, da der Schneespeicher aufgezehrt ist.

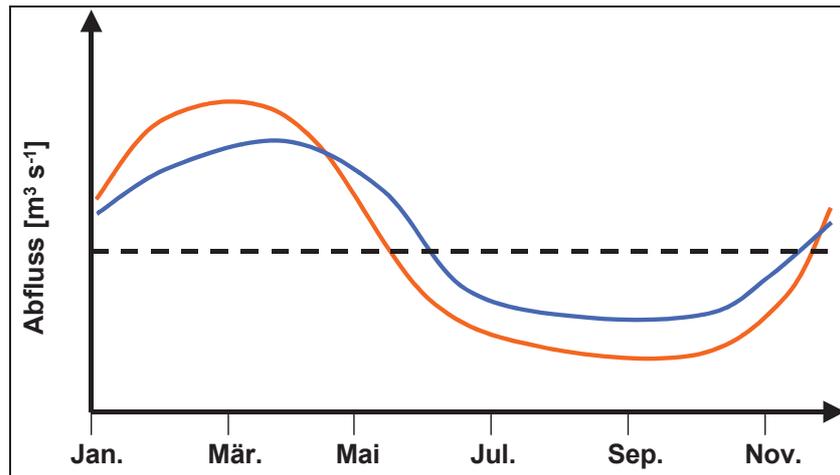


Abb. 2.17: Schematische Darstellung der Änderung des natürlichen Abflussregimes unter Temperaturanstieg in Mitteleuropa. In blau: Abfluss ohne Klimaänderung; in rot: Abfluss unter Klimawandel

Im Sommer fallen die monatlichen Abflüsse unter die durchschnittlichen Abflüsse ohne Klimaänderung (bzw. Temperaturerhöhung), weil durch die höheren Temperaturen die Verdunstung stimuliert wird, nicht nur aufgrund der höheren Wasseraufnahmefähigkeit der Atmosphäre, sondern auch aufgrund des intensivierten Pflanzenwachstums und dadurch größeren Wasserbedarfs der Vegetation. Dieser Rückgang der sommerlichen Abflüsse ist besonders deutlich in der Havel zu beobachten. Diese grundsätzlichen Änderungen unter Klimawandel werden für verschiedene Flüsse Mitteleuropas durch zahlreiche andere Studien bestätigt (Schröter 2004, IPCC 2007). Allerdings kann durch stark zunehmende Niederschläge, wie sie z.B. unter REMO-Szenarienbedingungen projiziert werden, der Hydrograph für die Zukunft insgesamt zu höheren Abflüssen verschoben werden.

Box 2.2: Die mögliche Rolle der europäischen Rahmenrichtlinien in der Umsetzung der Anpassungsstrategien in der wasserwirtschaftlichen Planung

Für die europäische Hochwassermanagementrichtlinie gilt, dass der Klimawandel explizit Eingang in die Aufstellung der Risikokarten und Bewirtschaftungspläne finden soll (Leipprand, et al. 2008). Es wird darum für die Projektregion angeraten, die Umsetzung der Rahmenrichtlinie als Plattform für eine nachhaltige Anpassung der technischen und strukturellen Infrastruktur an den Klimawandel und damit verbundene Änderungen im Hochwassergeschehen zu nutzen, zumal die Richtlinie ausdrücklich eine einzugsgebietsweite Planung verlangt, wie sie nicht allein durch das Bundesland durchgeführt werden kann. Wichtig sind hier z.B. die Oberlieger Thüringen (Saale), Sachsen und Tschechien (Elbe). Dies schließt nicht aus, dass Maßnahmen, welche auf bundesstaatlicher Ebene durchgeführt werden, nicht schon vor Abschluss der Beratungen zur Umsetzung der Rahmenrichtlinie umgesetzt werden können. Dazu müssten durch hydraulische Modelle die Designhochwasser HQ100 etc. neu berechnet werden. Allerdings ist es fraglich, wie ein Hochwasser mit bestimmtem Wiederkehrintervall unter nichtstationären Randbedingungen wie dem Klimawandel definiert werden muss.

Für die europäische Wasserrahmenrichtlinie dagegen gilt, dass sie im Wesentlichen auf eine Verbesserung des ökologischen Zustandes der Oberflächengewässer (und des guten chemischen Zustandes der Grundwasserkörper) abzielt. Wichtige Elemente der Richtlinie werden aber durch den Klimawandel betroffen und die Leitidee der Einbeziehung aller Akteure und Nutzer auf Einzugsgebietsebene muss auch für eine nachhaltige Anpassung an den Klimawandel gelten. So kann der Klimawandel z.B. zur häufigeren Unterschreitung des ökologischen Mindestabflusses führen und Feuchtgebiete können unter Klimawandel ihren Feuchtgebietsstatus verlieren. Außerdem beeinflusst ein geändertes Abflussregime die Nähr- und Schadstofffrachten und -konzentrationen. Höhere Wassertemperaturen stimulieren das Algenwachstum und beeinflussen das Wanderverhalten von Fischen. Zusätzlich sinkt durch mehr Algenwachstum und durch die höheren Temperaturen der Sauerstoffgehalt der Gewässer.

Es wird also empfohlen, den Klimawandel in die Implementierung der Flusseinzugsgebietsmanagementpläne einzubeziehen, da dadurch der integrative Charakter der Rahmenrichtlinie auch für die Findung und Umsetzung der Anpassungsstrategien genutzt werden kann. Dies wird wahrscheinlich nicht in der ersten Phase der Umsetzung gelingen, allerdings sollten mögliche Anpassungen in den folgenden sechsjährigen Iterationen stärker berücksichtigt werden.

2.3.5. Anpassungsoptionen

Problematisch bei der Formulierung von Anpassungsempfehlungen sind die bestehenden Unsicherheiten in der Projektion möglicher Klimafolgen auf den Wasserhaushalt. Tatsächlich zeigen die im obigen Kapitel beschriebenen Änderungen in der Abflussbildung und den Abflussregimen trotz der bestehenden Unsicherheit unter STAR-Klimaten allerdings einige robuste Trends, welche zur Vorsorge Anlass geben und in einer ersten Anpassungsphase berücksichtigt werden sollten. Zu diesen gehören:

Früherer Eintritt der Schneeschmelzphase und damit verbunden der frühere und teilweise höhere Anstieg und frühere Abfall der winterlichen Abflüsse, wie z.B. die Simulationsergebnisse für die Saale zeigen. Dieser Effekt ist umso stärker, je größer der Anteil von Mittelgebirgslagen an der Einzugsgebietsfläche, also umso ausgeprägter der nivale Charakter des Abflussregimes ist.

Früher im Jahr einsetzender Abfall der Frühjahresabflüsse, besonders im Havel-einzugsgebiet in einigen Gebieten verbunden mit deutlich häufigeren Niedrigwasserereignissen im Sommer bis in den frühen Herbst hinein.

Verschiedene Maßnahmen zur Anpassung der Wasserwirtschaft an die oben gelisteten Folgen des Klimawandels werden international (Leipprand, et al. 2008) und national diskutiert. Diese Anpassungsmaßnahmen können auf verschiedenen Ebenen erfolgen, z.B. auf staatlicher und bundesstaatlicher Ebene, auf der Ebene von Kommunen und auf der Ebene von Unternehmen. Wichtig für eine nachhaltige Vermeidung von Klimafolgen auf den Wassersektor und eine flexible Vorsorge dabei ist, dass: die verschiedenen Akteure und Maßnahmen in ein Gesamtkonzept integriert werden. Dieses sollte auch über staatliche Grenzen hinaus auf eine Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes oder einer gesamten Region abzielen.

Eine solche integrierte Betrachtung auf überregionaler Einzugsgebietsebene wird z.B. durch die europäische Wasserrahmenlinie und die europäische Hochwassermanagementrichtlinie gefordert. Zur Formulierung einer weitergehenden Brandenburg-spezifischen Anpassungsstrategie, aufbauend auf dieser Studie, sollten außerdem die regionalen Workshops im Zuge der Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinien genutzt werden, an denen Experten, Betroffene und Interessenvertreter beteiligt sind.

Besonders vorteilhaft sind Maßnahmen, welche sowohl Hochwasservorsorge als auch Wassermangelvorsorge kombinieren. Sie finden bereits bei der Talsperrensteuerung in den Mittelgebirgen Anwendung, wo ein Teil des Stauraumes zur Trinkwasserspeicherung für das Abfangen von Hochwasserspitzen vorgehalten wird. Die Steuerregime können so relativ leicht auf neue Abflussverhältnisse um-

gestellt werden, sobald sich diese als robuste Ergebnisse aus den Klimaprojektionen ergeben oder schon beobachtet werden. Diese Maßnahmen werden bei verschiedenen Wasserversorgern schon jetzt als Reaktion auf die Klimawandeldiskussion umgesetzt und sollten weiter untersucht werden. Teilweise kann auch der Stauraum insgesamt erhöht werden (siehe z.B. (Pinnekamp 2008)). Z.B. wird im Freistaat Bayern bei den Bemessungshochwassern für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen ein „Klimazuschlag“ angewendet: Hier ist das Bemessungshochwasser für die Schutzanlagen das so genannte 100-jährliche Hochwasser und bei neu begonnenen Anlagen rechnet man einen Klimazuschlag von 15 % dazu. Eine Erhöhung von Speicherraum zur Vorsorge gegen Trockenperioden kann auch durch verschiedene kleinere Maßnahmen umgesetzt werden, wie z.B. kleinere Staubecken, wie sie teilweise im Osten Deutschlands aufgrund der in früheren Jahrzehnten großflächig durchgeführten Bewässerung noch vorhanden sind und wieder reaktiviert werden könnten.

Verschiedene weitere Maßnahmen können darüber hinaus helfen, Trockenperioden entgegenzuwirken. Das Aufbrechen versiegelter Flächen verhindert z.B. eine zu schnelle Konzentration von Abflüssen bei Starkregenereignissen und unterstützt die Infiltration von Wasser und damit die Sickerwasserbildung. Es kommt zu einer höheren Grundwasserneubildung. Zusätzliche Auenbereiche und die Reaktivierung von Altarmen können ebenfalls Hochwasserspitzen abschwächen und zu mehr Grundwasserneubildung führen. Hier ist allerdings zu beachten, dass mehr Wasserflächen auch die Verdunstung erhöhen können.

Speziell zur Vermeidung von Wassermangelsituationen im Sommer sollten in sensitiven Gebieten, wie z.B. dem Einzugsgebiet der Havel, Maßnahmen zur Rückhaltung von Wasser im Winter getroffen werden. Dazu gehört unter anderem eine angepasste infrastrukturelle Vorsorge zur ausreichenden Bevorratung von Wasser in Talsperren und Grundwasserleitern oder zur Bereitstellung von Trinkwasser über Verbünde. Eine entscheidende Rolle spielt hier ein effizienteres und vernetztes Management wasserbezogener Nutzungen, sektorübergreifende Abstimmung von Anpassungsmaßnahmen und die Implementierung eines nachhaltigen Landnutzungsmanagements zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes sowie die Fortführung von Wassersparmaßnahmen in Industrie, Land- und Forstwirtschaft und in privaten Haushalten unter Beachtung der hygienischen Anforderungen und der versorgungs- und entsorgungstechnischen Voraussetzungen (Projekt WASKLIM, s. Box 2.3).

Speziell zur Verbesserung des Hochwasserschutzes muss die möglicherweise veränderte Intensität und Häufigkeit von Extremniederschlagsereignissen in der Planung wasserwirtschaftlicher Infrastruktur Berücksichtigung finden (Ergebnisse hierzu sind eventuell aus den Projekten „KLIWAS (s. Box 2.3) und „ExUS – Ex-

tremwertuntersuchung Starkregen zu erwarten, s. Box 2.3). Dies trifft z.B. auf die Kanalnetze der Wasserver- und Entsorger zu. Weitere Maßnahmen sind die Schaffung von Retentionsflächen und eine an Hochwasser angepasste Bauweise in überflutungsgefährdeten Gebieten (s. Box 2.3 WASKLIM). Wichtige Impulse sind zusätzlich von der Umsetzung der EU-Hochwassermanagementrichtlinie zu erwarten, welche im Gegensatz zur Wasserrahmenrichtlinie den Klimawandel ausdrücklich in die Leitlinien z.B. zur Ausweisung von Hochwasserrisikokarten mit einbezieht und ebenfalls eine einzugsgebietsweite, alle Akteure integrierende Planung fordert. Wichtig ist zudem die Erhöhung des Bewusstseins in der Bevölkerung für Hochwassergefahren.

Box 2.3: Weiterführende Informationen

Extremwertuntersuchung Starkregen (ExUS)

Gefördert durch: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV)
Nordrhein-Westfalen

Projektpartner: Ingenieurbüro aqua_plan GmbH (Aachen), Dr. Papadakis GmbH (Hattingen) sowie Hydro & Meteo GmbH & Co. KG (Lübeck)

Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel (WASKLIM)

Gefördert durch: Umweltbundesamt (UFOPLAN-Vorhaben 3707 41 105)

Projektlaufzeit: 11/2007 - 9/2009

Link: www.wasklim.de

KLIWAS-Projekt 4.01 – Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie und Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt

Gefördert durch: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Projektpartner: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI M), Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST), Universität Würzburg (Institut für Geographie)

Link: http://www.bafg.de/nn_163326/M2/DE/05_KLIWAS/kliwas__node.html?__nnn=true

2.4. Literatur

- Früh, B., J. W. Schipper, A. Pfeiffer und V. Wirth (2006). "A pragmatic approach for downscaling precipitation in alpine-scale complex terrain." *Meteorologische Zeitschrift* 15 (6): 631-646.
- Hattermann, F., M. Wattenbach, V. Krysanova und F. Wechsung (2005). "Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment-validation and uncertainty analysis." *Hydrological Processes* 19 (3): 693-714.
- Hattermann, F. F., T. Conradt und A. Bronstert (2007). "Berechnung großskaliger Verdunstung unter den Bedingungen des globalen Wandels." *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 21 (7): 231-247.
- Hattermann, F. F., J. Post, V. Krysanova, T. Conradt und F. Wechsung (2008). "Assessment of Water Availability in a Central-European River Basin (Elbe) Under Climate Change." *Advances in Climate Change Research* 4: 42-50.
- Huang, S., V. Krysanova, H. Österle und F. Hattermann (2009). "Assessment of spatial-temporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change." *Hydrological Processes*(submitted).
- IPCC (2007). "Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Ausgabe S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, und M. T. a. H. L. Miller (Hrsg.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kosková, R., S. Nemecková und C. Hesse (2007). "Using of the Soil Parametrisation Based on Soil Samples Databases in Rainfall-Runoff Modelling." *Proceedings of the Adolf Patera Workshop "Extreme hydrological events in catchments"*. , Bratislava: 241-249.
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.-I., Becker, A. (1998). "Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds." *Ecological Modelling* 106 (2): 261-289.
- Krysanova, V., T. Vetter und F. Hattermann (2008). "Detection of change in the drought frequency in the Elbe basin: comparison of three methods." *Hydrological Sciences Journal*.
- Kundzewicz, Z. W. und H. J. Schellnhuber (2004). "Floods in the IPCC TAR perspective." *Natural Hazards* 31 (1): 111-128.
- Leipprand, A., T. Dworak, M. Benzie, M. Berglund, F. Hattermann, V. Krysanova, J. Post und S. Kadner (2008). "Impacts of climate change on water resources – adaptation strategies for Europe." *Ecologic – Institute for International and European Environmental Policy, Potsdam-Institut for Climate Impact Research (PIK)*. von http://www.climate-water-adaptation-belin2007.org/documents/Climate_water_report_final_for_website.pdf.

- MLU - Ministerium für Landwirtschaft Umwelt Sachsen-Anhalt (2009). "Entwurf der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel." Fach- und ressortübergreifende Arbeitsgruppe „Anpassung an den Klimawandel" (Hrsg.). Ministerium für Landwirtschaft Umwelt Sachsen-Anhalt, Magdeburg, S. 81. von http://www.sachsen-anhalt.de/LPSA/fileadmin/Elementbibliothek/MasterBibliothek/Landwirtschaft_und_Umwelt/K/Klimaschutz/Klimawandel/KV_Klimawandel_Bericht_11.09.2009.pdf.
- Pinnekamp, J. (2008). "41. Essener Tagung für Klimawandel und Siedlungswasserwirtschaft. ." Essen, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen E.V.
- Schröter, D., Acosta-Michlik, L., Arnell, A. W., Araújo, M. B., Badeck, F., Bakker, M., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T. R., de la Vega-Leinert, A. C., Erhard, M., Espiñeira, G. Z., Ewert, F., Fritsch, U., Friedlingstein, P., Glendinning, M., Gracia, C.A., Hickler, T., House, J. I., Hulme, M., Kankaanpää, S., Klein, R. J. T., Krukenberg, B., Lavorel, S., Leemans, R., Lindner, M., Liski, J., Metzger, M.J., Meyer, J., Mitchell, T.D., Mohren, F., Morales, P., Moreno, J. M., Reginster, I., Reidsma, P., Rounsevell, M., Pla, E., Pluimers, J., Prentice, I.C., Pussinen, A., Sánchez, A., Sabaté, S., Sitch, S., Smith, B., Smith, J., Smith, P., Sykes, M.T., Thonicke, K., Thuiller, W., Tuck, G., van der Werf, G., Vayreda, J., Wattenbach, M., Wilson, D. W., Woodward, F.I., Zaehle, S., Zierl, B., Zudin, S., Cramer, W. (2004). "Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling - Final report." Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam, Germany.
- Spekat, A., W. Enke und F. Kreienkamp (2007). "Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B, A2." Publikationen des Umweltbundesamtes. UBA (Hrsg.). CEC. Potsdam, S. 112.
- Wechsung, F., F. W. Gerstengarbe, P. Lasch und A. Lüttger (Hrsg.) (2009). "Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel." PIK-Report. PIK. Potsdam.
- Wechsung, F., S. Kaden, H. Behrendt und B. Klöcking (2008). "Integrated Analysis of the Impacts of Global Change on Environment and Society in the Elbe River Basin." Ausgabe. Weißensee Verlag. Berlin. 401 S.
- Williams, J. R., K. G. Renard und P. T. Dyke (1984). "EPIC - a new model for assessing erosion's effect on soil productivity." *Journal of Soil and Water Conservation* 38 (5): 381-383.