



POTSDAM-INSTITUT FÜR  
KLIMAFOLGENFORSCHUNG

# Klimawandel 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

**Autoren:** A. Lüttger, F.-W. Gerstengarbe, M. Gutsch, F. Hattermann, P. Lasch,  
A. Murawski, J. Petraschek, F. Suckow, P.C. Werner





## Vorwort

Das Klima ändert sich. Der Klimawandel ist ein globales Phänomen mit regionalen Auswirkungen. Die Regionalen Planungsgemeinschaften gehören zu den Akteuren, die Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels initiieren können.

Die Region Havelland-Fläming hat frühzeitig begonnen, sich Kompetenz zum Thema Klimawandel anzueignen. Die Praktiker der Planungsgemeinschaft arbeiten seit 2009 in dem Modellvorhaben „Raumentwicklungsstrategien des Klimawandels“ eng mit Wissenschaftlern des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung zusammen. Sie sammeln qualifiziertes Expertenwissen über die lokalen Ausprägungen des Klimawandels für eine zielgerichtete Berücksichtigung in den Planungsprozessen und um es als Informationsmaterial zu veröffentlichen.

Die vorliegenden Expertisen zum Modellvorhaben sind Grundlage und Ergebnis dieses Dialogs zwischen Wissenschaft und Praxis. Sie richtet sich an alle „Anpassungsinteressierte“ und erlaubt ihnen, ihre Betroffenheit vom Klimawandel besser einzuschätzen sowie Kosten klimabedingter Schäden in Grenzen zu halten. Die detaillierten, quantitativen und qualitativen Beschreibungen von Klimadaten aus der realen Vergangenheit in Kombination mit dem Klimamodell bilden eine hervorragende Informationsbasis, um Risiken des Klimawandels zu umschiffen und Chancen gezielt zu ergreifen.

Ich wünsche der Region Havelland-Fläming weiterhin ein zukunftsorientiertes und voraus denkendes Handeln im Umgang mit dem Klimawandel.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Anita Tack'. The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

Anita Tack

Ministerin für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz





## Vorwort

Klimawandel ist nicht etwas, das nur in weiter Ferne und Zukunft geschieht. Im arktischen Eis oder beim indischen Monsunregen. Oder irgendwann in vielen hundert Jahren. Klimawandel findet auch bei uns statt – und er zeichnet sich schon heute ab. Seit mehr als einem Jahr ist die globale Mitteltemperatur auf Rekordkurs. Auch in Brandenburg hat es auffällig viele heiße Sommer gegeben, in den Jahren 2003, 2006 und zuletzt 2010. Dies und Wetterextreme wie Starkregen und Stürme haben die unterschiedlichen Akteure der Region veranlasst, sich verstärkt mit dem Klimawandel zu befassen.

Vor fast 15 Jahren ist die erste Regionalstudie des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung zu den Auswirkungen des Klimawandels in Brandenburg erschienen. Im Auftrag der Regionalen Planungsstelle Teltow-Fläming haben wir in der vorliegenden Studie nun erneut Klimaextreme der Vergangenheit analysiert und mit den Änderungen des zukünftigen Klimas verglichen. Dabei haben wir drei Szenarien betrachtet: Eine Erhöhung um null, zwei oder drei Grad. Aus Sicht der Klimaforschung sollte der weltweite Temperaturanstieg auf zwei Grad begrenzt werden, um die Folgen einigermaßen überschaubar zu halten. Hierfür müsste aber der Ausstoß von Treibhausgasen durch Industrie und Privathaushalte spätestens vom Jahr 2020 an deutlich sinken.

Die Szenarien einer möglichen Klimaänderung bis zum Jahr 2060 dienen uns als Grundlage, um die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die landwirtschaftlichen Erträge und die Produktivität der Wälder in Brandenburg näher zu untersuchen. Besonderes Augenmerk wurde hier auf die Region Havelland-Fläming gelegt. Die Ergebnisse können und sollen als eine Planungsgrundlage verstanden werden, um die Auswirkungen des Klimawandels für die Region besser handhabbar zu machen. Ohne Anpassung wird es nicht gehen.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'H. Schellnhuber', written in a cursive style.

Hans Joachim Schellnhuber

Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung





POTSDAM-INSTITUT FÜR  
KLIMAFOLGENFORSCHUNG

## Expertise 1 " Klimawandel 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

Autoren: P.C. Werner, F.-W. Gerstengarbe

Forschungsbereich „Klimawirkung und Vulnerabilität“

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Klima</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1. Aufgabenstellung</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2. Methodik</b> .....	<b>9</b>
1.2.1. Datengrundlage .....	9
1.2.2. Regionales Klimamodell STAR II .....	10
<b>1.3. Ergebnisse</b> .....	<b>11</b>
1.3.1. Beobachtungszeitraum .....	11
1.3.1.1. Lufttemperatur .....	11
1.3.1.2. Niederschlag .....	13
1.3.1.3. Klimatische Wasserbilanz .....	17
1.3.1.4. Extremereignisse .....	18
1.3.2. Szenariumzeitraum .....	19
1.3.2.1. Lufttemperatur .....	20
1.3.2.2. Niederschlag .....	22
1.3.2.3. Klimatische Wasserbilanz .....	23
1.3.2.4. Extremereignisse .....	24
<b>1.4. Zusammenfassung</b> .....	<b>28</b>
<b>1.5. Anhang</b> .....	<b>28</b>
1.5.1. Szenarienzzeitraum 2011-40 .....	29
1.5.1.1. Vergleich zum Basiszeitraum 1961-90 .....	29
1.5.1.2. Vergleich zum Basiszeitraum 1977-2006 .....	35
1.5.2. Szenarienzzeitraum 2031-60 .....	41
1.5.2.1. Vergleich mit dem Basiszeitraum 1961-90 .....	41
1.5.2.2. Vergleich mit dem Basiszeitraum 1977-2006 .....	47
<b>1.6. Literatur</b> .....	<b>51</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1.1:	Mittlere Jahrestemperatur (°C) im Basiszeitraum 1961-90.....	12
Abb. 1.2:	Mittlere Jahrestemperatur (°C) im Basiszeitraum 1977-2006 .....	12
Abb. 1.3:	Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Basiszeitraum 1961-90.....	13
Abb. 1.4:	Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Basiszeitraum 1977-2006 .....	14
Abb. 1.5:	Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Hydrologischen Sommer (Mai- Oktober) im Basiszeitraum 1961-90.....	15
Abb. 1.6:	Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Hydrologischen Sommer (Mai- Oktober) im Basiszeitraum 1977-2006 .....	15
Abb. 1.7:	Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Hydrologischen Winter (November- April) im Basiszeitraum 1961-90.....	16
Abb. 1.8:	Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Hydrologischen Winter (November- April) im Basiszeitraum 1977-2006 .....	16
Abb. 1.9:	Mittlere klimatische Wasserbilanz (mm) im Basiszeitraum 1961-90.....	17
Abb. 1.10:	Mittlere klimatische Wasserbilanz (mm) im Basiszeitraum 1977-2006 .....	18
Abb. 1.11:	Differenz der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario .....	20
Abb. 1.12:	Differenz der Mitteltemperatur (K) von Mai-Oktober, Vergleich des Zeit- raums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario.....	21
Abb. 1.13:	Differenz der Mitteltemperatur (K) während des hydrologischen Winters von November-April, Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario .....	21
Abb. 1.14:	Differenz des Niederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario .....	22
Abb. 1.15:	Differenz des Niederschlages (mm) während des hydrologischen Winters von November-April, Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario .....	23
Abb. 1.16:	Differenz der Mittleren Klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario .....	24
Abb. 1.17:	Differenzen der Häufigkeit der Frost- und Sommertage, Vergleich der Zeiträume 2011-2040, bzw. 2031-60 mit den Jahren 1961-90 für das OK, 2K und 3K-Szenario.....	24
Abb. 1.18:	Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011- 2040 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario .....	29
Abb. 1.19:	Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011- 2040 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario .....	30
Abb. 1.20:	Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011- 2040 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario .....	30
Abb. 1.21:	Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario.....	31
Abb. 1.22:	Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario.....	32
Abb. 1.23:	Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario.....	32
Abb. 1.24:	Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario .....	33

Abb. 1.25: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario .....	34
Abb. 1.26: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario .....	34
Abb. 1.27: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im OK-Szenario.....	35
Abb. 1.28: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario.....	36
Abb. 1.29: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario.....	36
Abb. 1.30: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im OK-Szenario .....	37
Abb. 1.31: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario .....	38
Abb. 1.32: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario .....	38
Abb. 1.33: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im OK-Szenario.....	39
Abb. 1.34: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario.....	40
Abb. 1.35: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario.....	40
Abb. 1.36: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario .....	41
Abb. 1.37: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario .....	42
Abb. 1.38: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario .....	42
Abb. 1.39: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario .....	43
Abb. 1.40: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario .....	44
Abb. 1.41: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario .....	44
Abb. 1.42: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario .....	45
Abb. 1.43: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario .....	46
Abb. 1.44: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario .....	46
Abb. 1.45: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im OK-Szenario.....	47
Abb. 1.46: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario.....	48
Abb. 1.47: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im OK-Szenario .....	49

- Abb. 1.48: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario ..... 49
- Abb. 1.49: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 0K-Szenario..... 50
- Abb. 1.50: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario..... 51

**Tabellenübersicht**

Tab. 1.1:	Thematische Leistungsbeschreibung der Expertise 1, gegliedert nach Betrachtungszeiträumen und vorgesehene Art der Ergebnisdarstellung .....	8
Tab. 1.2:	Verzeichnis der meteorologischen Größen .....	9
Tab. 1.3:	Extremereignisse, verwendete Abkürzungen und Beschreibung der Berechnung .....	18
Tab. 1.4:	Mittlere Häufigkeit von Ereignistagen an ausgewählten Stationen für die Zeiträume 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06) .....	19
Tab. 1.5:	Differenzen der Häufigkeit der Frosttage, Szenarienzeiträume 2011-40 und 2031-60 verglichen mit den Basiszeiträumen 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06) für das OK, 2K und 3K-Szenario .....	25
Tab. 1.6:	Differenzen der Häufigkeit der Sommertage, Szenarienzeiträume 2011-40 und 2031-60 verglichen mit den Basiszeiträumen 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06) für das OK, 2K und 3K-Szenario .....	25
Tab. 1.7:	Differenzen der Häufigkeit der Heißen Tage, Szenarienzeiträume 2011-40 und 2031-60 verglichen mit den Basiszeiträumen 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06) für das OK, 2K und 3K-Szenario .....	26
Tab. 1.8:	Differenzen der Häufigkeit der Tropennächte, Szenarienzeiträume 2011-40 und 2031-60 verglichen mit den Basiszeiträumen 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06) für das OK, 2K und 3K-Szenario .....	26
Tab. 1.9:	Differenzen der Häufigkeit der Starkniederschlagstage, Szenarienzeiträume 2011-40 und 2031-60 verglichen mit den Basiszeiträumen 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06) für das OK, 2K und 3K-Szenario .....	27

**Kernaussagen:**

- Das Ostdeutsche Tiefland (Potsdam-Mittelmark, Teltow-Fläming) liegt klimamäßig im Übergangsbereich von maritimer zu kontinentaler Beeinflussung, wobei letztere etwas überwiegt. Der Landkreis Havelland wird noch dem Nordostdeutschen Tiefland mit stärkerem maritim beeinflusstem Klima zugerechnet.
- Der Sommer ist relativ warm und die Niederschlagsmengen von 250-350 mm sind etwas höher als im restlichen Jahr. Im Winter, der im Mittel als mild bis mäßig kalt eingeschätzt werden kann, gibt es mehr Tage mit Niederschlag als im Sommer mit jedoch geringeren Gesamtniederschlagsmengen.
- Der zukünftige Anstieg der Lufttemperatur ist verbunden mit einem Niederschlagsrückgang im hydrologischen Sommerhalbjahr von Mai-Oktober, der sich auch in der Abnahme der Niederschlagsjahressumme niederschlägt. Im Winterhalbjahr nehmen die Niederschläge zum Teil leicht zu, bei den 2K- und 3K-Szenarien im Südosten des Untersuchungsgebietes ab. Insgesamt sind die Niederschlagsveränderungen nicht signifikant.
- Durch die ansteigende Verdunstung verschlechtert sich im betrachteten Gebiet die klimatische Wasserbilanz generell. Besonders deutlich wird dies im Sommer, es handelt sich dabei um eine in Zukunft stärker an Bedeutung zunehmende Entwicklung.
- In den nächsten Jahrzehnten sinkt die Kältebelastung durch Frosttage merklich. Bei der Wärmebelastung muss dagegen sogar von einer dramatischen Zunahme ausgegangen werden.

# 1. Klima

## 1.1. Aufgabenstellung

Für die Berechnung verschiedener Szenarien unter Klimawandel wird das statistische Regionalmodell STAR des PIK genutzt. Für die Simulation wird ein Temperaturanstieg um 0, 2 und 3 Kelvin (T0.0, T2.0 und T3.0) bis zum Jahr 2060 unterstellt. Die Änderungen ausgewählter meteorologischer Größen in den Vergleichszeiträumen werden in Form von Tabellen und Karten dargestellt und interpretiert (Tab. 1.1).

**Tab. 1.1: Thematische Leistungsbeschreibung der Expertise 1, gegliedert nach Betrachtungszeiträumen und vorgesehene Art der Ergebnisdarstellung**

Ifd Nr.	Beschreibung	Zeiträume	Art der Darstellung
1a	Analyse der Klimatologie für das Untersuchungsgebiet für ausgewählte meteorologische Größen	1961-90 1977-2006	Karten
1b	Analyse der Klimatologie für das Untersuchungsgebiet für ausgewählte meteorologische Größen für die Klimaszenarien 0, 2 und 3K-Temperaturanstieg bis 2060	2011-40 2031-60	Karten
2a	Analyse der Extremereignisse bezüglich Häufigkeit, Intensität und Trend für ausgewählte meteorologische Stationen	1961-90 1977-2006	Tabellen
2b	Analyse der Extremereignisse bezüglich Häufigkeit, Intensität und Trend für ausgewählte meteorologische Stationen	2011-40 2031-60	Tabellen

Um eine Einschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Klimas sowie seiner Veränderung und Auswirkungen in der Region Havelland-Fläming besser vornehmen zu können, wurde für die Auswertungen das ganze Land Brandenburg und weitere Gebiete herangezogen.

In den Unterkapitel 1.2.1 und 1.2.2 werden die verwendeten meteorologischen Daten und das regionale Klimamodell STAR II, mit dem die zukünftige klimatische Entwicklung berechnet wurde, beschrieben. Im Kapitel 1.3 werden auswahlweise Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

## 1.2. Methodik

### 1.2.1. Datengrundlage

Für die vorliegenden Untersuchungen standen im PIK meteorologische Daten von ganz Deutschland auf Tageswertbasis für den Zeitraum 1951–2006 zur Verfügung. Die ursprünglichen Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt und am PIK geprüft, ergänzt und gegebenenfalls homogenisiert. Die jeweiligen Zeitreihen der Klimastationen umfassen 11 Größen (Tab. 1.2). Das Stationsnetz wird ergänzt durch Niederschlagsmessstellen. Auf diese wurden von den Klimastationen die anderen meteorologischen Größen interpoliert. Dazu wurde ein vom Deutschen Wetterdienst übernommenes Rechenprogramm verwendet mit einem Verfahren, das abstandsgewichtet interpoliert und eine Höhenabhängigkeit berücksichtigt.

Die Szenarienberechnungen wurden für alle 2.342 deutsche Stationen durchgeführt. Das ermöglicht auch einen späteren Vergleich mit den Ergebnissen aus anderen Regionen, für die auch am PIK und anderen Institutionen Studien durchgeführt werden. Aus dem Gesamtdatensatz wurden anschließend die entsprechenden Stationen für die jeweilige Aufgabe entnommen. Das waren beispielsweise für die Darstellung der Klimakarten von Brandenburg 152 Stationen.

Für die Analyse der statistischen Parameter wurden aus den Datenreihen der beobachteten Daten der Vergangenheit die Zeiträume 1961-1990 und 1977-2006 und für die simulierten Daten die Jahre 2011-2040 und 2031-2060 gewählt (vgl. Tab. 1.1). Jeweils für diese 30 Jahre wurden statistischen Parameter wie Mittelwerte, Häufigkeit von Ereignistagen und Differenzen zwischen unterschiedlichen Zeiträumen berechnet. Diese Berechnungen wurden für das Gesamtjahr und verschiedene Jahresabschnitte durchgeführt.

**Tab. 1.2: Verzeichnis der meteorologischen Größen**

Meteorologische Größe	Maßeinheit	Abkürzung
Tagesmaximum der Lufttemperatur	°C	Tmax
Tagesmittel der Lufttemperatur	°C	Tmit
Tagesminimum der Lufttemperatur	°C	Tmin
Tagessumme des Niederschlags	mm	Nied
Tagesmittel der Relativen Luftfeuchte	%	Relf
Tagesmittel des Luftdrucks	hPa	Ludr
Tagesmittel des Wasserdampfdrucks	hPa	Dadr
Tagessumme der Sonnenscheindauer	h	Sonn
Tagesmittel des Bedeckungsgrades mit Wolken	Achtel	Bewo
Tagessumme der Globalstrahlung	J-cm <sup>2</sup>	Gstr
Tagesmittel der Windgeschwindigkeit	m-s	Wind

Anmerkung: Mittels der vorliegenden meteorologischen Größen wurde nach der Methode von Turc-Ivanov die potentielle Verdunstung (Potv) berechnet und aus der Differenz von Nied – Potv ergibt sich die Klimatische Wasserbilanz (Wabi).

### 1.2.2. Regionales Klimamodell STAR II

Das regionale Klimamodell STAR II erzeugt fundierte, räumlich wie zeitlich hoch aufgelöste Abschätzungen regionaler Klimaentwicklungen. Eine wichtige Besonderheit des Verfahrens ist, dass die Simulationsreihen lediglich durch ein vorgegebenes lineares Temperaturregime (etwa Mittelwert und Zunahme über die Simulationsperiode) beschränkt werden. Die Simulationsreihen werden dabei aus vergangenen Beobachtungen der Beobachtungsperiode zusammengesetzt, und zwar so, dass die Neuaneinanderreihung der Beobachtungen eine Temperaturreihe ergibt, die dem vorgegebenen Temperaturregime (Trend) entspricht. Da die Beobachtungen außer der Temperatur auch alle anderen erfassten Messgrößen (Niederschlag usw.) enthalten und diese bei der Neuaneinanderreihung mitgeführt werden, enthalten die Simulationsreihen alle beobachteten Messgrößen in physikalisch konsistenten Kombinationen. Das Gleiche gilt für die Konsistenz der räumlichen Verteilungen, da die Reihenfolge der Neuaneinanderreihung an allen Stationen die Gleiche ist. Heuristische Kriterien stellen außerdem sicher, dass die Simulationsreihen realistische Jahresgänge und Erhaltungsneigungen aufweisen. Stochastische Elemente des Verfahrens ermöglichen die Erzeugung ganzer Simulationsensembles, wodurch die Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen zu dem vorgegebenen Temperaturregime untersucht werden kann. Verschiedene Prüfverfahren zeigen, dass das Modell sehr gut in der Lage ist, die beobachtete Klimatologie einer Region zu reproduzieren. Die Übereinstimmung beschränkt sich dabei nicht auf einfache Statistiken wie langjährige Mittel, sondern schließt Extremereignisse (z.B. Starkniederschläge) ebenso wie Andauerereignisse (Hitzeperioden) ein. Der Vergleich mit einem ähnlichen Experiment eines dynamischen Modells zeigt, dass der statistische Ansatz eine erheblich bessere Übereinstimmung mit den Beobachtungen erbringt (Orlowsky et al., 2008). Durch seine Konstruktion und eine effiziente Programmierung erlaubt dieses Verfahren, schnell zu hoch aufgelösten Abschätzungen regionaler Klimaentwicklungen zu gelangen, die als fundierter Ausgangspunkt für Klimafolgeuntersuchungen dienen können. Eine genaue Modellbeschreibung findet sich u. a. bei Werner, Gerstengarbe (1997) und Orlowsky et al. 2008.

Das Modell ist prinzipiell in der Lage, für jedes Szenarium beliebig viele Realisierungen zu berechnen. Dabei versteht man unter einer Realisierung die Berechnung **eines** Szenarienlaufs. Sollen für ein Szenarium mehrere Realisierungen berechnet werden, wird die Abfolge der Daten über eine Monte-Carlo-Simulation variiert, ohne dass dabei die Vorgaben verändert werden. Auf diese Art und Weise erhält man beliebig viele zufällig erzeugte Realisierungen für das vorgegebene

Szenarium. Damit ist es möglich, Aussagen zur Schwankungsbreite der durch das Modell erzeugten Ergebnisse zu machen.

Da, wie oben genannt, für eine Szenariensimulation nur die Vorgabe eines linearen Trends für die Temperatur benötigt wird, also keine Abhängigkeit zu einem übergeordneten dynamischen Klimamodell besteht, können die verschiedensten Trendvorgaben umgesetzt werden. Im Fall der vorliegenden Untersuchungen waren es für den Zeitraum 2007 – 2060 die Trends von 0K (also kein Trend, die mittlere Temperatur bewegt sich um den Wert, der am Ende des Beobachtungszeitraums (Mittel) vorhanden war), 2K (ist für diese Region dem Temperaturanstieg im A1B-Szenarium, wie er vom ECHAM5-OS simuliert wird, ähnlich) und 3K. Diese Zunahmen der Jahresmitteltemperatur gelten im Mittel für Deutschland, räumlich ergeben sich dabei aber Unterschiede.

Die Realisierungen (hier 100) für ein Szenarium können anhand eines ausgewählten Kriteriums charakterisiert werden. Bewährt hat sich für viele Untersuchungen, dazu den Trend der Klimatischen Wasserbilanz zu benutzen. Die Charakterisierung reicht dann von trocken (meist starker abnehmender Trend in Deutschland), über den Medianwert (mittlere Realisierung) bis zu feucht (ansteigender Trend). Wird nur eine Realisierung für Klimafolgenberechnungen verwendet, wählt man in der Regel, wie hier getan, die mittlere aus.

### **1.3. Ergebnisse**

Neben den Beispielen aus dem Beobachtungszeitraum werden exemplarisch Ergebnisse nur für das 3K-Szenario dargestellt. Herangezogen werden die meteorologischen Größen Lufttemperatur (Tmit), Niederschlag (Nied) und Klimatische Wasserbilanz (Wabi). Die nicht im Text erscheinenden Karten und die zu den Auswertungen insgesamt befinden sich im Anhang (Kap. 1.5).

#### **1.3.1. Beobachtungszeitraum**

Der Beobachtungszeitraum umfasst die Jahre von 1951-2006. Im Folgenden werden die beiden Basiszeiträume 1961-90 und 1977-2006 jeweils separat dargestellt.

##### **1.3.1.1. Lufttemperatur**

Die Region Havelland-Fläming zählt zu den wärmeren Gebieten in Brandenburg. Gleichzeitig sieht man aber auch, dass im Vergleich der Zeiträume 1961-1990 (Abb. 1.1) und 1977-2006 (Abb. 1.2) zwar die räumlichen Strukturen erhalten geblieben sind, jedoch es deutlich (trotz Überlappung der beiden Perioden) wärmer geworden ist (in der Regel eine 0.5-Grad-Klasse höher). Fast das Gleiche gilt für das hydrologische Sommer- (Mai – Oktober) und Winterhalbjahr (November – April).

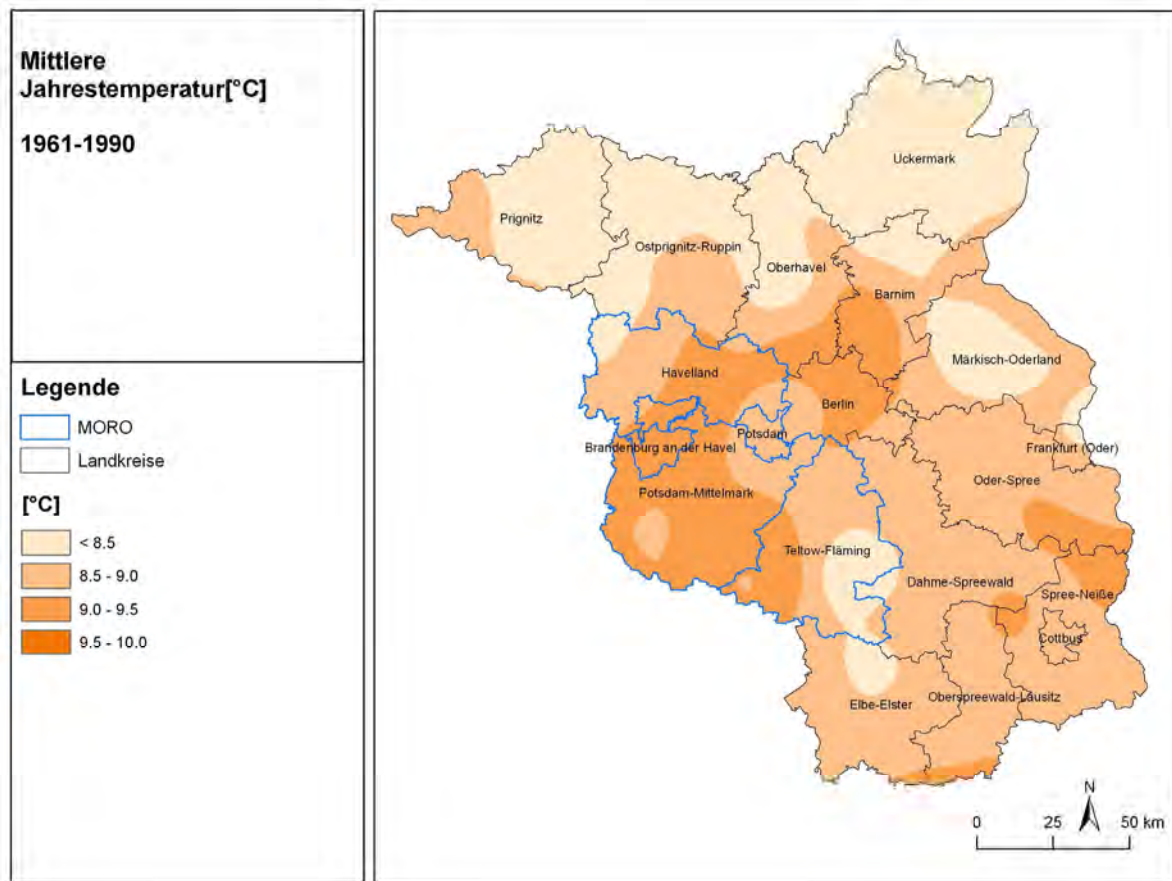


Abb. 1.1: Mittlere Jahrestemperatur (°C) im Basiszeitraum 1961-90

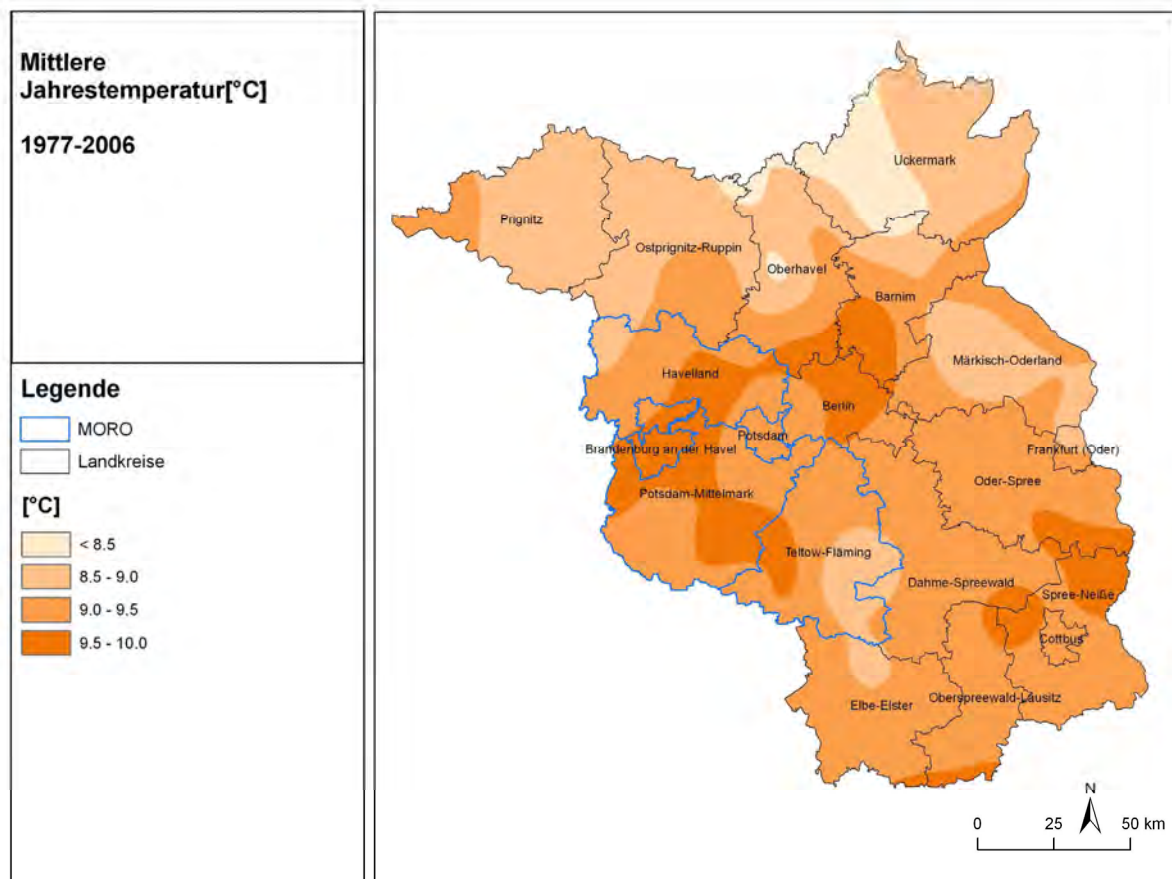


Abb. 1.2: Mittlere Jahrestemperatur (°C) im Basiszeitraum 1977-2006

## 1.3.1.2. Niederschlag

Im Vergleich zu Gesamtbrandenburg gehört die Untersuchungsregion eher zu den etwas trockeneren Gebieten, wobei der Niederschlag in einigen Teilen zwischen 1961-1990 (Abb. 1.3) und 1977-2007 (Abb. 1.4) etwas zugenommen hat. Beide Aussagen gelten wiederum sowohl für das Jahr (Abb. 1.5) als auch das hydrologische Sommerhalbjahr (Abb. 1.6).

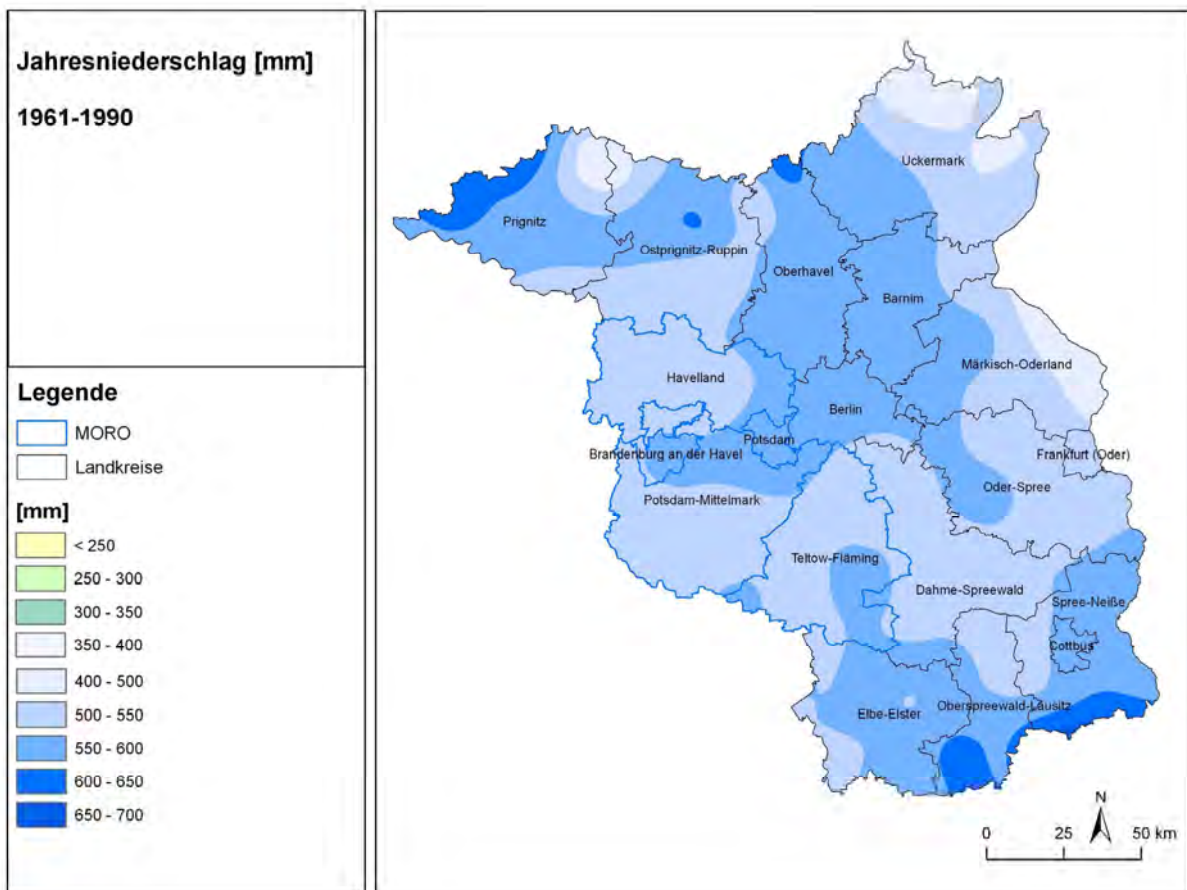


Abb. 1.3: Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Basiszeitraum 1961-90

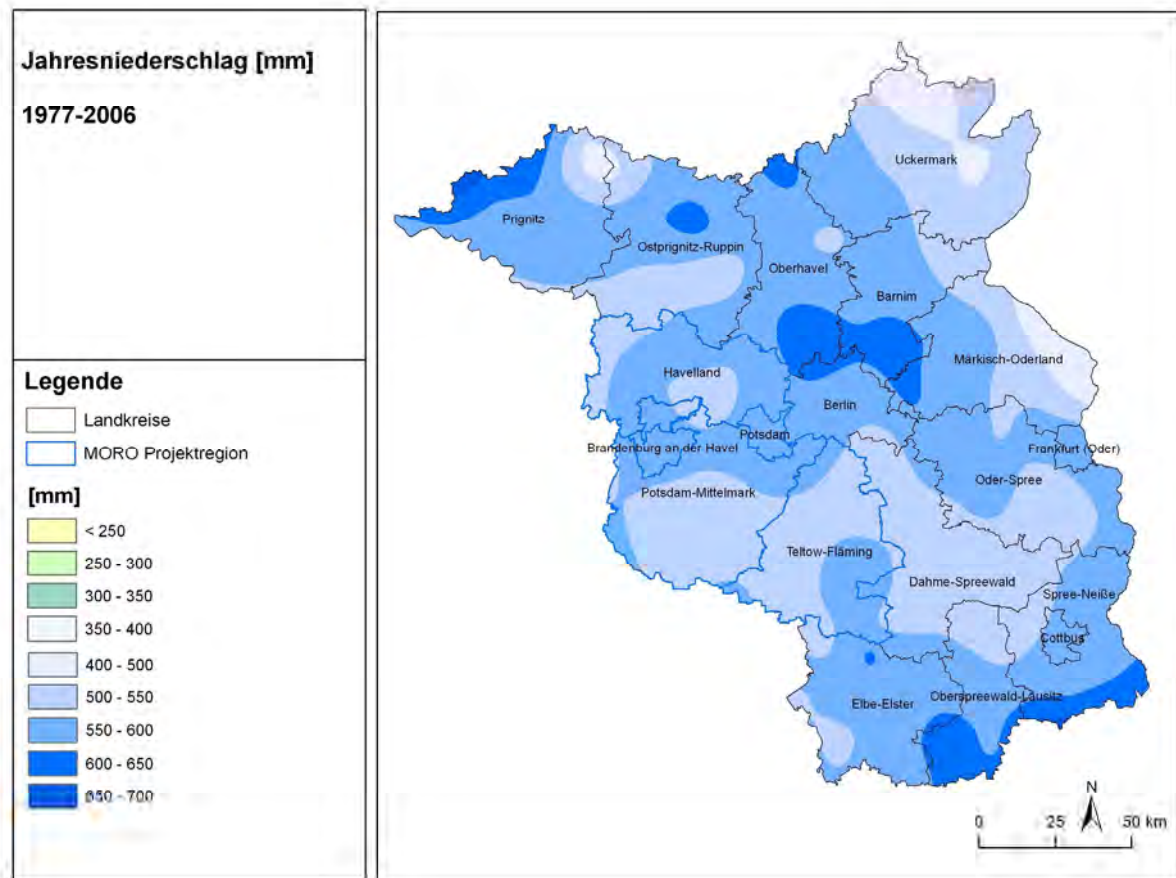


Abb. 1.4: Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Basiszeitraum 1977-2006

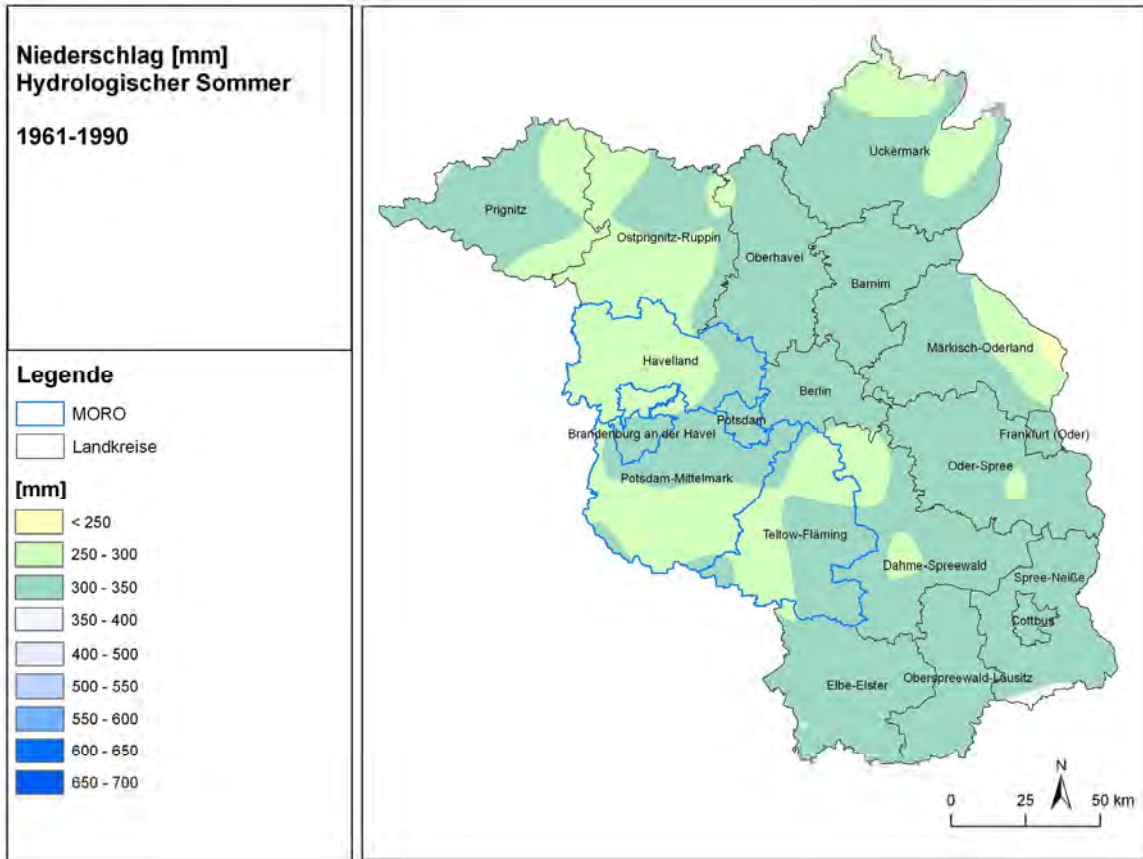


Abb. 1.5: Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Hydrologischen Sommer (Mai-Oktober) im Basiszeitraum 1961-90

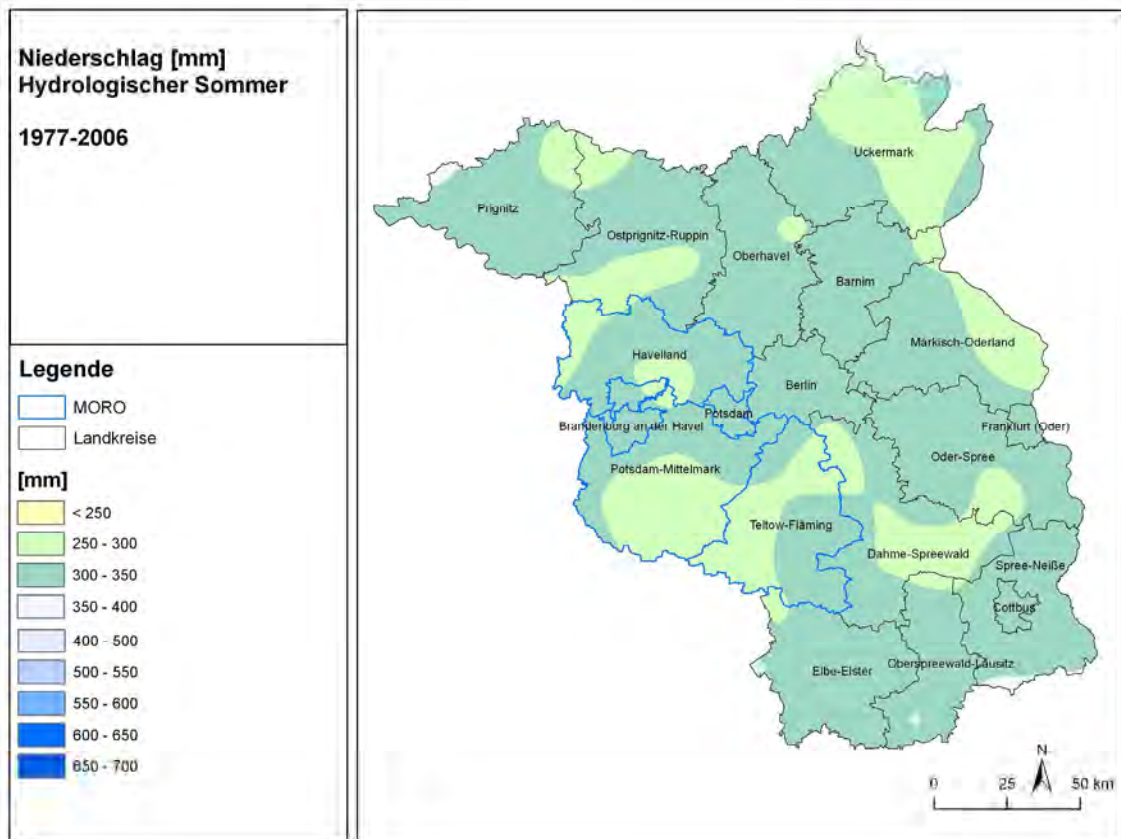


Abb. 1.6: Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Hydrologischen Sommer (Mai-Oktober) im Basiszeitraum 1977-2006

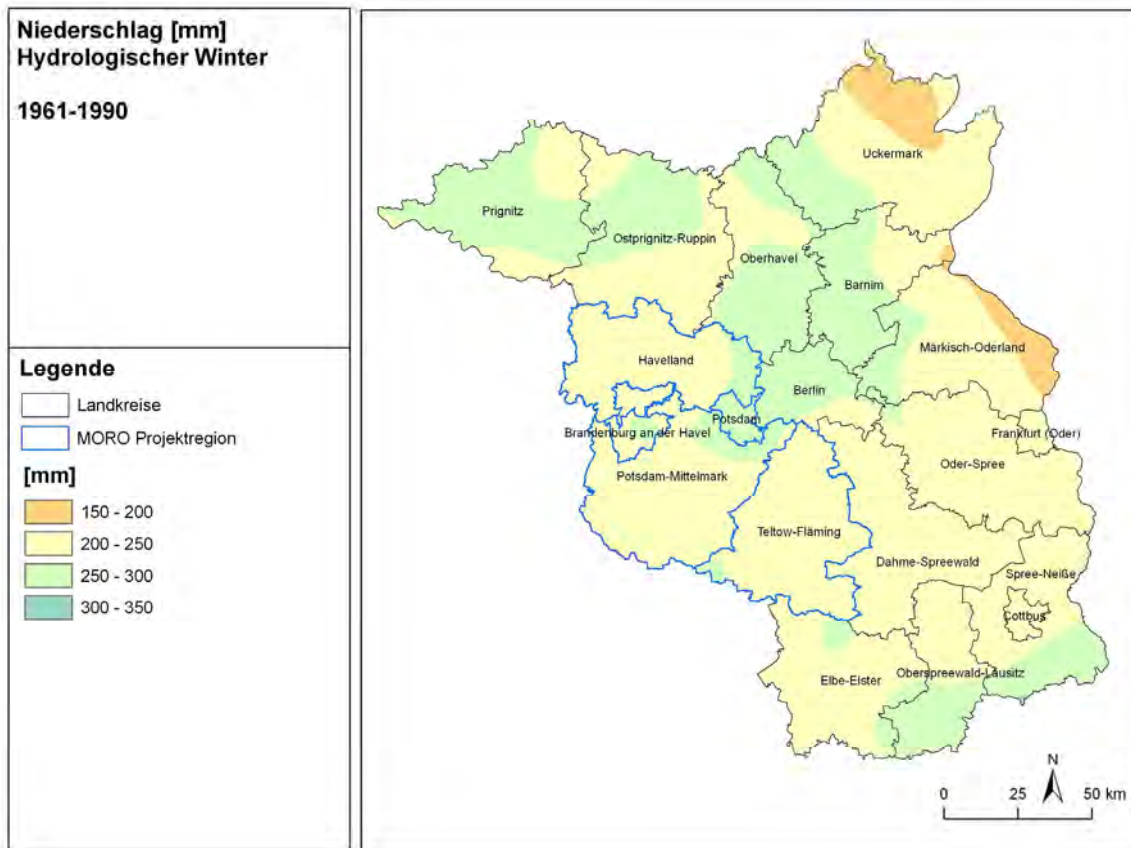


Abb. 1.7: Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Hydrologischen Winter (November-April) im Basiszeitraum 1961-90

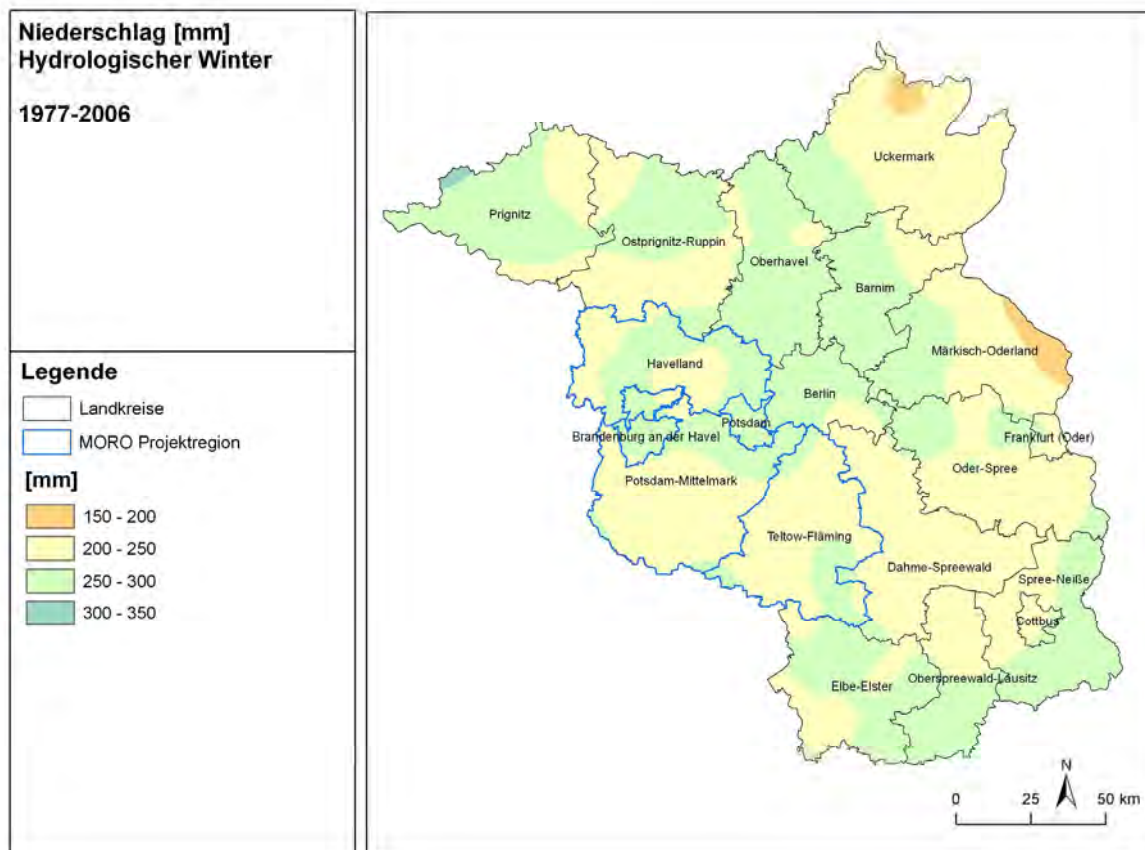


Abb. 1.8: Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Hydrologischen Winter (November-April) im Basiszeitraum 1977-2006

### 1.3.1.3. Klimatische Wasserbilanz

Da die Lufttemperatur und der Niederschlag wesentliche Größen für die Bestimmung der Klimatischen Wasserbilanz sind, spiegeln sich ihre Strukturen und Tendenzen im Verhalten der Wasserbilanz wider (Abb. 1.9 und Abb. 1.10). Das heißt in diesem Fall, dass die Region Havelland-Fläming relativ trocken ist, ganz besonders im Sommer, und dass zwischen den beiden Zeiträumen fast keine Änderungen auftreten, da gegensätzlich Trends von Temperatur (höher = mehr Verdunstung) und Niederschlag (höher = mehr Wasser) vorhanden sind.

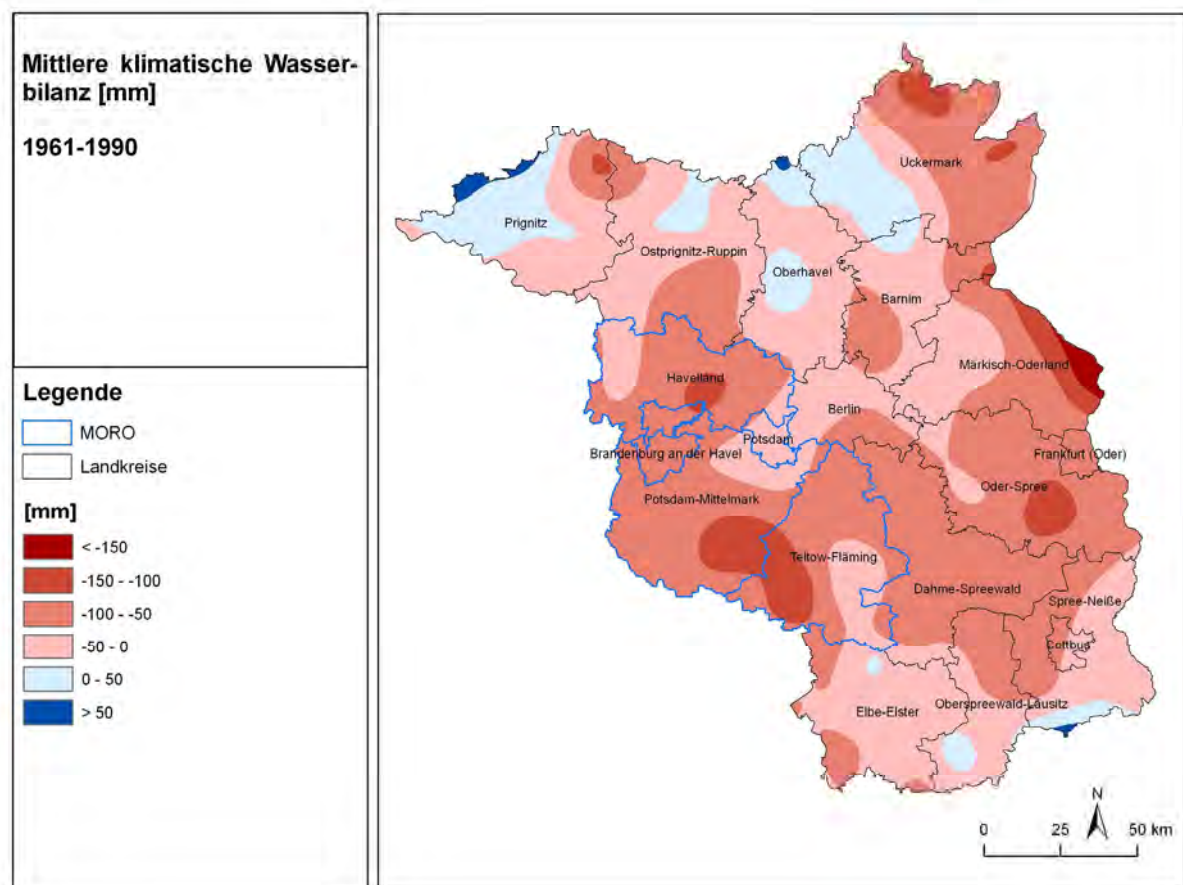


Abb. 1.9: Mittlere klimatische Wasserbilanz (mm) im Basiszeitraum 1961-90

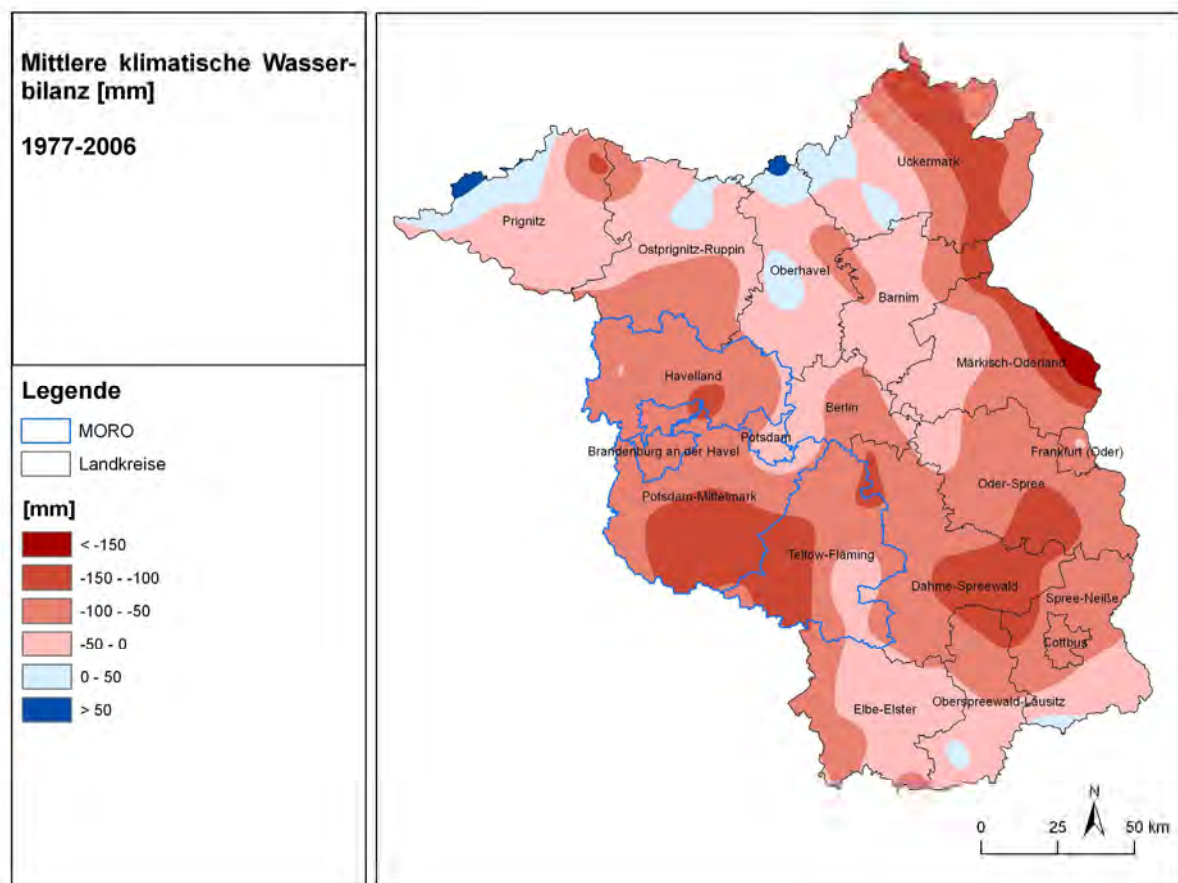


Abb. 1.10: Mittlere klimatische Wasserbilanz (mm) im Basiszeitraum 1977-2006

#### 1.3.1.4. Extremereignisse

Neben den Angaben zu den mittleren Verhältnissen spielen in der Praxis auch die Ereignistage eine gewisse Rolle. Dazu wurden die mittleren Häufigkeiten für 14 Stationen in der Region ausgewertet. Folgende Ereignisse wurden herangezogen:

Tab. 1.3: Extremereignisse, verwendete Abkürzungen und Beschreibung der Berechnung

Ereignis	Abkürzung	Beschreibung
Frosttage	FT	$T_{\min} < 0.0^{\circ} \text{ C}$
Sommertage	ST	$T_{\max} \geq 25.0^{\circ} \text{ C}$
Heiße Tage	HT	$T_{\max} \geq 30.0^{\circ} \text{ C}$
Tropennacht	TN	$T_{\min} \geq 20.0^{\circ} \text{ C}$
Starkniederschlagstag	SN	$\text{Nied} \geq 10.0 \text{ mm}$

**Tab. 1.4: Mittlere Häufigkeit von Ereignistagen an ausgewählten Stationen für die Zeiträume 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06)**

Station	FT		ST		HT		TN		SN	
	61-90	77-06	61-90	77-06	61-90	77-06	61-90	77-06	61-90	77-06
Potsdam	90	86	38	43	8	10	0	1	13	12
Luckenw	86	82	40	45	9	10	0	1	11	10
Treu.b.	83	79	41	47	9	11	0	1	10	11
Brück	84	80	41	46	9	11	0	1	11	11
G Kreutz	84	80	41	46	9	11	0	1	13	12
Brb.-G.	78	77	35	42	6	9	0	0	11	11
Päwesin	79	77	34	41	6	8	0	0	11	10
Rathen.	87	84	34	38	7	9	0	0	11	12
Nauen	79	77	34	41	6	8	0	0	11	11
Kemnitz	93	91	40	44	8	9	0	1	11	12
Dahme	104	100	36	40	7	8	0	0	12	12
Petkus	111	107	32	36	6	7	0	0	13	13
Da.Eck.	91	87	39	44	8	11	0	0	11	11
Jüterbog	85	81	40	46	9	11	0	0	9	10
Mittel	88	85	37	43	8	9	0	> 0	11	11

Luckenw – Luckenwalde; Treu.b. – Treuenbrietzen; G Kreutz – Groß Kreutz  
 Brb.G. – Brandenburg-Görden; Rathen. – Rathenow;  
 Da.Eck. - Danna-Eckmannsdorf

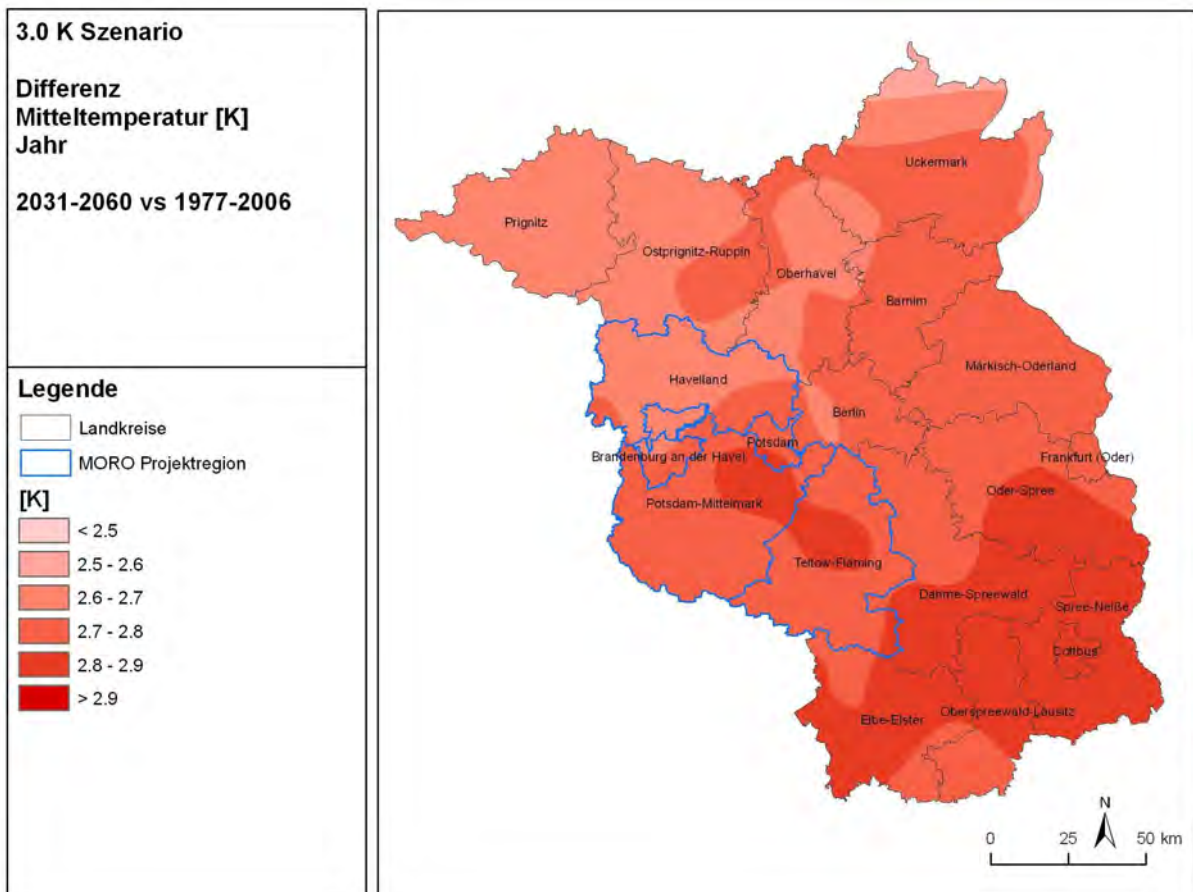
Die Werte in Tab. 1.4 spiegeln die im Beobachtungszeitraum bereits ablaufende Erwärmung wider. Im Mittel nehmen die Sommertage um 6 Tage (16 %) und die Heißen Tage um 1 Tag (12 %) zu. An einigen Stationen tauchen sogar schon 1977-2006 Tropennächte auf. Dagegen nehmen die Frosttage, wenn auch nur gering, um 4 Tage ab (4 %). Die Anzahl der Tage mit Starkniederschlägen hat sich nicht verändert.

### 1.3.2. Szenariumzeitraum

Da die räumlichen Strukturen für die einzelnen meteorologischen Größen sich im Vergleich zum Beobachtungszeitraum meist nicht fundamental ändern, werden nur die Differenzen zwischen dem Basiszeitraum 1977-2006 und der Szenariumsperiode 2031-2060 (in Ausnahmefällen auch 2011-2040) diskutiert und der Schwerpunkt der Auswertungen auf das 3K-Szenario gelegt.

### 1.3.2.1. Lufttemperatur

Der Gesamtzeitraum des Klimaszenarios erstreckt sich von 2007-2060 und der vorgegebene Trend von 3K-Temperaturerhöhung bezieht sich auf diesen Zeitraum. Das bedeutet, dass naturgemäß die Differenz aus 2031-2060 vs 1977-2006 etwas unter diesem Trendwert bleibt. Da sich die Trendvorgabe auf den Jahreswert bezieht, können Mittelwerte für einzelne Jahreszeiten mehr oder weniger deutlich davon abweichen. In der Untersuchungsregion liegen die Differenzen der Jahresmittel ca. zwischen 2.5K und 2.9K (Abb. 1.11). Dabei liegt ein schwacher Gradient von Nordwest nach Südost vor, wie man ihn im gesamten Land Brandenburg beobachten kann. Im hydrologischen Sommerhalbjahr (Abb. 1.12) sind die räumlichen Strukturen der Änderung ähnlich, nur fallen die Werte etwas geringer aus. Im Winterhalbjahr ist die Temperaturzunahme dagegen größer (Abb. 1.13).



**Abb. 1.11: Differenz der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario**

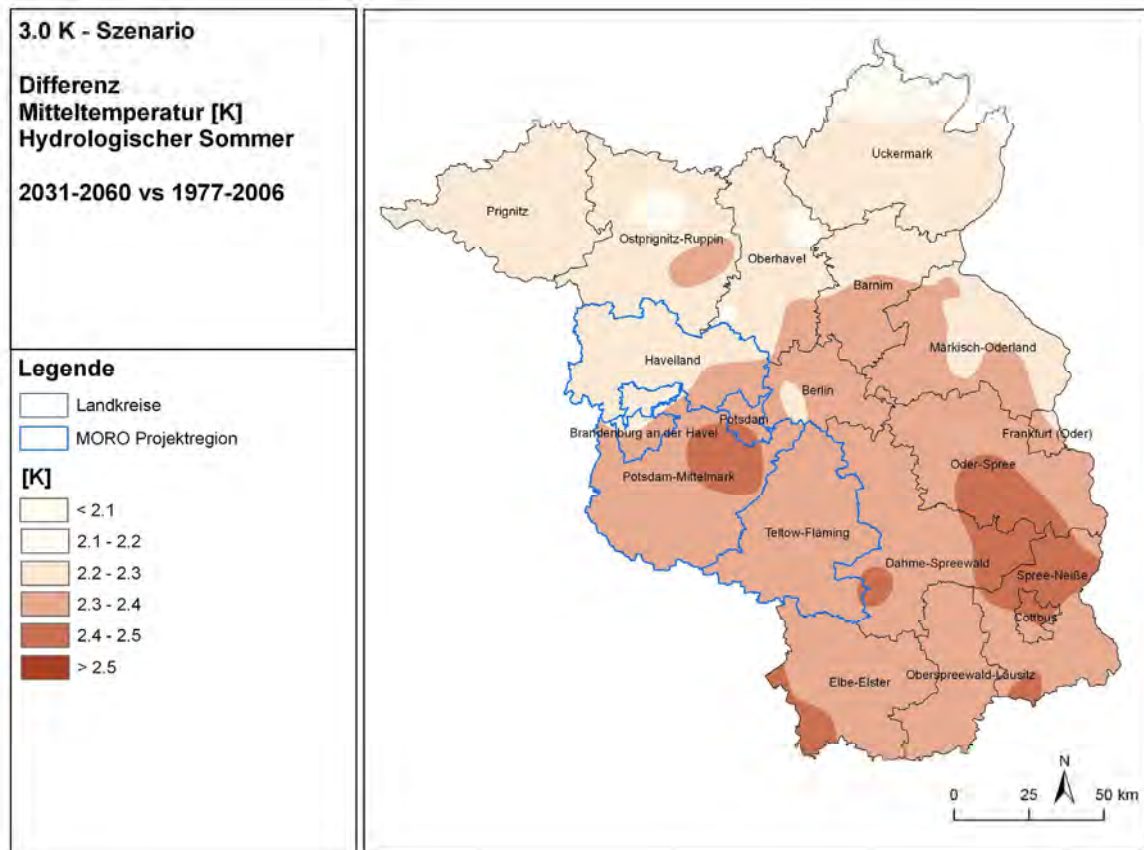


Abb. 1.12: Differenz der Mitteltemperatur (K) von Mai-Oktober, Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario

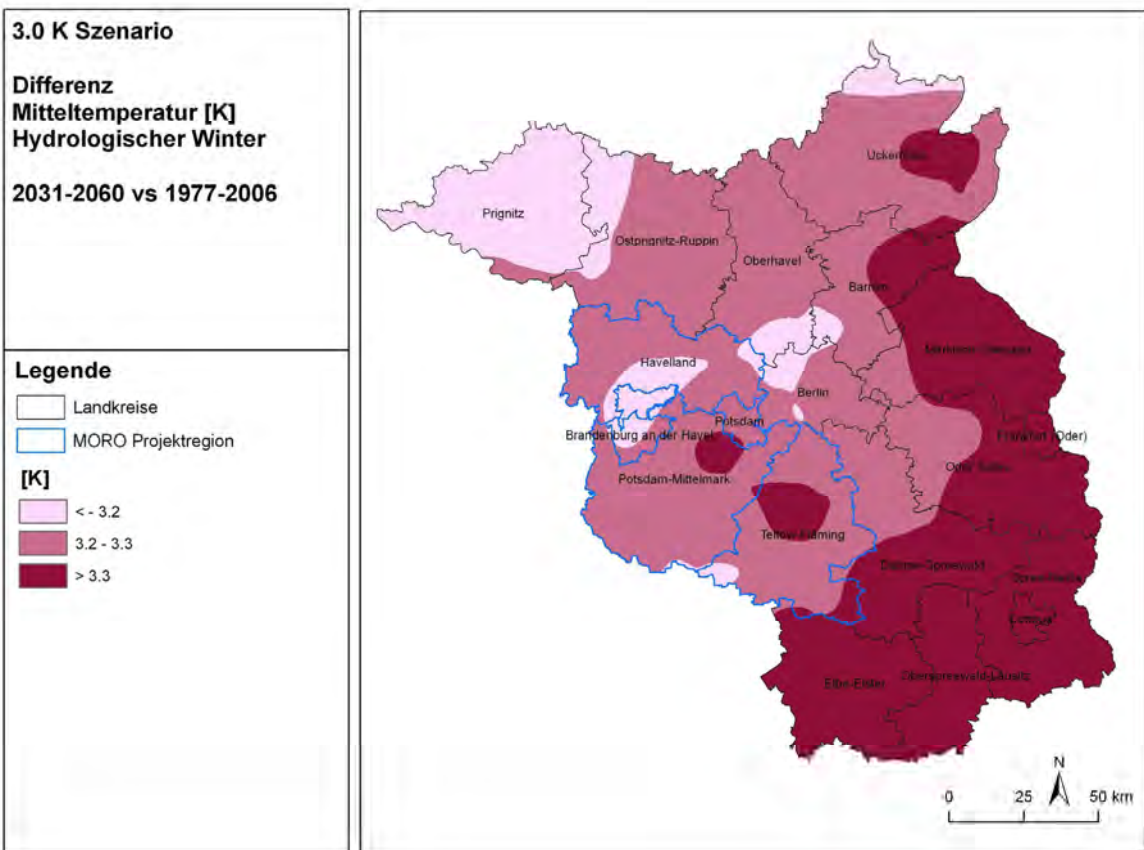
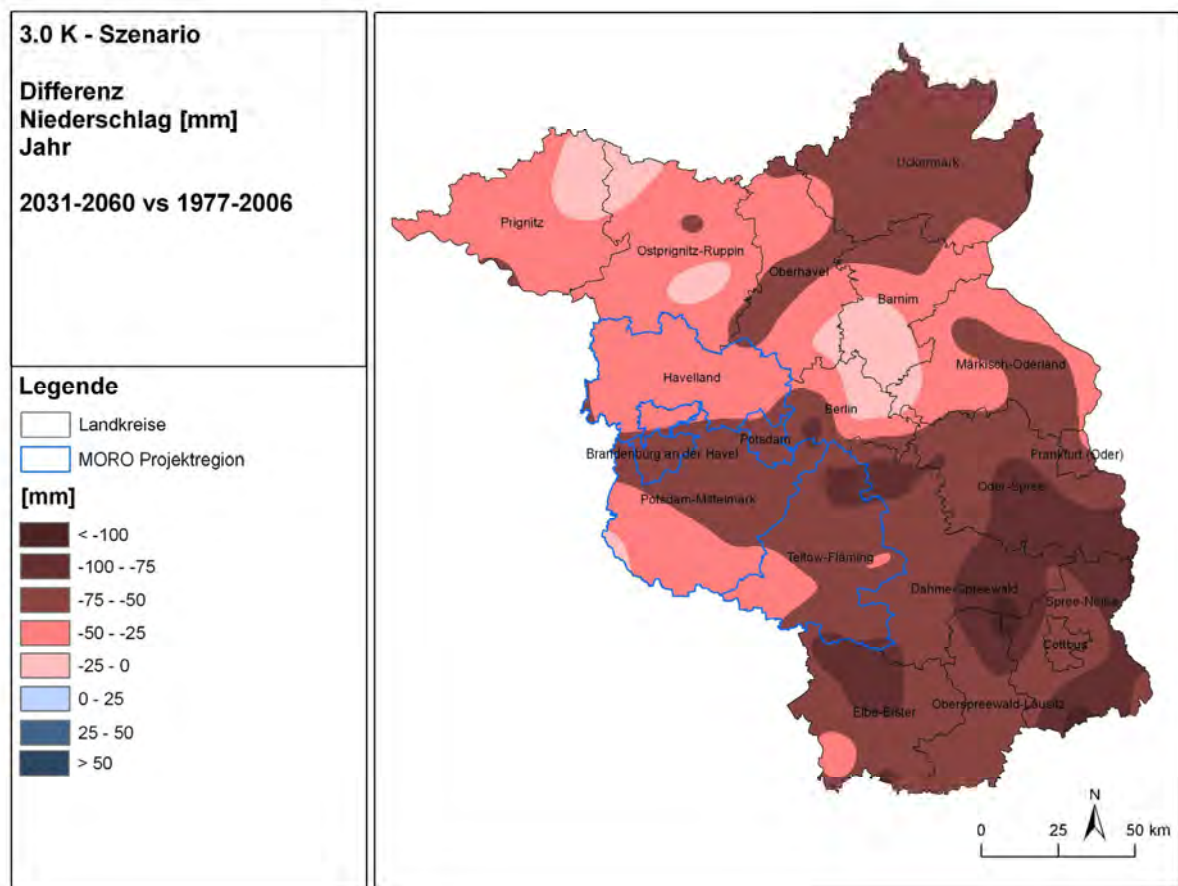


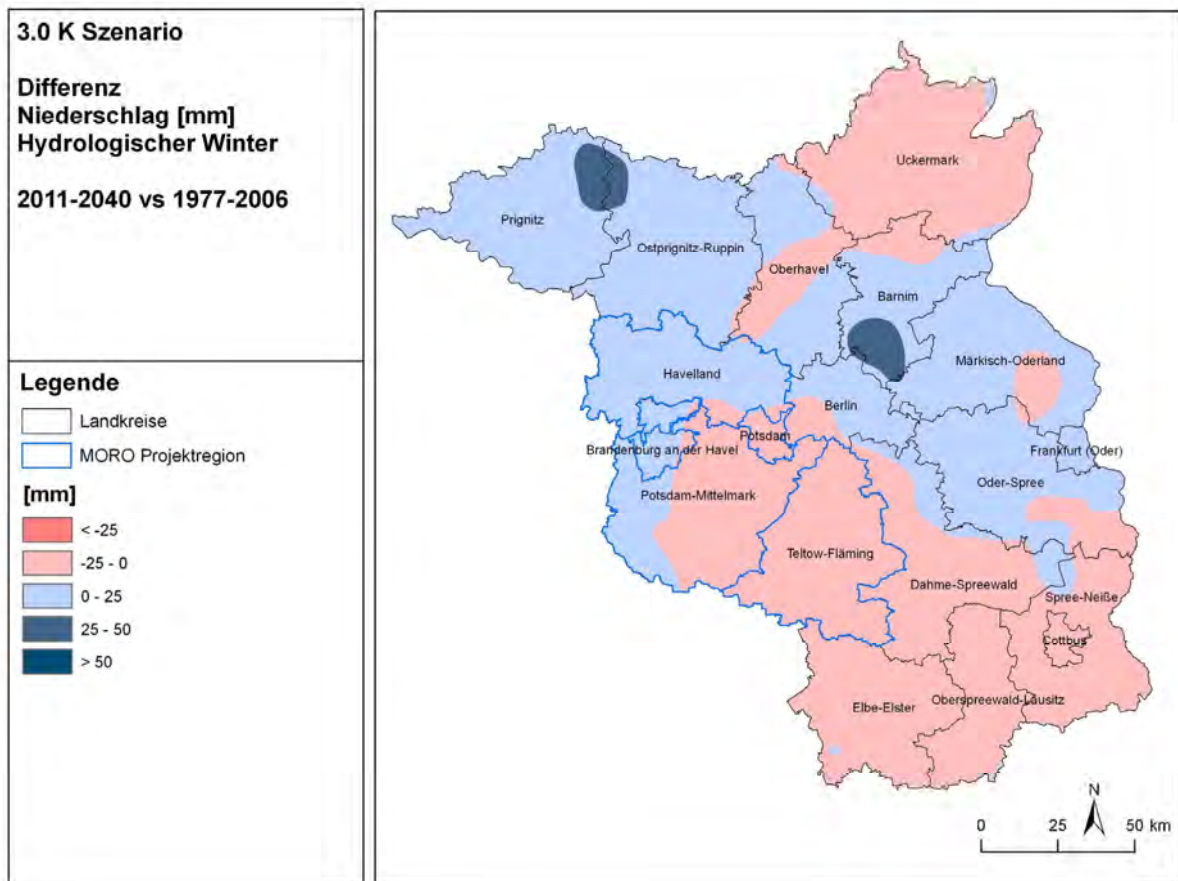
Abb. 1.13: Differenz der Mitteltemperatur (K) während des hydrologischen Winters von November-April, Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario

### 1.3.2.2. Niederschlag

Der Jahresniederschlag (Abb. 1.14) nimmt wie in ganz Brandenburg ab. Dabei liegen die Werte in der Region Havelland-Fläming zwischen etwa -75 mm (mittlerer und östlicher Teil) und -25 mm (Nord- und Südwesten). Dies wird vor allem durch den starken Niederschlagsrückgang im Sommer (hier nicht dargestellt) verursacht, bei dem etwa die gleichen Differenzen wie für das Jahr auftreten. Meist sind allerdings die Differenzen nicht statistisch signifikant und hängen oft nicht unwesentlich von den gewählten Mittlungsperioden ab. So gibt es zum Beispiel im Fall 2011-2040 – 1961-90 (Abb. 1.23) sogar im Havelland eine leichte Zunahme. Im Winterhalbjahr nehmen die Niederschläge zum Teil leicht zu, bei den 2K- und 3K-Szenario im Südosten des Untersuchungsgebietes dagegen ab (Abb. 1.16).



**Abb. 1.14: Differenz des Niederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario**



**Abb. 1.15: Differenz des Niederschlages (mm) während des hydrologischen Winters von November-April, Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario**

### 1.3.2.3. Klimatische Wasserbilanz

Die Klimatische Wasserbilanz nimmt „dramatisch“ ab. Die Absolutwerte der Differenzen (Abb. 1.16) sind größer als die der Mittelwerte von 1977-2006 (Abb. 1.10). Dieser Umstand lässt sich wiederum leicht aus den Änderungen von Temperatur (Zunahme = mehr Verdunstung) und Niederschlag (Abnahme = weniger Wasser) erklären. Das Änderungsmuster für die Wasserbilanz steht damit im engen Zusammenhang mit dem Muster dieser anderen beiden Größen. Das räumliche Änderungsmuster für das hydrologische Sommerhalbjahr ist dem für das Jahr sehr ähnlich, jedoch fällt die Abnahme etwas geringer aus, was bedeutet, dass auch im hydrologischen Winterhalbjahr die Klimatische Wasserbilanz abgenommen hat, wenn auch naturgemäß viel geringer.

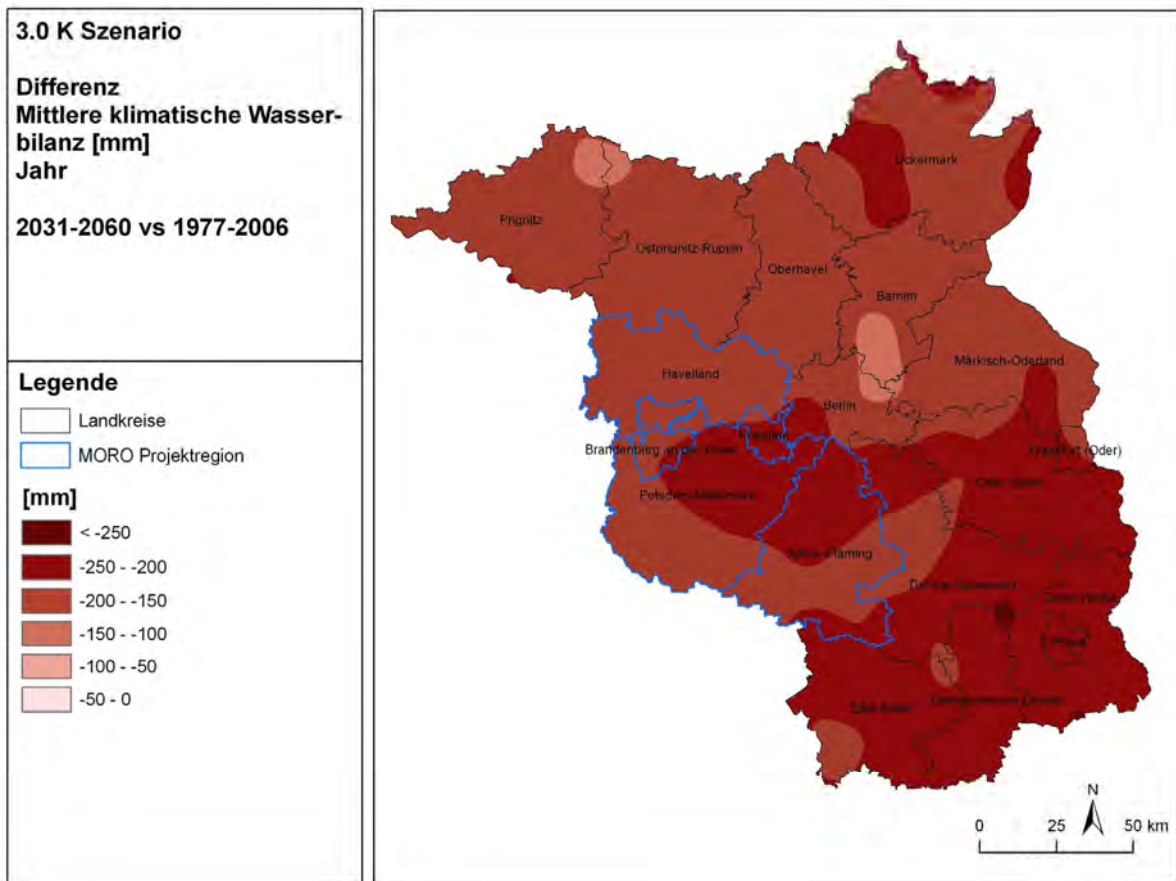


Abb. 1.16: Differenz der Mittleren Klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario

1.3.2.4. Extremereignisse

Mit zunehmendem Temperaturanstieg wird die Anzahl der Sommertage (rot) zu nehmen, gleichzeitig geht die Anzahl der Frosttage (blau) zurück (Abb. 1.17).

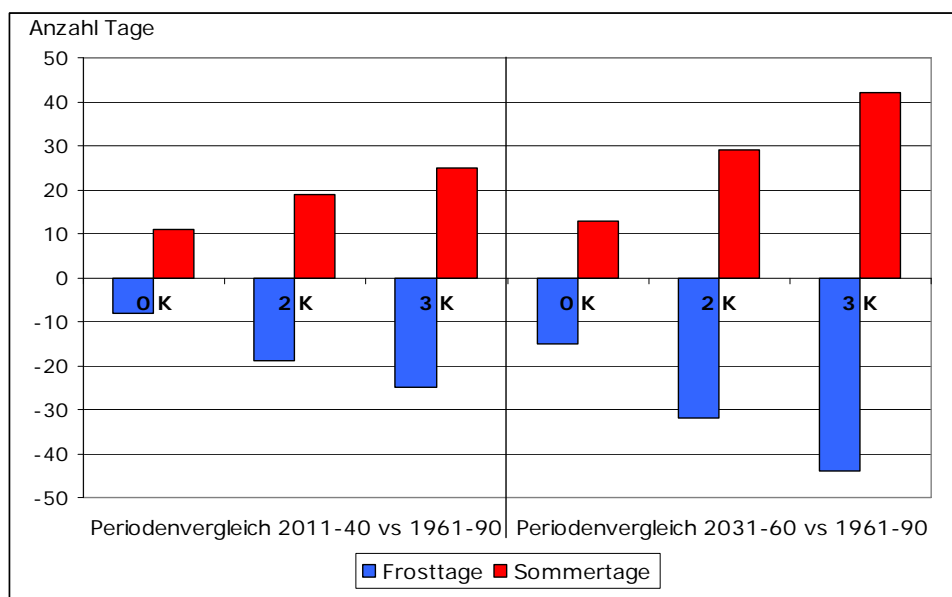


Abb. 1.17: Differenzen der Häufigkeit der Frost- und Sommertage, Vergleich der Zeiträume 2011-2040, bzw. 2031-60 mit den Jahren 1961-90 für das OK, 2K und 3K-Szenario

In den nachfolgenden Tabellen sind die Differenzen der Häufigkeit von Extremereignissen ausgesuchter Station für die Periodenvergleiche aufgeführt.

**Tab. 1.5: Differenzen der Häufigkeit der Frosttage, Szenarienzeiträume 2011-40 und 2031-60 verglichen mit den Basiszeiträumen 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06) für das OK, 2K und 3K-Szenario**

Station	11-40 vs 61-90			11-40 vs 77-06			31-60 vs 61-90			31-60 vs 77-06		
	OK	2K	3K	OK	2K	3K	OK	2K	3K	OK	2K	3K
Potsdam	-10	-22	-28	-6	-18	-23	-17	-34	-47	-13	-30	-43
Luckenw	-10	-22	-27	-6	-18	-23	-17	-34	-46	-13	-30	-42
Treu.b.	-8	-19	-25	-4	-15	-21	-15	-32	-44	-11	-28	-40
Brück	-10	-21	-27	-6	-17	-23	-17	-33	-45	-13	-29	-41
G Kreutz	-10	-21	-27	-6	-17	-23	-17	-33	-45	-13	-29	-41
Brb.-G.	-4	-16	-22	-3	-15	-21	-13	-28	-40	-12	-27	-39
Päwesin	-5	-16	-23	-3	-14	-21	-14	-29	-40	-12	-27	-38
Rathen.	-11	-21	-25	-8	-18	-22	-16	-33	-45	-13	-30	-42
Nauen	-5	-16	-23	-3	-14	-21	-13	-29	-40	-11	-27	-38
Kemnitz	-6	-17	-22	-4	-15	-20	-13	-29	-43	-11	-27	-41
Dahme	-9	-18	-25	-5	-14	-21	-15	-32	-45	-11	-28	-41
Petkus	-9	-20	-26	-5	-16	-22	-15	-33	-47	-11	-29	-43
Da.Eck.	-9	-20	-26	-5	-16	-22	-16	-33	-46	-12	-29	-42
Jüterbog	-8	-19	-25	-4	-15	-21	-15	-32	-44	-11	-28	-40
Mittel	-8	-19	-25	-5	-16	-22	-15	-32	-44	-12	-29	-41

**Tab. 1.6: Differenzen der Häufigkeit der Sommertage, Szenarienzeiträume 2011-40 und 2031-60 verglichen mit den Basiszeiträumen 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06) für das OK, 2K und 3K-Szenario**

Station	11-40 vs 61-90			11-40 vs 77-06			31-60 vs 61-90			31-60 vs 77-06		
	OK	2K	3K	OK	2K	3K	OK	2K	3K	OK	2K	3K
Potsdam	10	18	24	5	13	19	13	28	40	8	23	35
Luckenw	10	19	24	5	14	19	13	29	41	8	24	36
Treu.b.	13	21	28	7	15	22	15	31	46	9	25	40
Brück	10	19	25	5	14	20	13	29	43	8	24	38
G Kreutz	10	19	24	5	14	19	12	29	41	7	24	36
Brb.-G.	13	21	27	6	14	20	14	30	44	7	23	37
Päwesin	12	20	27	5	13	20	14	30	43	7	23	36
Rathen.	9	17	24	5	13	20	11	27	40	7	23	36
Nauen	12	20	26	5	13	19	13	30	42	6	23	35
Kemnitz	10	17	23	6	13	19	12	27	41	8	23	37
Dahme	9	15	21	5	11	17	11	26	37	7	22	33
Petkus	9	15	22	5	11	18	11	25	36	7	21	32
Da.Eck.	12	20	27	7	15	22	14	30	45	9	25	40
Jüterbog	13	22	28	7	16	22	15	32	46	9	26	40
Mittel	11	19	25	5	13	19	13	29	42	7	23	36



**Tab. 1.9: Differenzen der Häufigkeit der Starkniederschlagstage, Szenarienzeiträume 2011-40 und 2031-60 verglichen mit den Basiszeiträumen 1961-1990 (61-90) und 1977-2006 (77-06) für das OK, 2K und 3K-Szenario**

Station	11-40 vs 61-90			11-40 vs 77-06			31-60 vs 61-90			31-60 vs 77-06		
	OK	2K	3K	OK	2K	3K	OK	2K	3K	OK	2K	3K
Potsdam	-1	0	0	0	1	1	-1	0	-1	0	1	0
Luckenw	-1	1	-1	0	2	0	0	0	-1	1	1	0
Treu.b.	1	1	1	0	0	0	0	1	1	-1	0	0
Brück	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1
G Kreuz	-1	-1	0	0	0	1	-2	0	-2	-1	1	-1
Brb.-G.	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
Päwesin	-1	0	0	0	1	1	-1	0	-1	0	1	0
Rathen.	1	1	1	0	0	0	0	2	0	-1	1	-1
Nauen	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	-1	1	0
Kemnitz	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	-1	-1	-1
Dahme	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0	-1	-1	0	-1
Petkus	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	-1
Da.Eck.	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
Jüterbog	0	1	0	-1	0	-1	0	2	1	-1	1	0
Mittel	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0

In den Zukunftsszenarien setzen sich die Trends, wie sie im Beobachtungszeitraum auftraten, in ähnlicher Weise fort. So gibt es bei den Tagen mit Starkniederschlägen praktisch keine Änderungen. Deutlich fallen allerdings besonders beim 3K-Szenarium die Häufigkeitsänderungen bei den temperaturbezogenen Ereignistagen aus. Hier gehen die Frosttage um 48 % zurück (2031-2060 vs 1977-2006; alle weiteren Angaben beziehen sich auch auf die beiden Zeiträume und die Mittel). Dagegen nehmen die Sommertage um 84 % und die heißen Tage sogar um 156 % zu. Damit einhergeht die Zunahme der Hitzebelastung am Tag. Dagegen ist die Zunahme der Tropennächte nur schwach ausgeprägt.

## 1.4. Zusammenfassung

Ein Temperaturanstieg im Mittel um 2K in Deutschland bis zum Jahr 2060, welcher dem A1B-Szenariolauf nahekommt, wird zu einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur um bis zu 2,4K in der MORO-Projektregion Havelland-Fläming führen. Im Vergleich zu den Jahren 1961-90 kann die Temperatur im 3K-Szenario bis zur Mitte des Jahrhunderts regional sogar um bis zu 3,3K ansteigen. Der Anstieg wird am höchsten in Teilen Potsdam-Mittelmarks und Teltow-Flämings sein.

Bei den Extremereignissen wird es zu einer deutlichen Zunahme der Sommer- und Hitzetage bei ansteigenden Temperaturen zur Mitte des Jahrhunderts kommen. Durch die stärkere Hitzebelastung werden die Menschen in der Region einem höheren Gesundheitsrisiko ausgesetzt. Auf der anderen Seite werden die Tage mit Temperaturen unterhalb des Frostpunktes, also die Frosttage, zurückgehen.

Die Veränderung des Jahresniederniederschlages wird nicht signifikant sein. Allerdings kann von einem leichten Rückgang des Niederschlages in Teilen Potsdam-Mittelmarks und Teltow-Flämings während der Hauptwachstumszeit ausgegangen werden, mit einer leichten Zunahme kann dagegen im östlichen Havelland gerechnet werden.

Die Klimatische Wasserbilanz ist in großen Teilen Brandenburgs negativ, im Mittel der Jahre 1961-90 lag sie bei bis zu -150 mm. Durch ansteigende Temperaturen wird die Verdunstung zukünftig weiter zunehmen. Die Folge wird ein weiterer Rückgang der Klimatischen Wasserbilanz sein. Bei etwa gleichbleibendem Niederschlagsniveau wird daher insbesondere in der Wachstumszeit das Wasserdargebot in einigen Regionen zurückgehen.

## 1.5. Anhang

Im Anhang befinden sich, nach Szenarienzeiträumen und thematischer Anordnung sortiert, die Grafiken. Soweit die Grafiken schon in den vorangegangenen Kapiteln eingebunden wurden, erfolgt ein Verweis auf die Abbildungsnummer.

## 1.5.1. Szenarienzeitraum 2011-40

## 1.5.1.1. Vergleich zum Basiszeitraum 1961-90

## 1.5.1.1.1. Temperatur

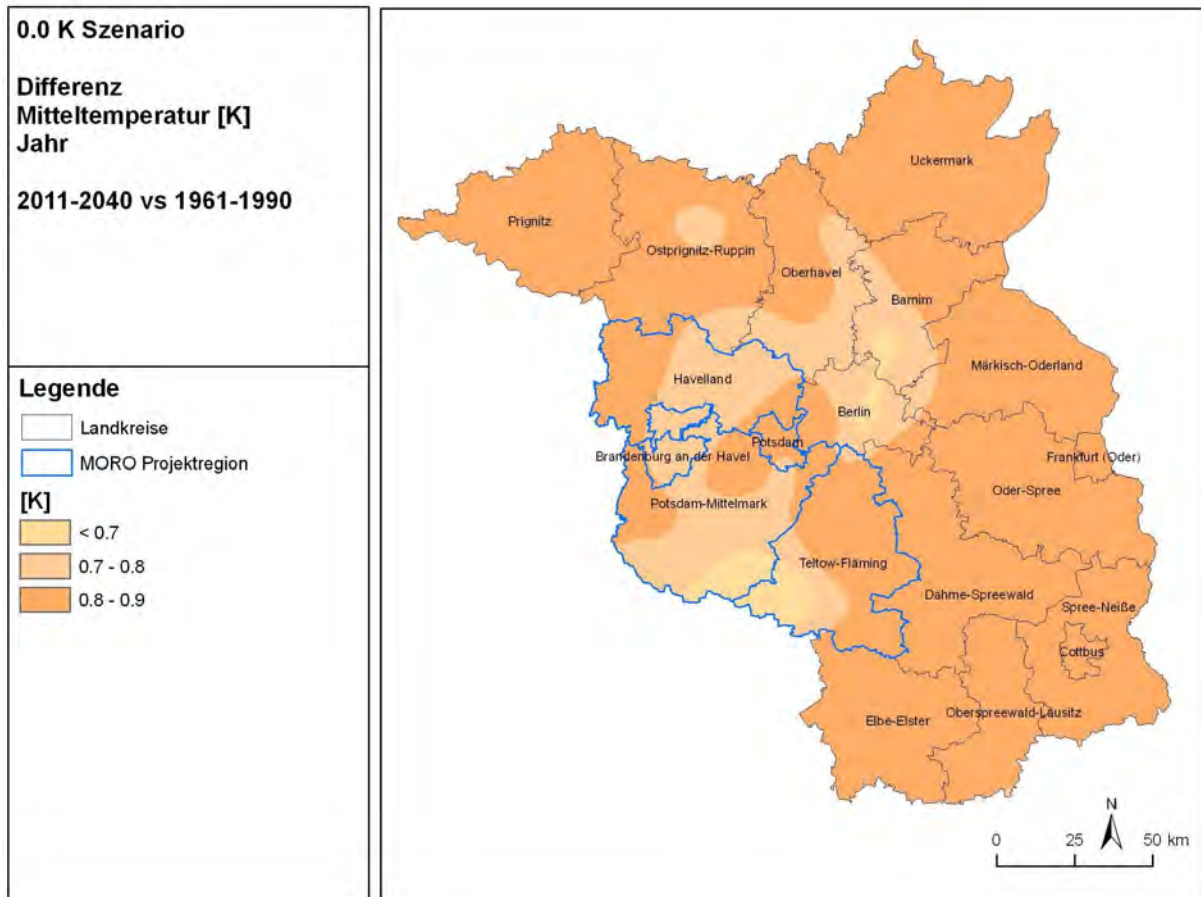


Abb. 1.18: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario

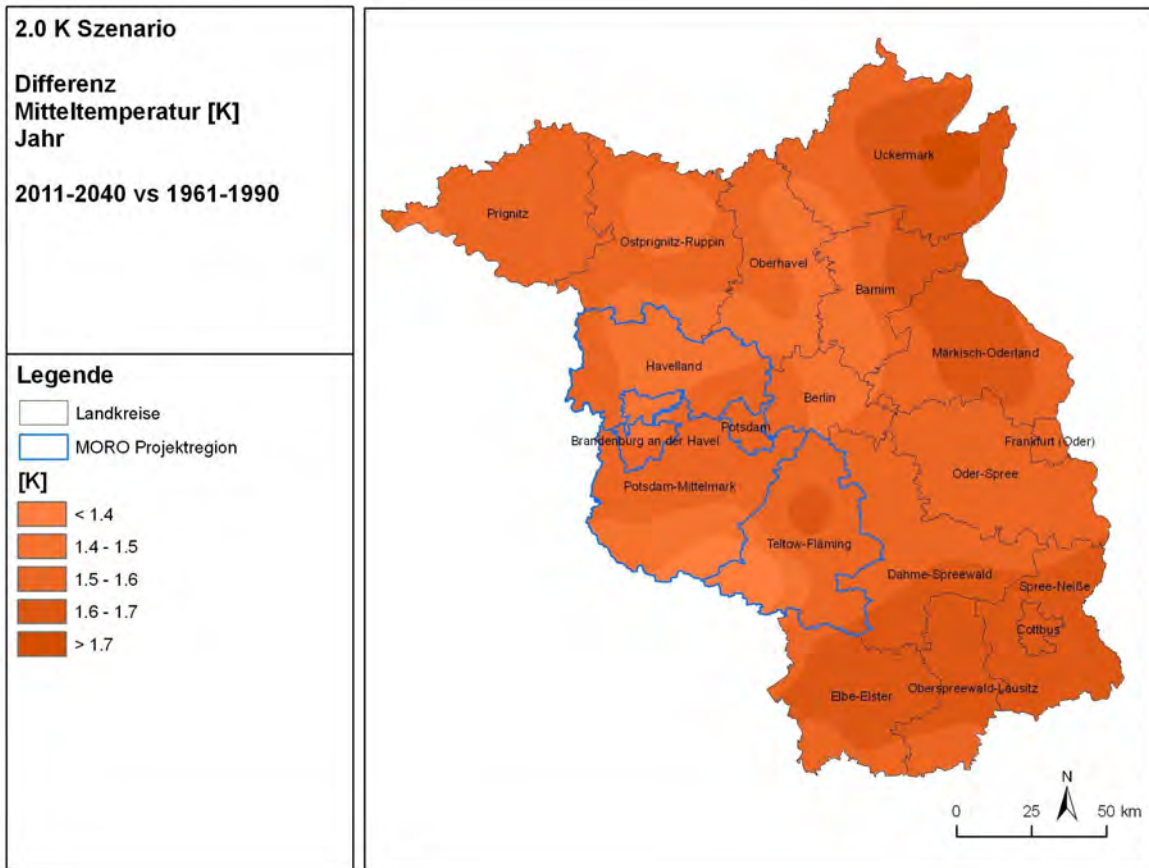


Abb. 1.19: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario

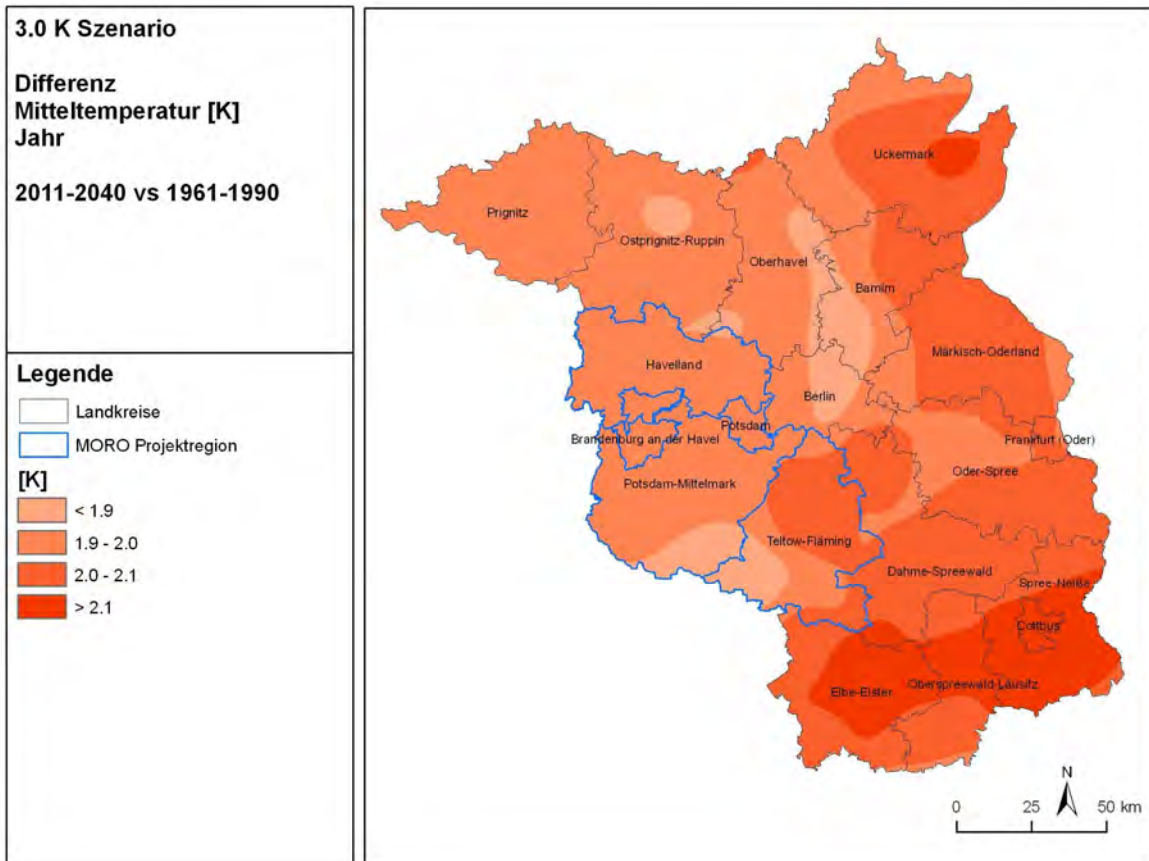


Abb. 1.20: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario

## 1.5.1.1.2. Niederschlag

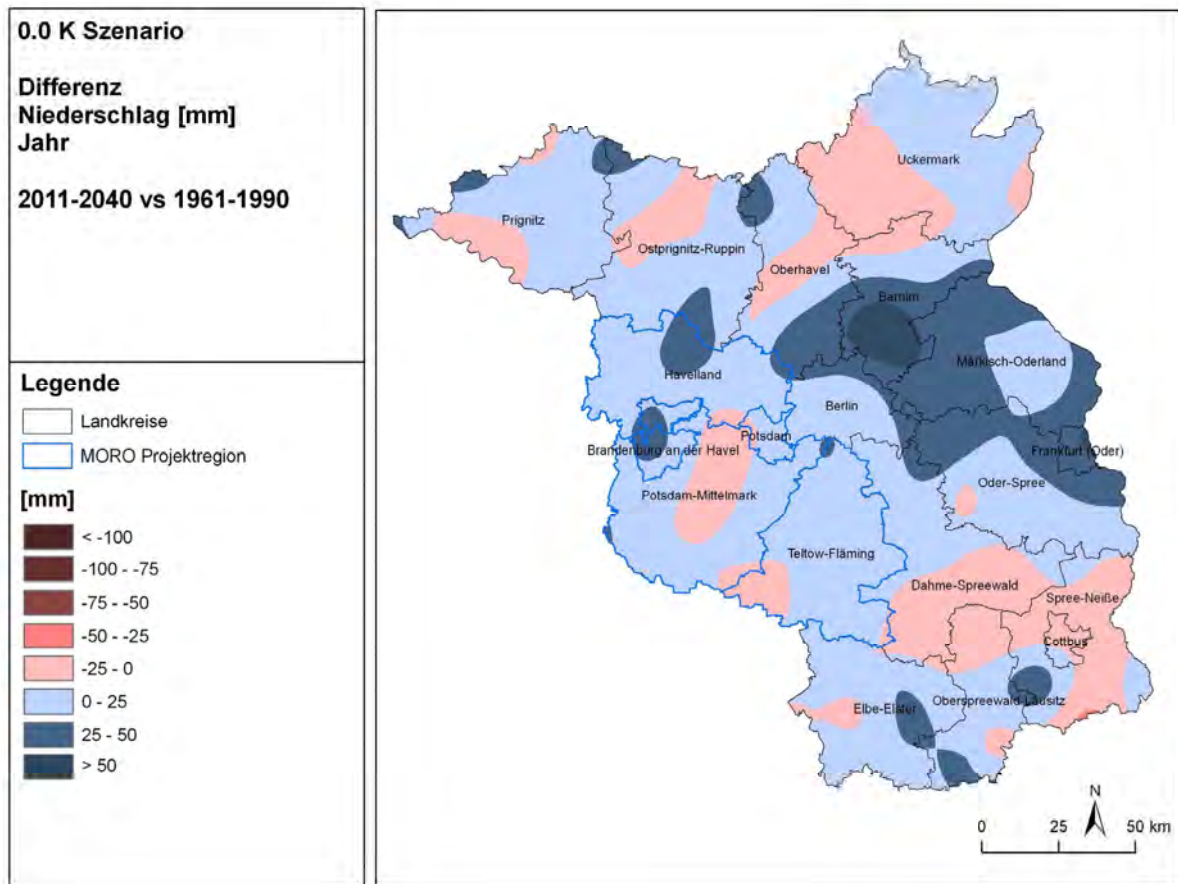


Abb. 1.21: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario

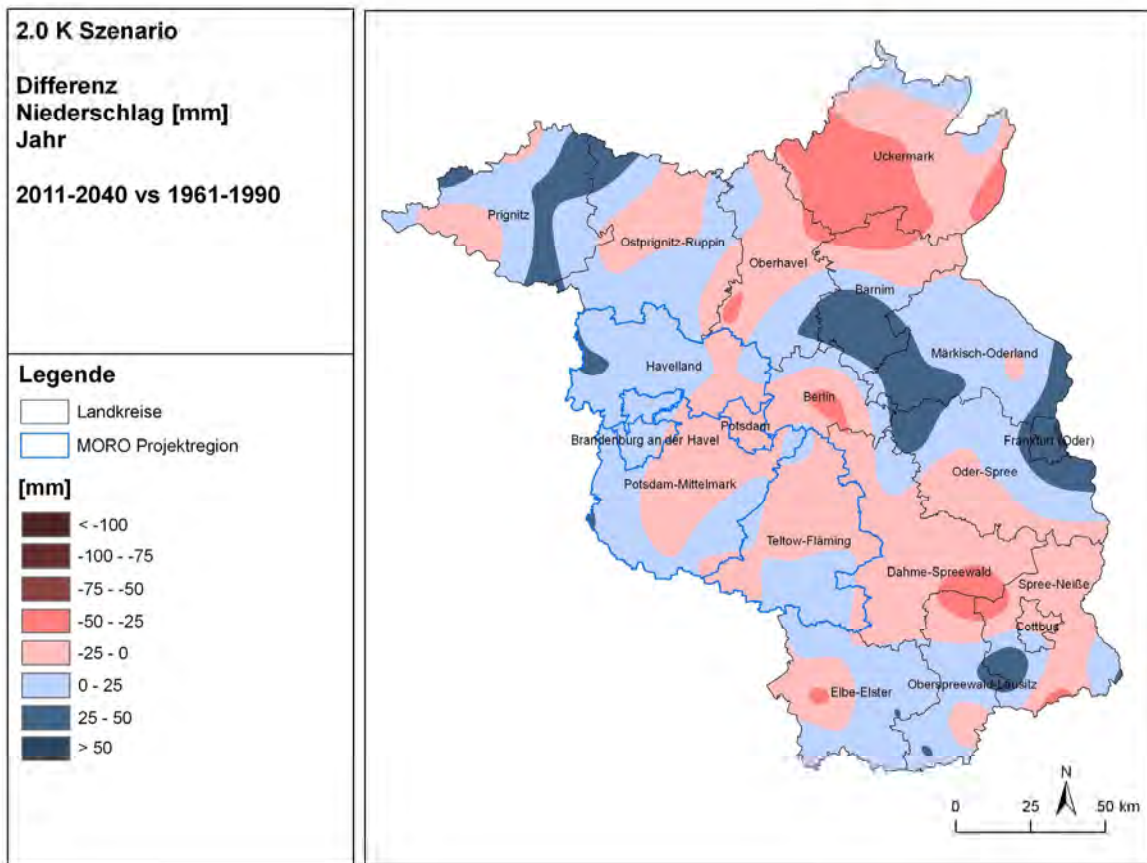


Abb. 1.22: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario

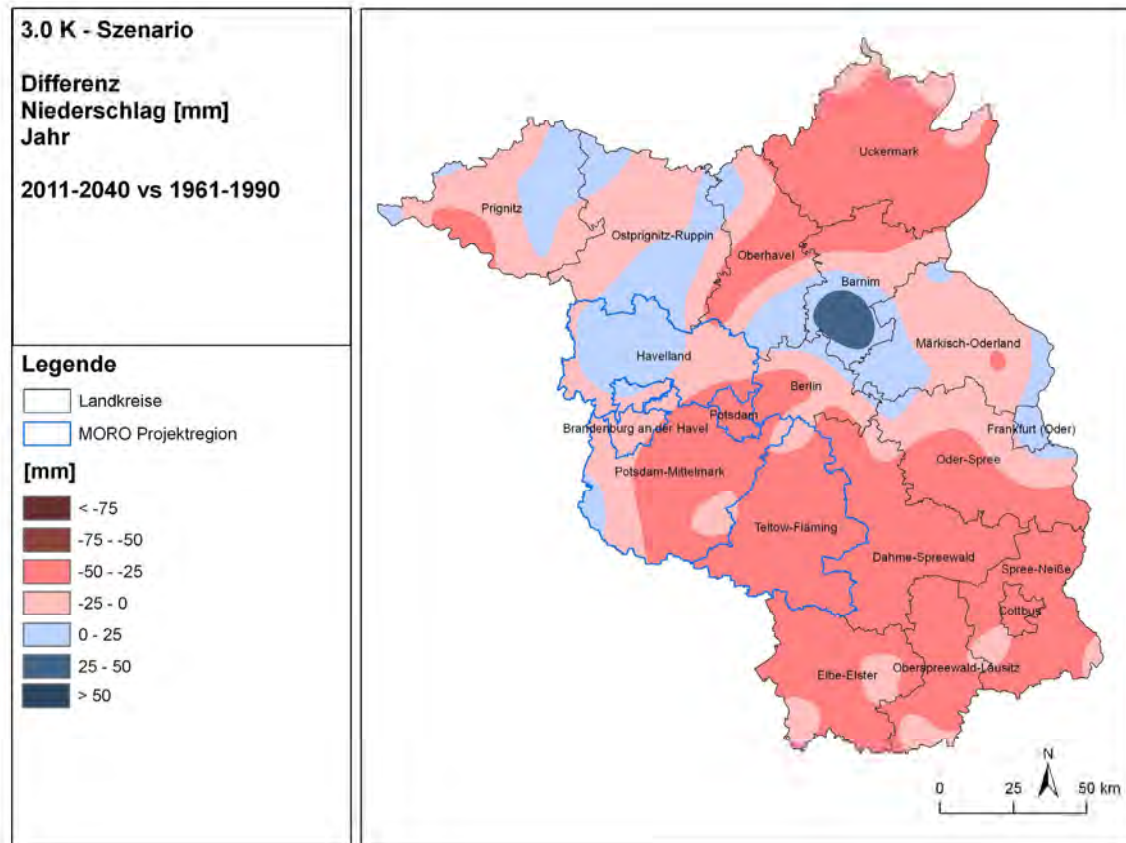


Abb. 1.23: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario

## 1.5.1.1.3. Klimatische Wasserbilanz

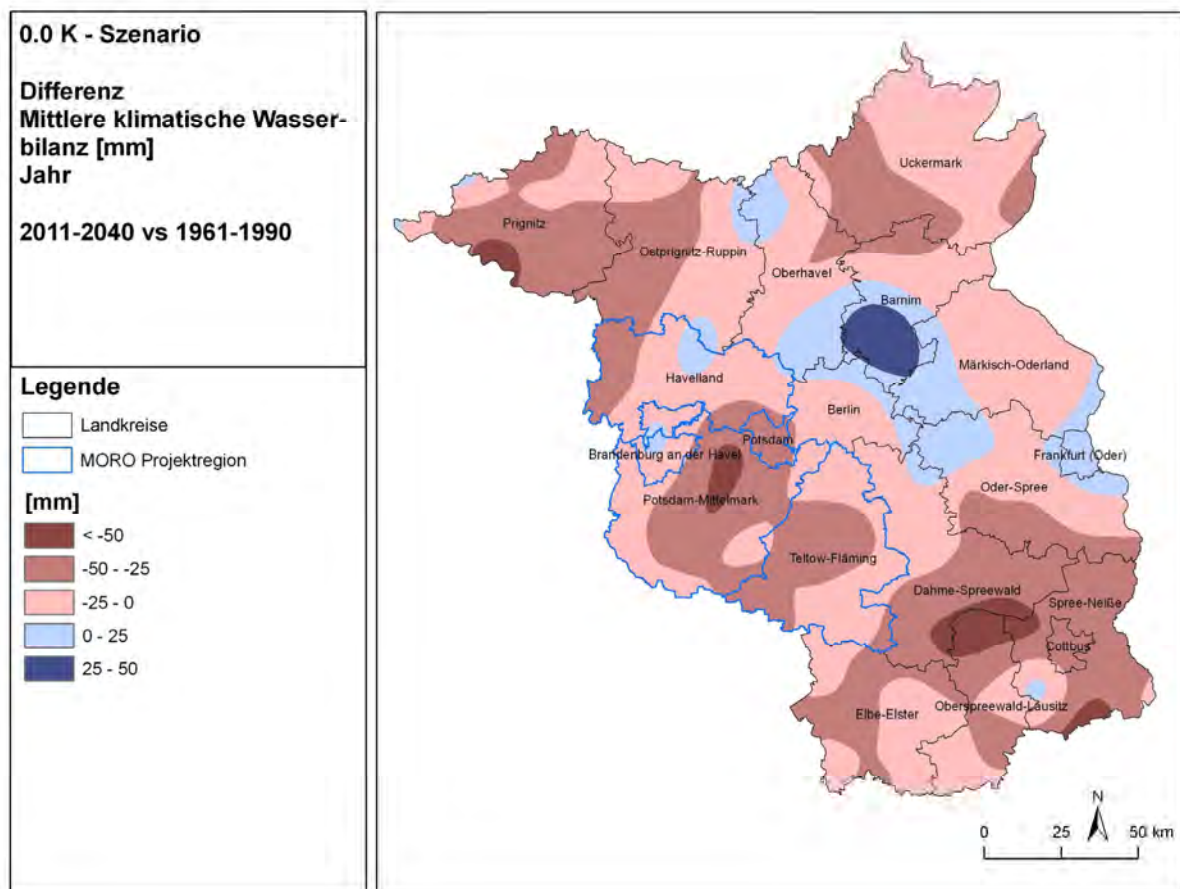


Abb. 1.24: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario

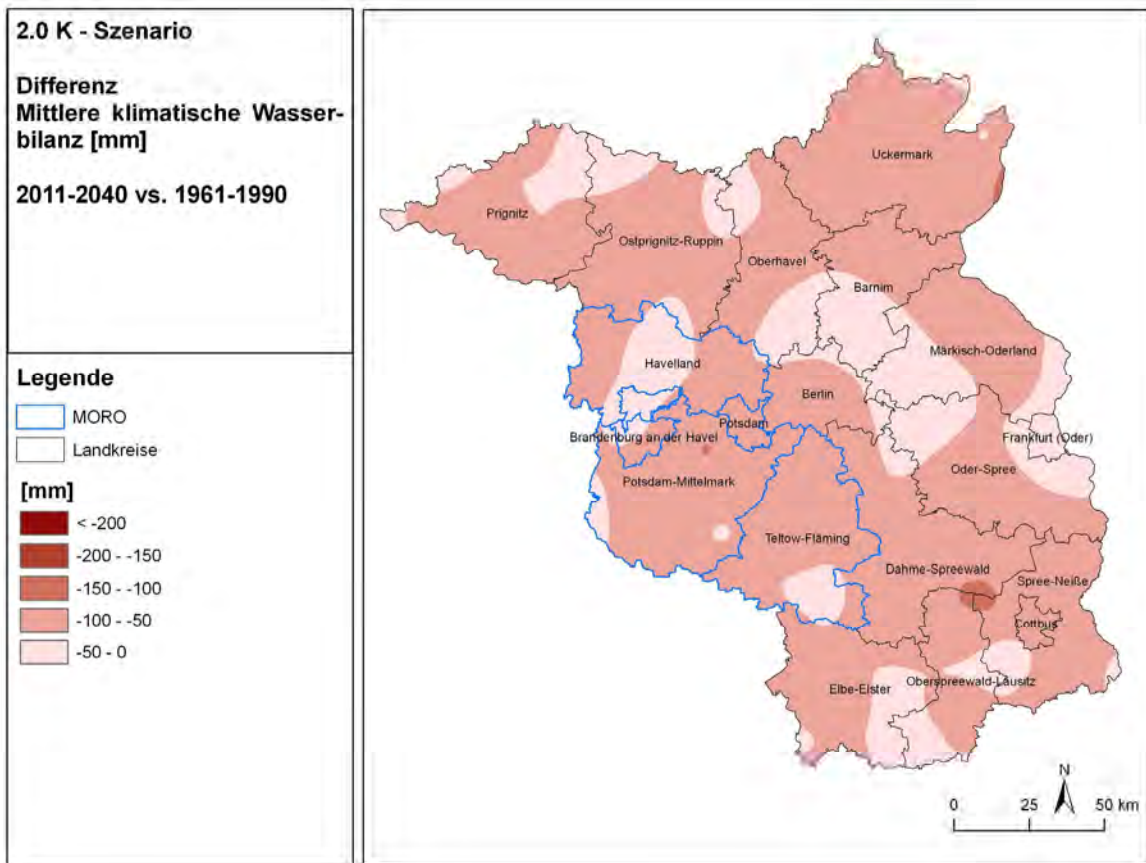


Abb. 1.25: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario

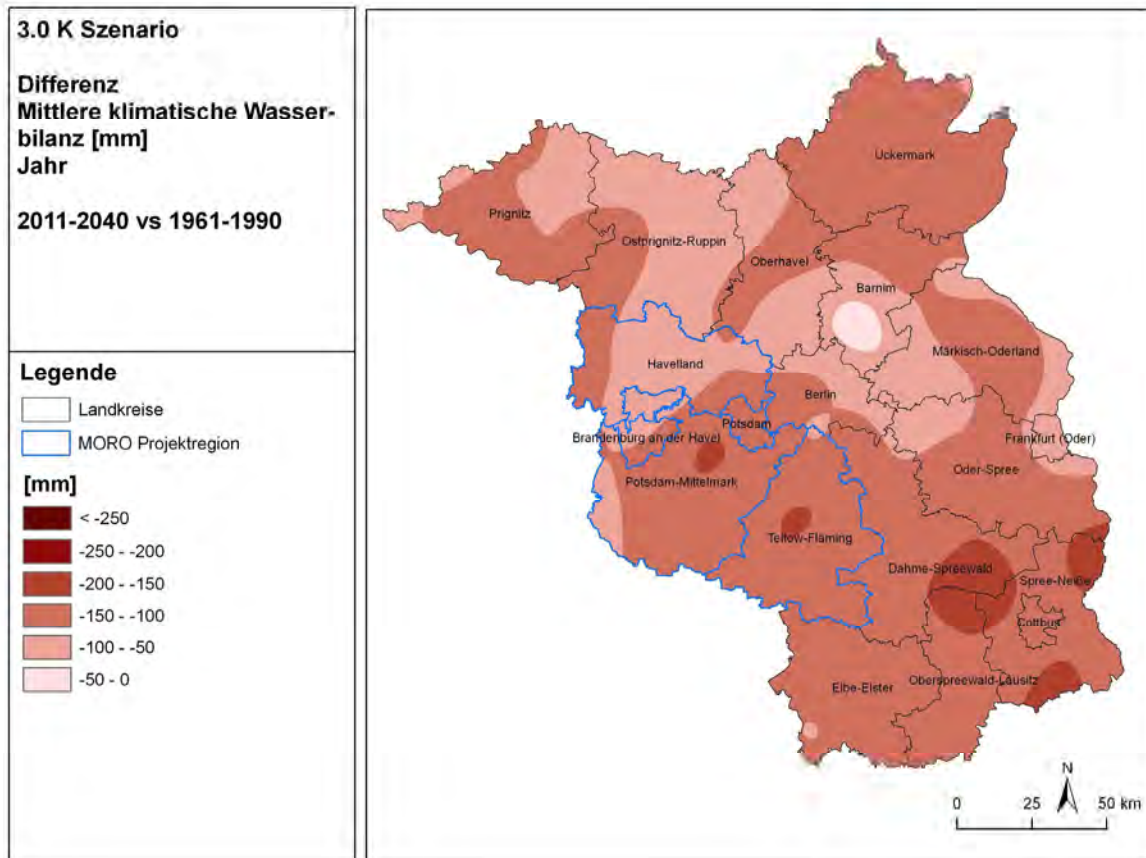
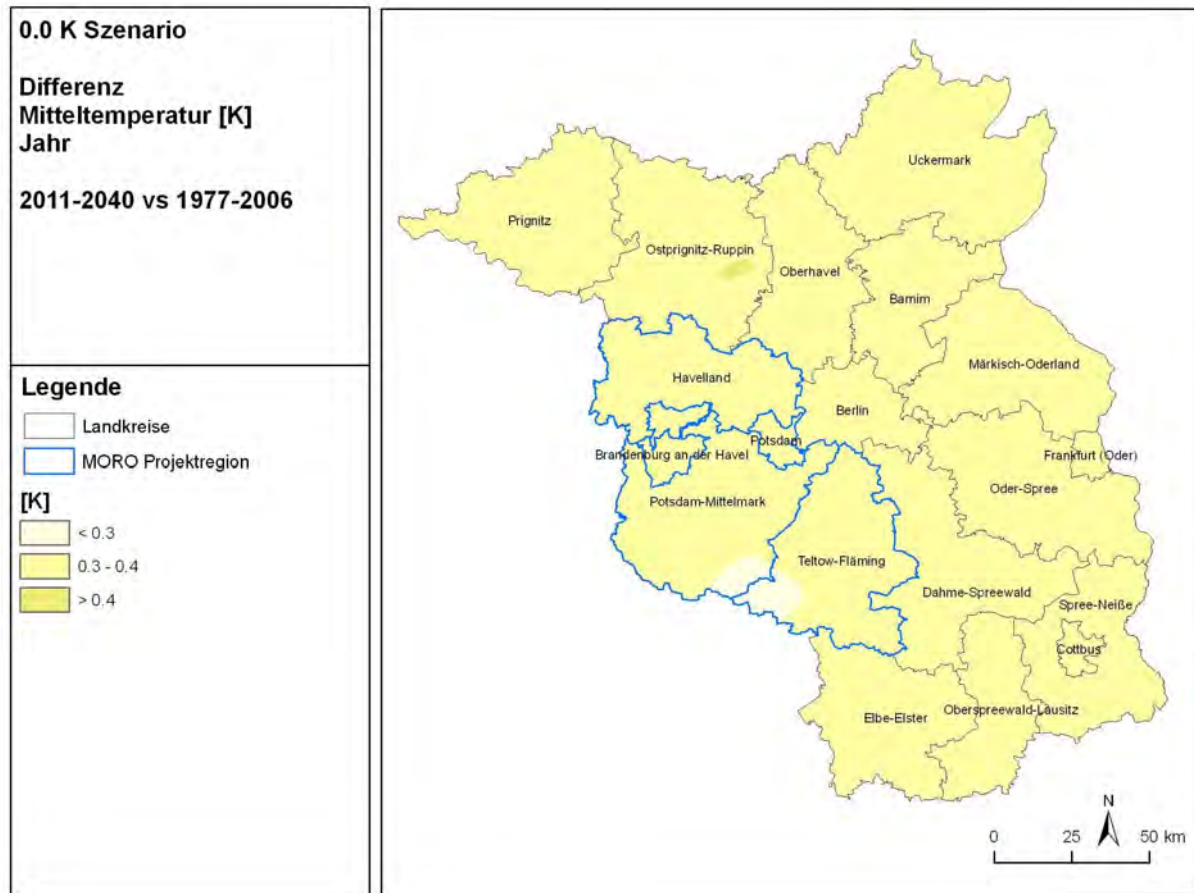


Abb. 1.26: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario

## 1.5.1.2. Vergleich zum Basiszeitraum 1977-2006

## 1.5.1.2.1. Temperatur



**Abb. 1.27: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 0K-Szenario**

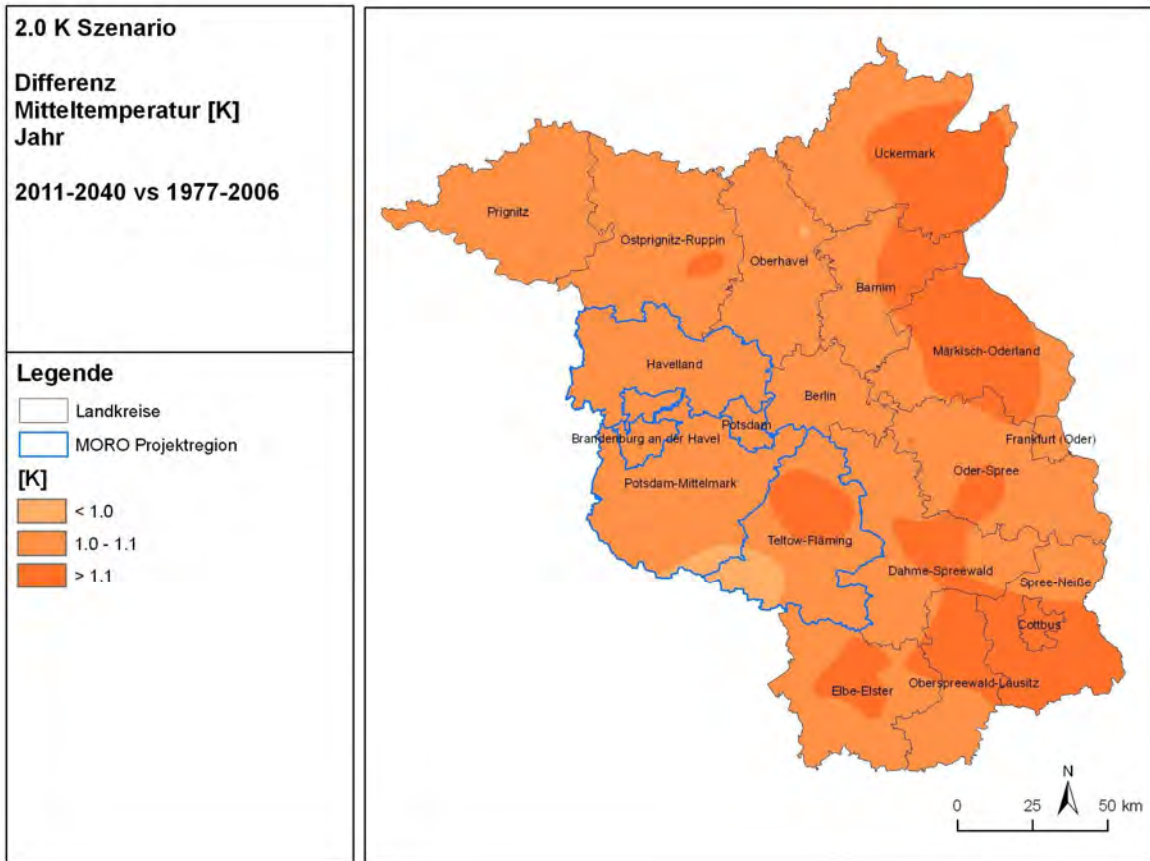


Abb. 1.28: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario

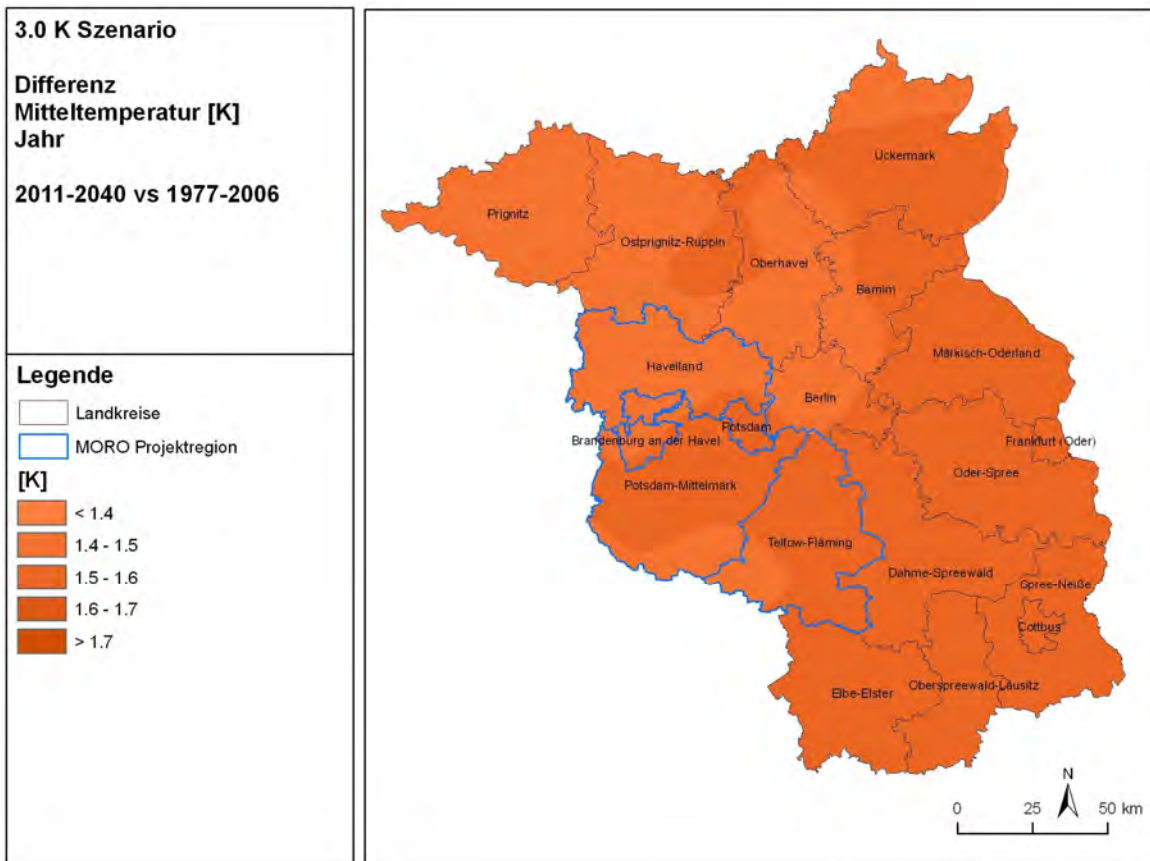


Abb. 1.29: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario

## 1.5.1.2.2. Niederschlag

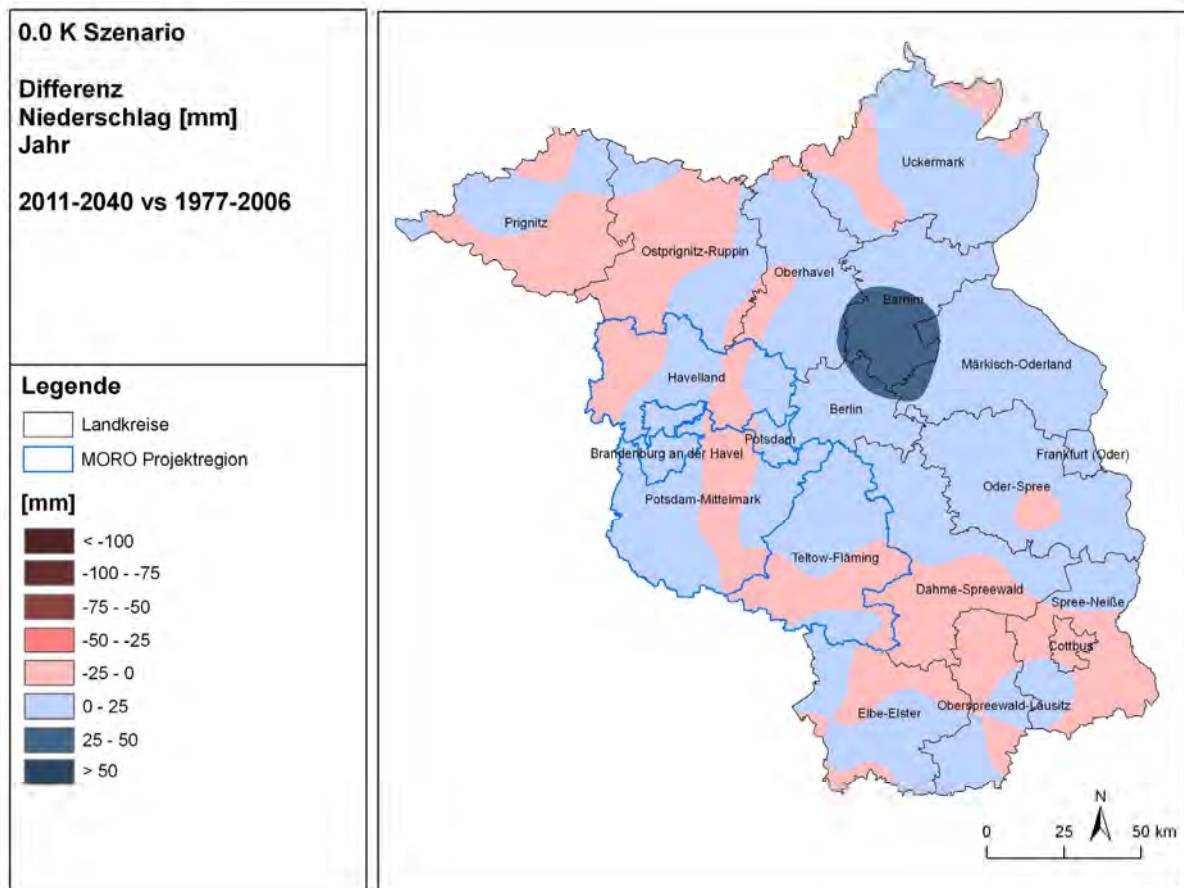


Abb. 1.30: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im OK-Szenario

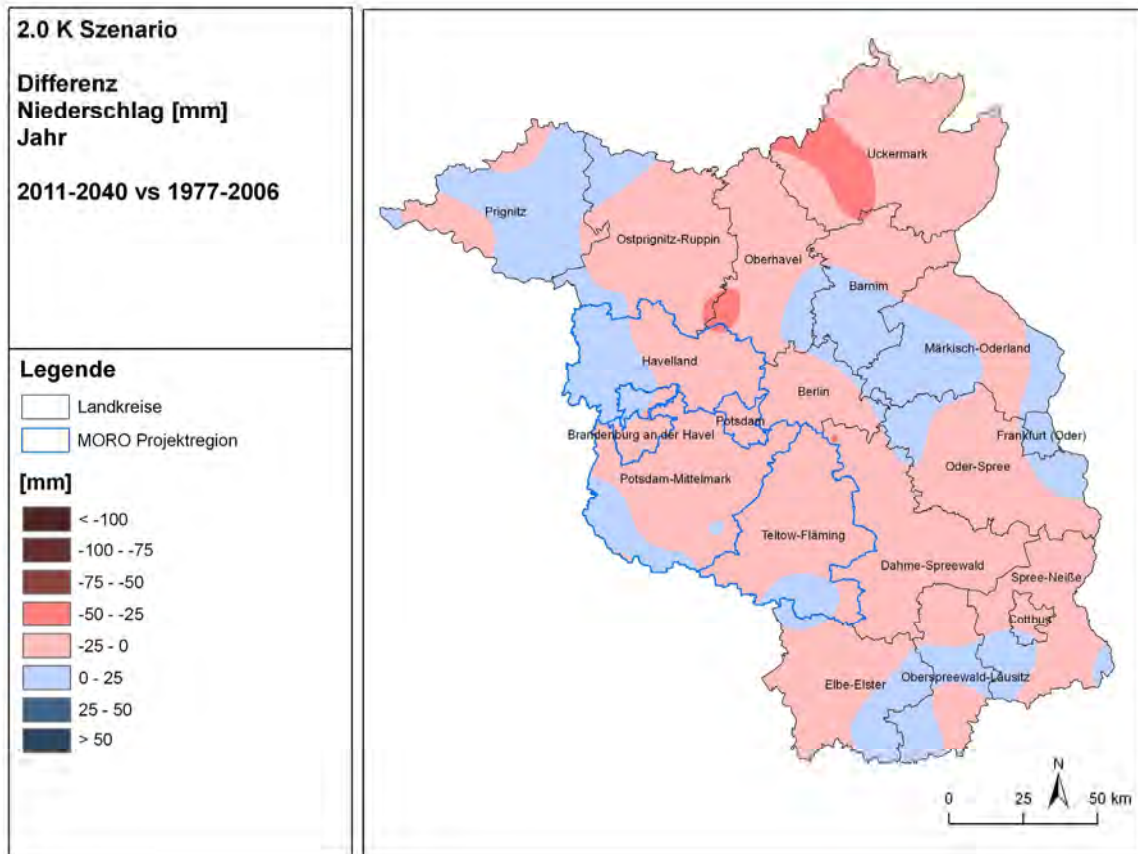


Abb. 1.31: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario

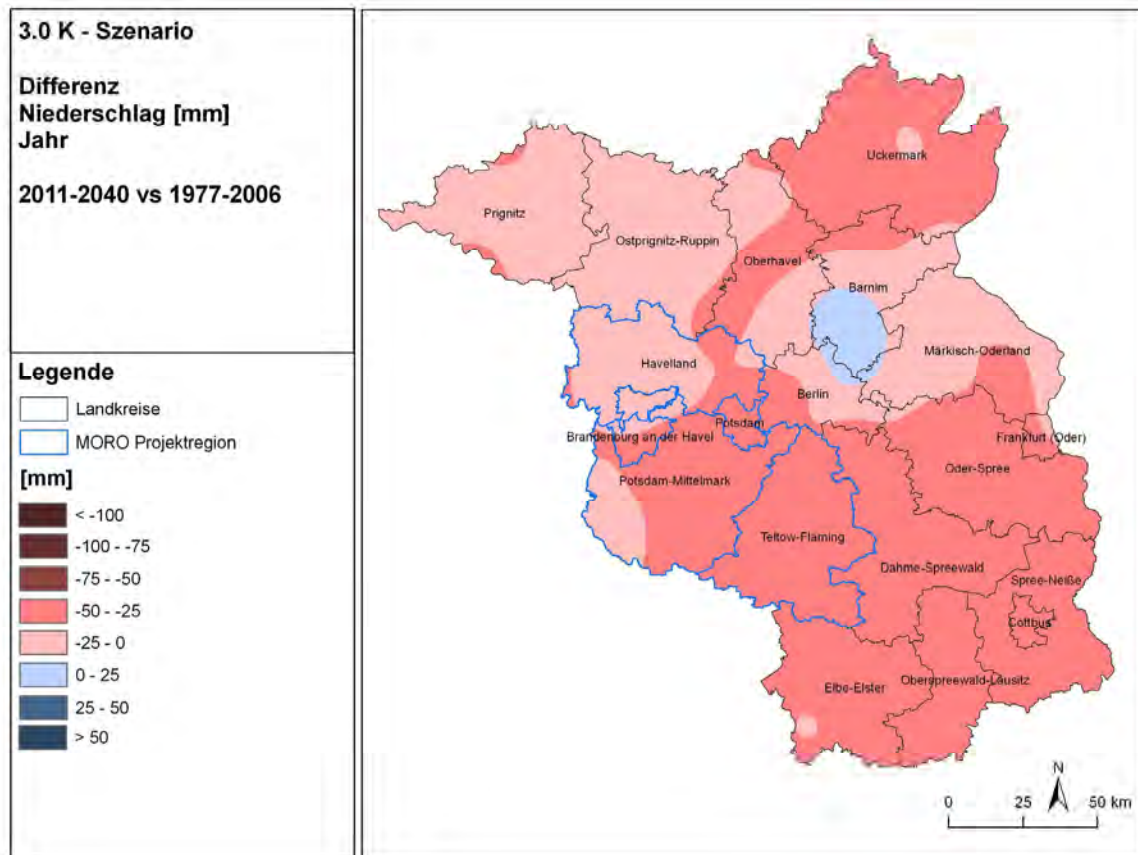


Abb. 1.32: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario

## 1.5.1.2.3. Klimatische Wasserbilanz

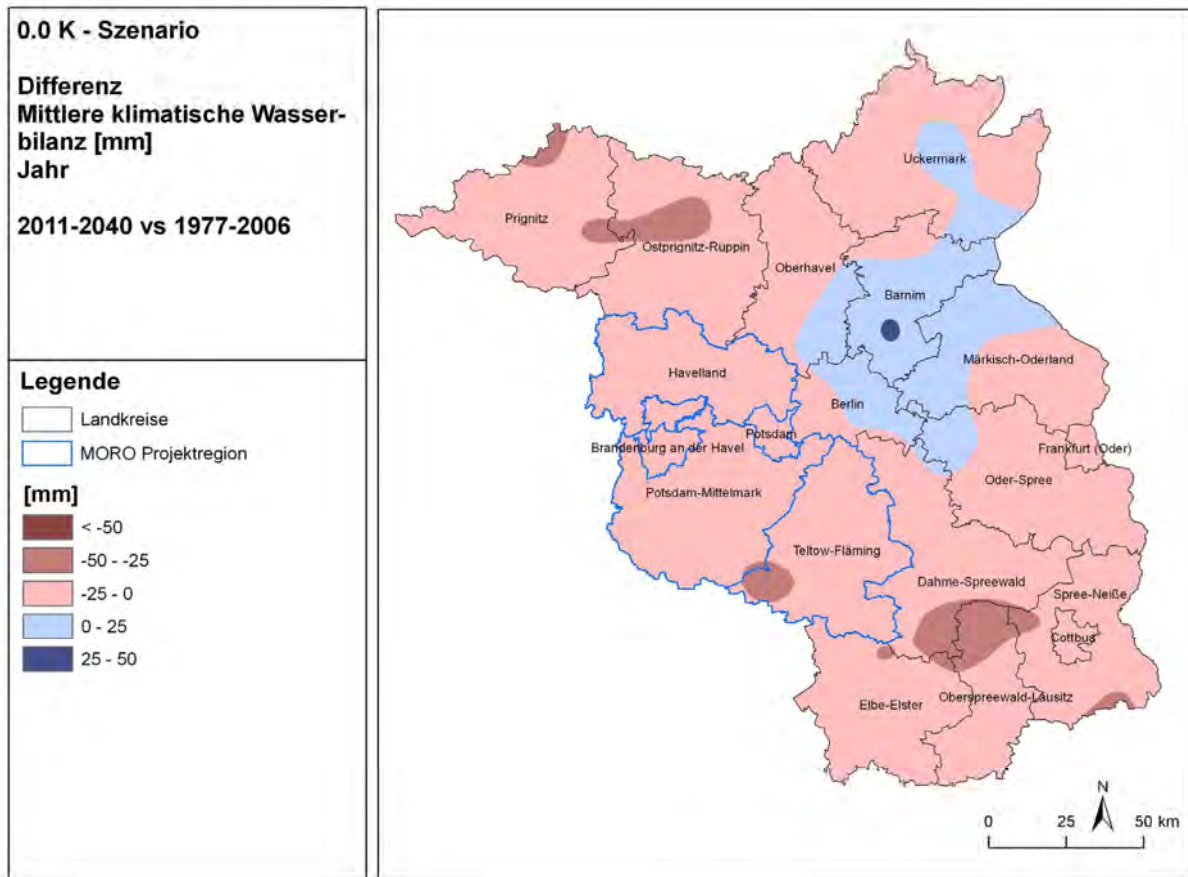


Abb. 1.33: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im OK-Szenario

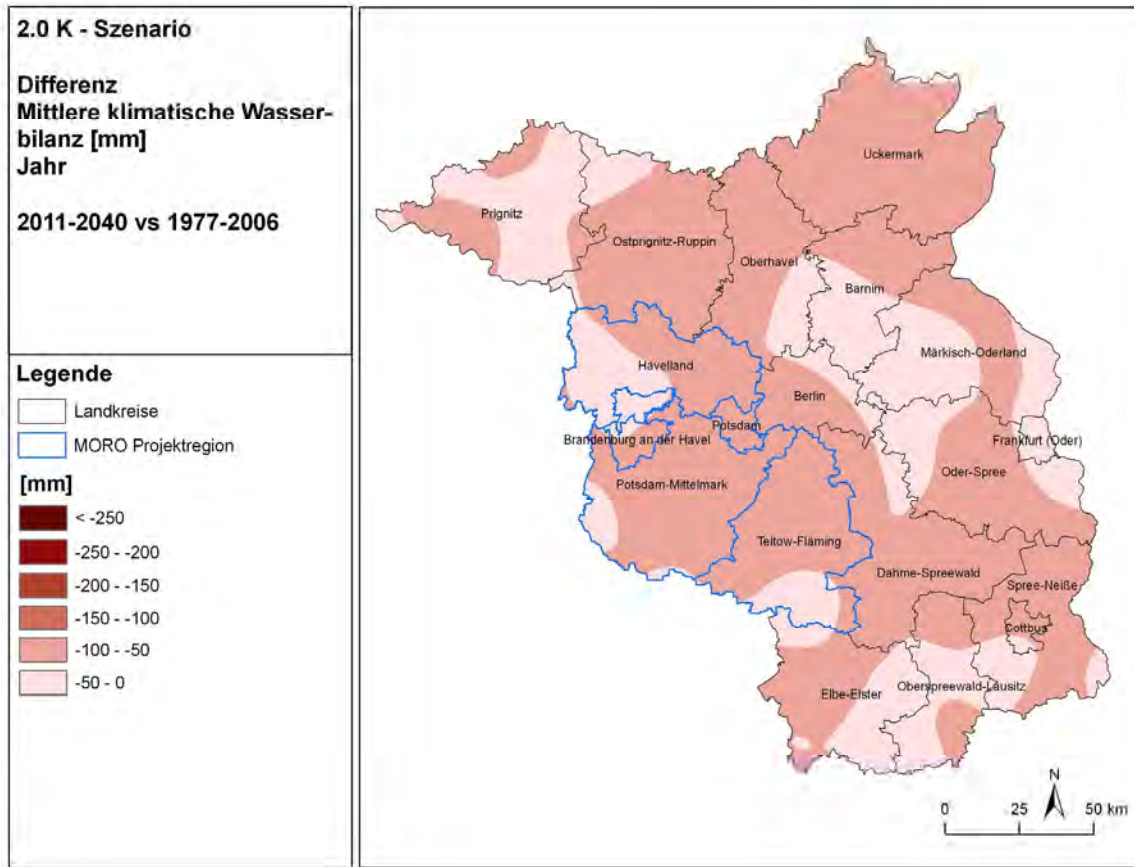


Abb. 1.34: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario

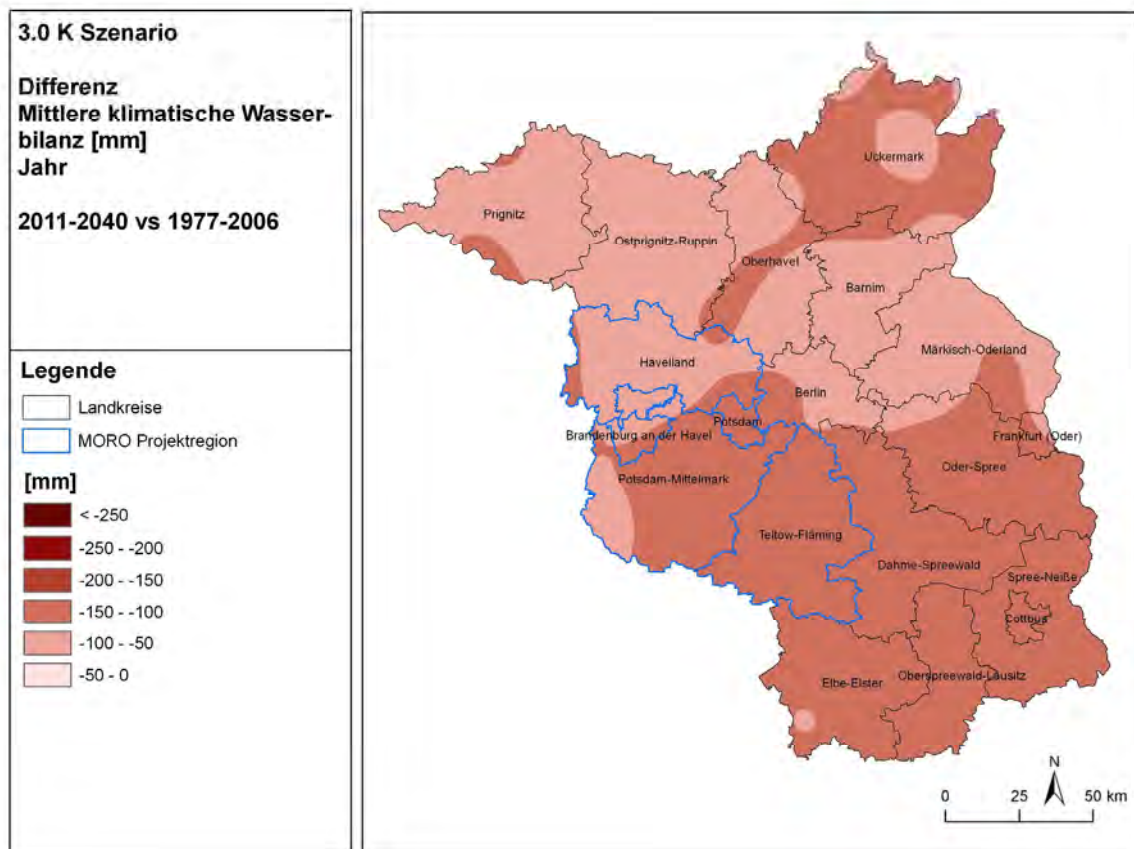


Abb. 1.35: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2011-2040 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario

## 1.5.2. Szenarienzeitraum 2031-60

## 1.5.2.1. Vergleich mit dem Basiszeitraum 1961-90

## 1.5.2.1.1. Temperatur

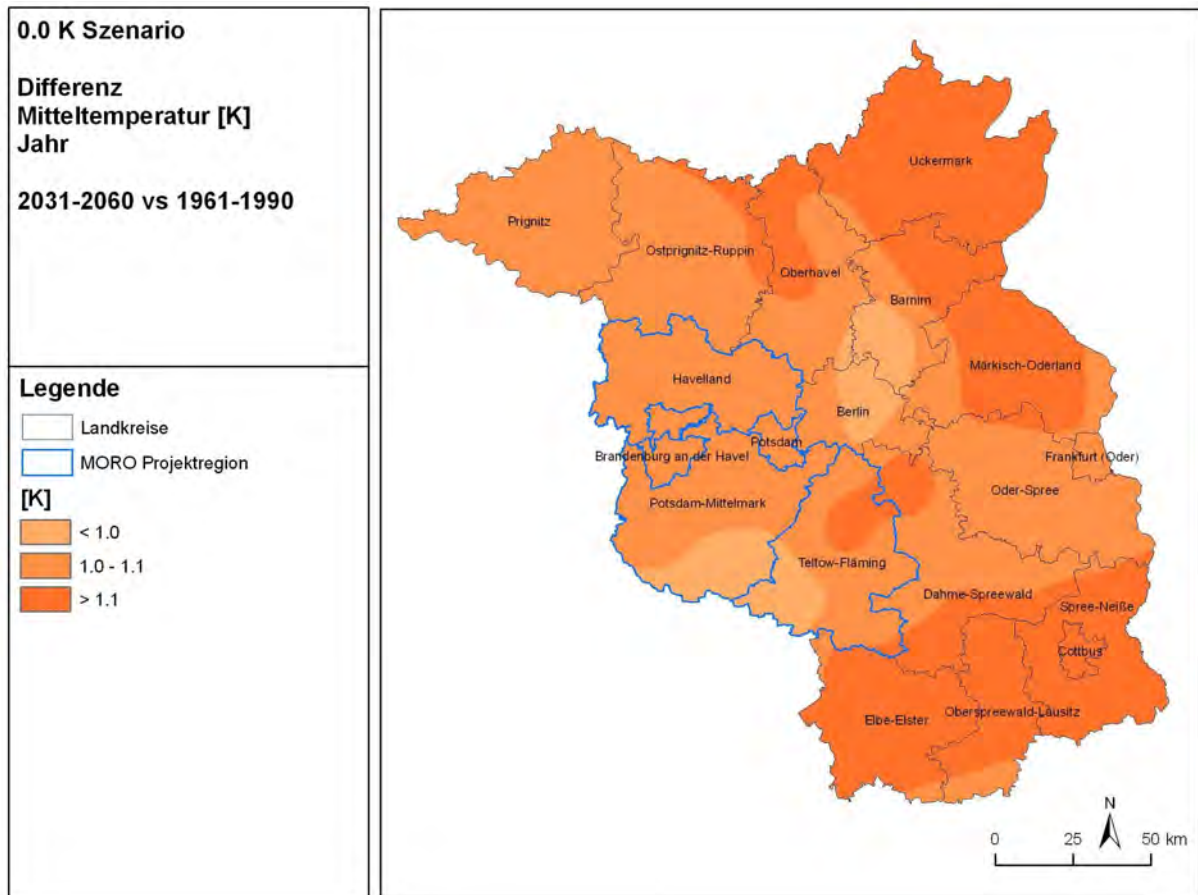


Abb. 1.36: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario

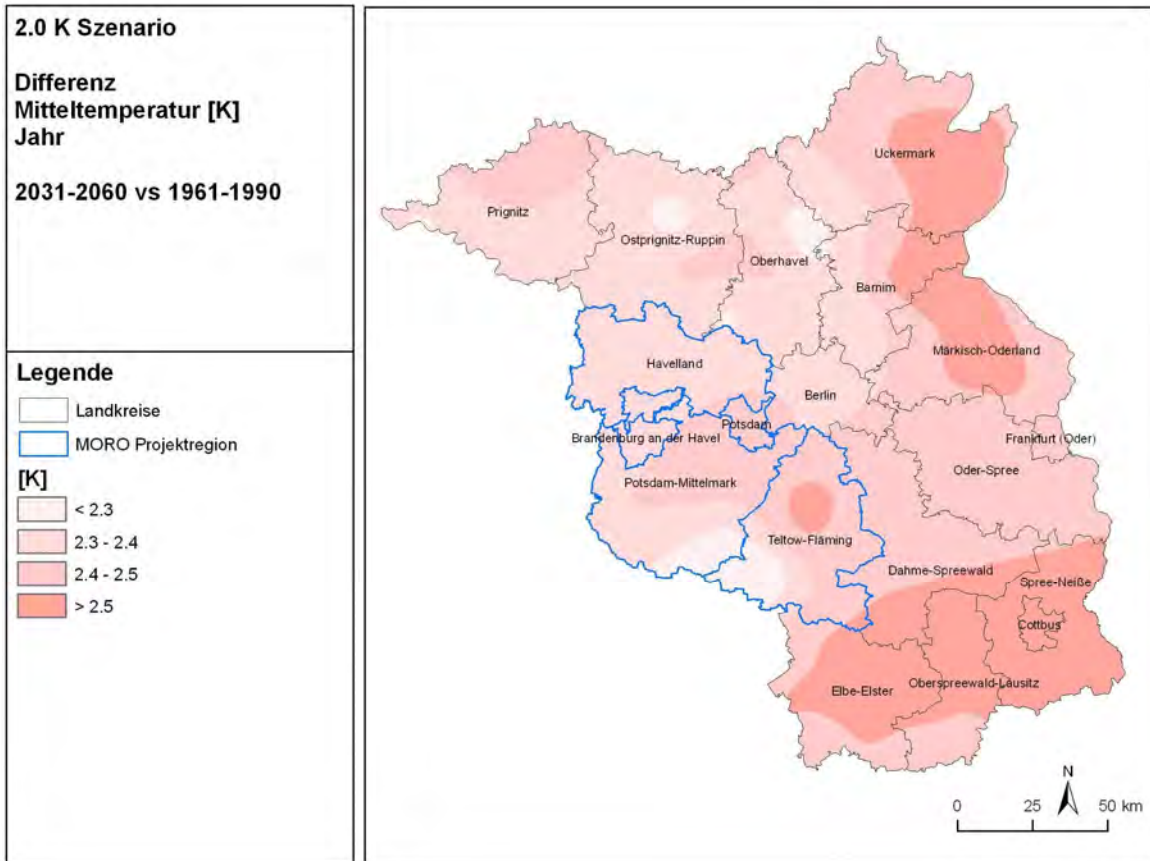


Abb. 1.37: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario

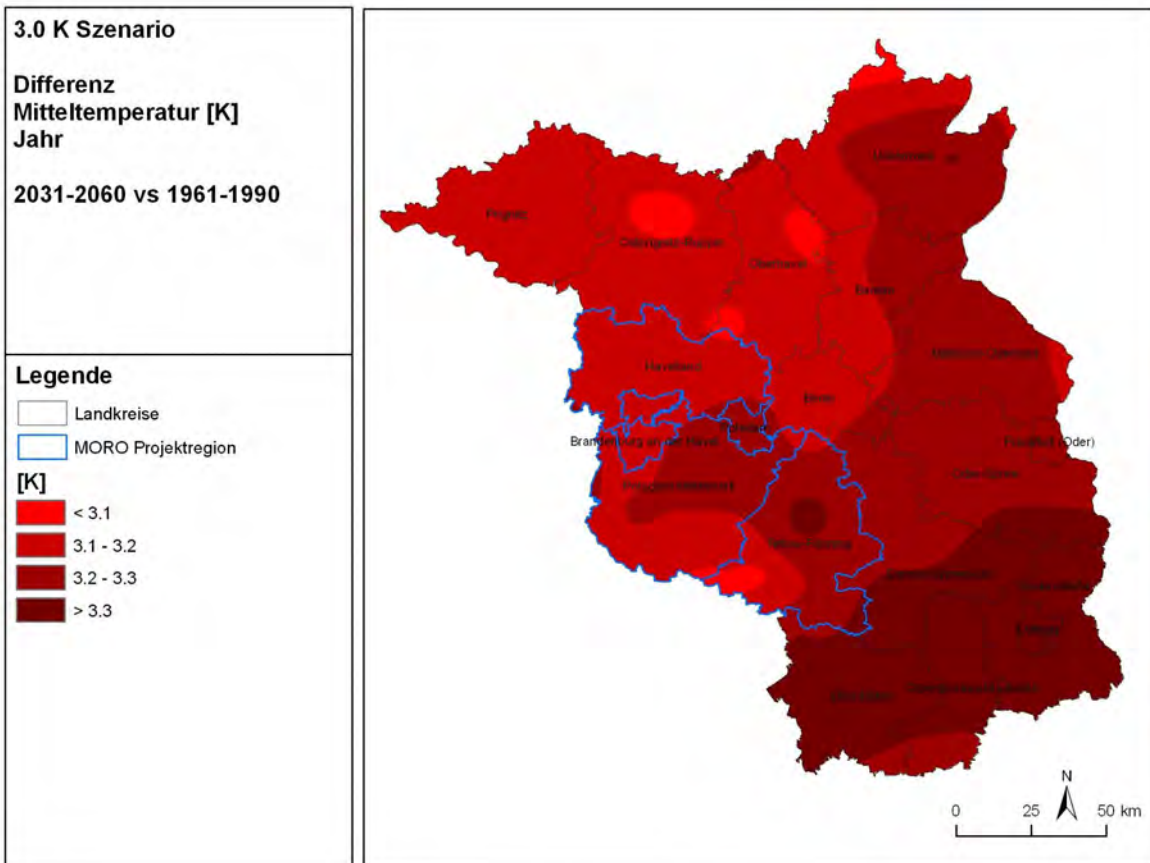


Abb. 1.38: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario

## 1.5.2.1.2. Niederschlag

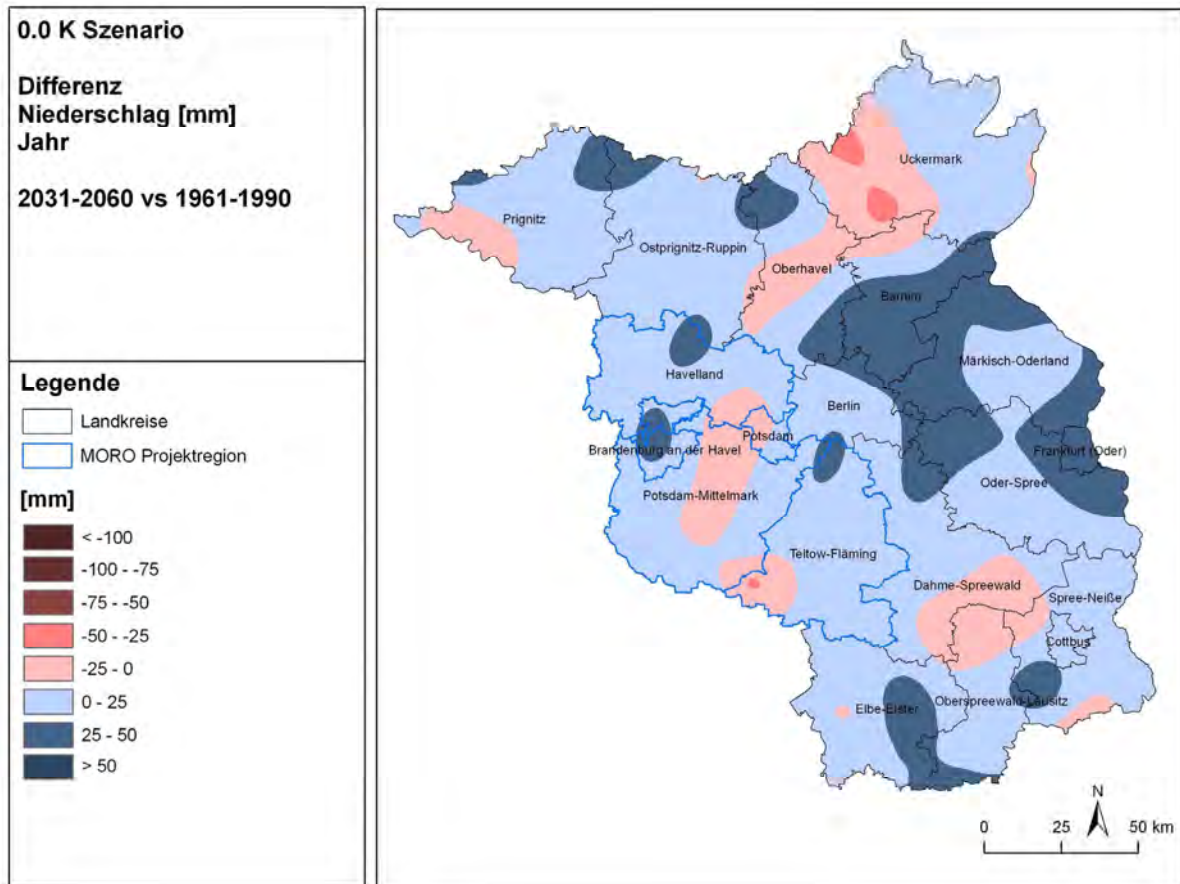


Abb. 1.39: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario

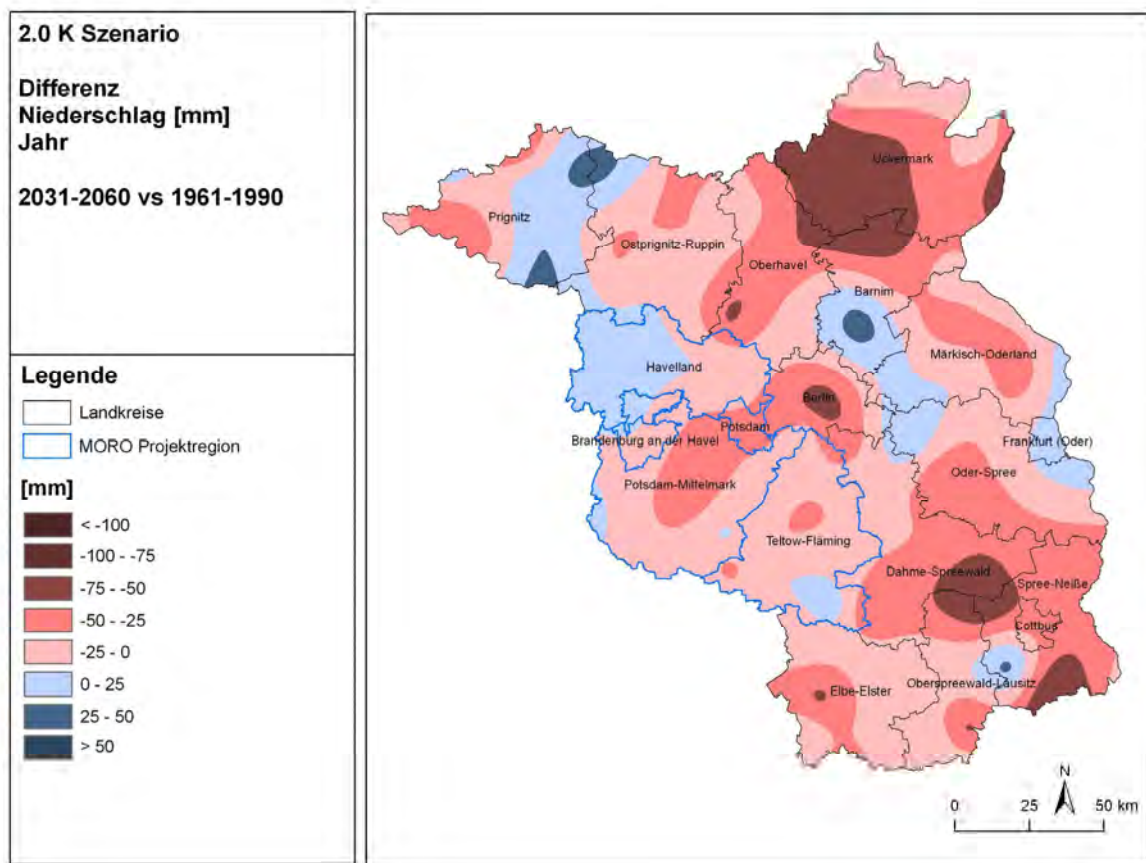


Abb. 1.40: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario

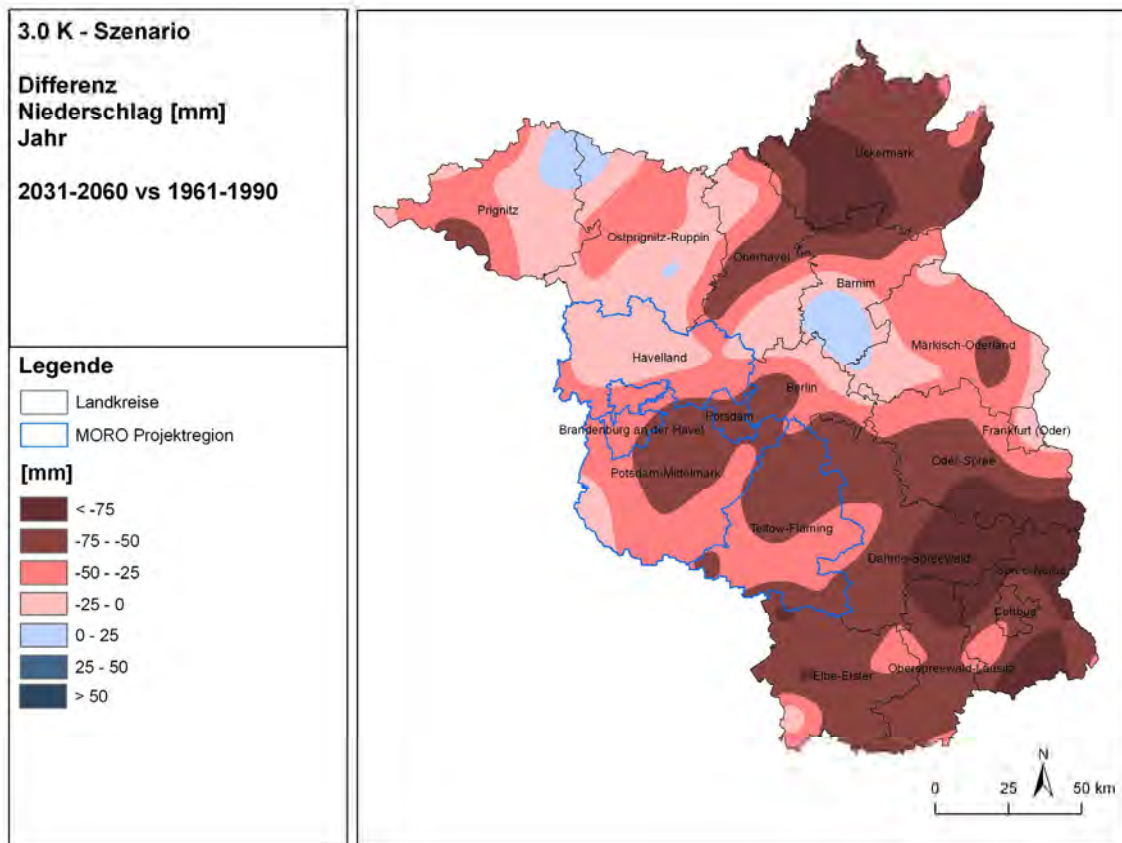


Abb. 1.41: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario

## 1.5.2.1.3. Klimatische Wasserbilanz

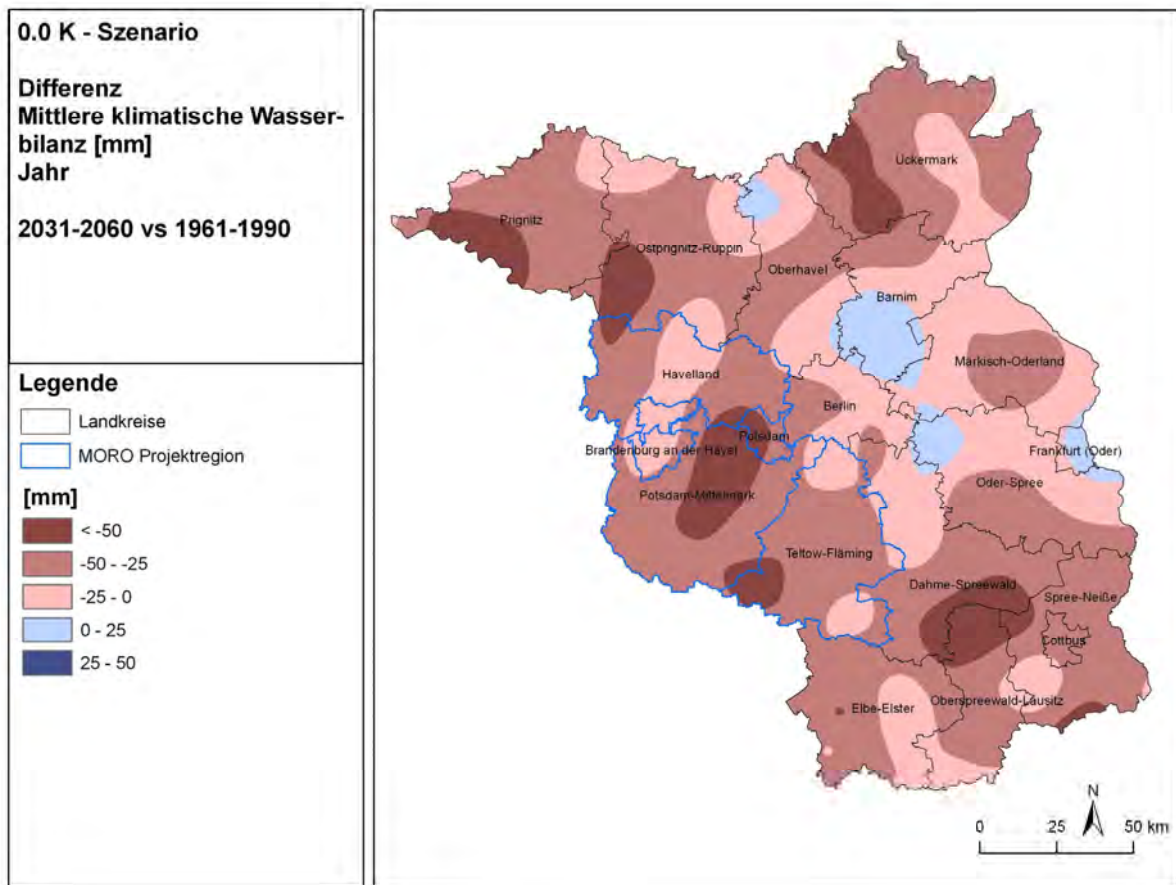


Abb. 1.42: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im OK-Szenario

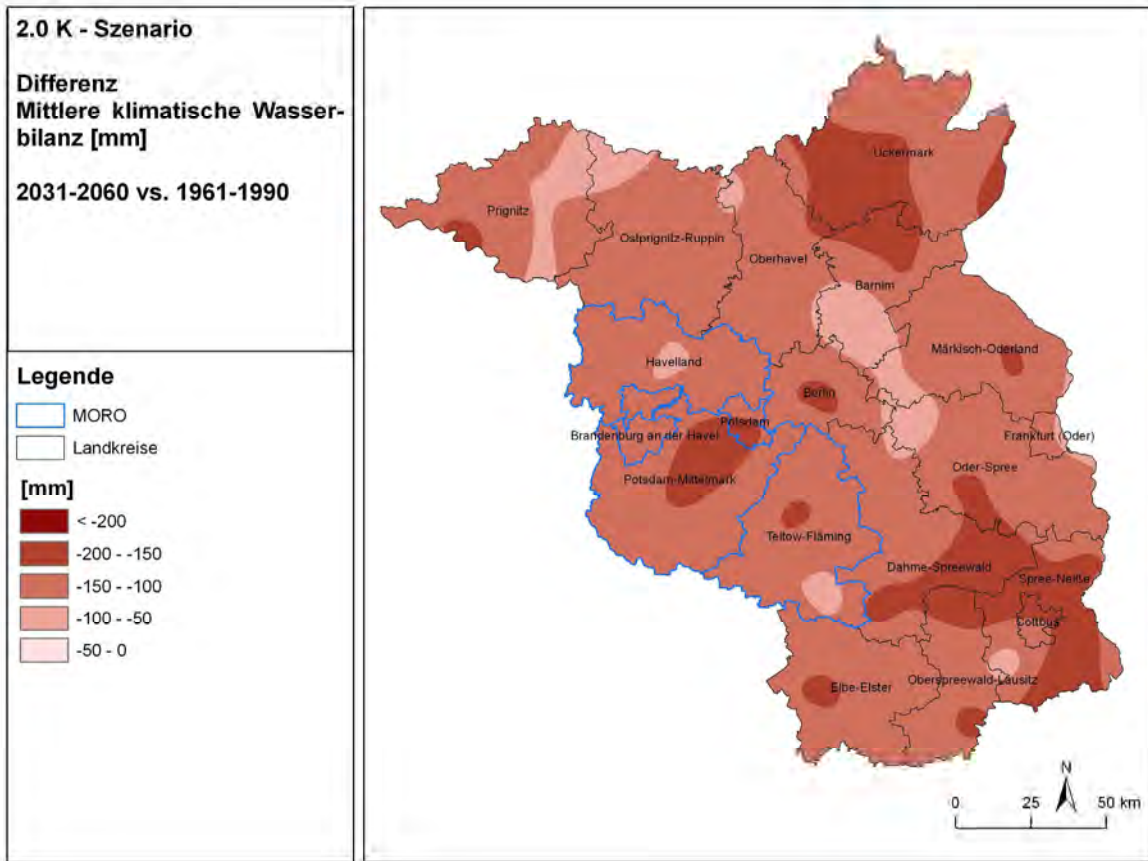


Abb. 1.43: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 2K-Szenario

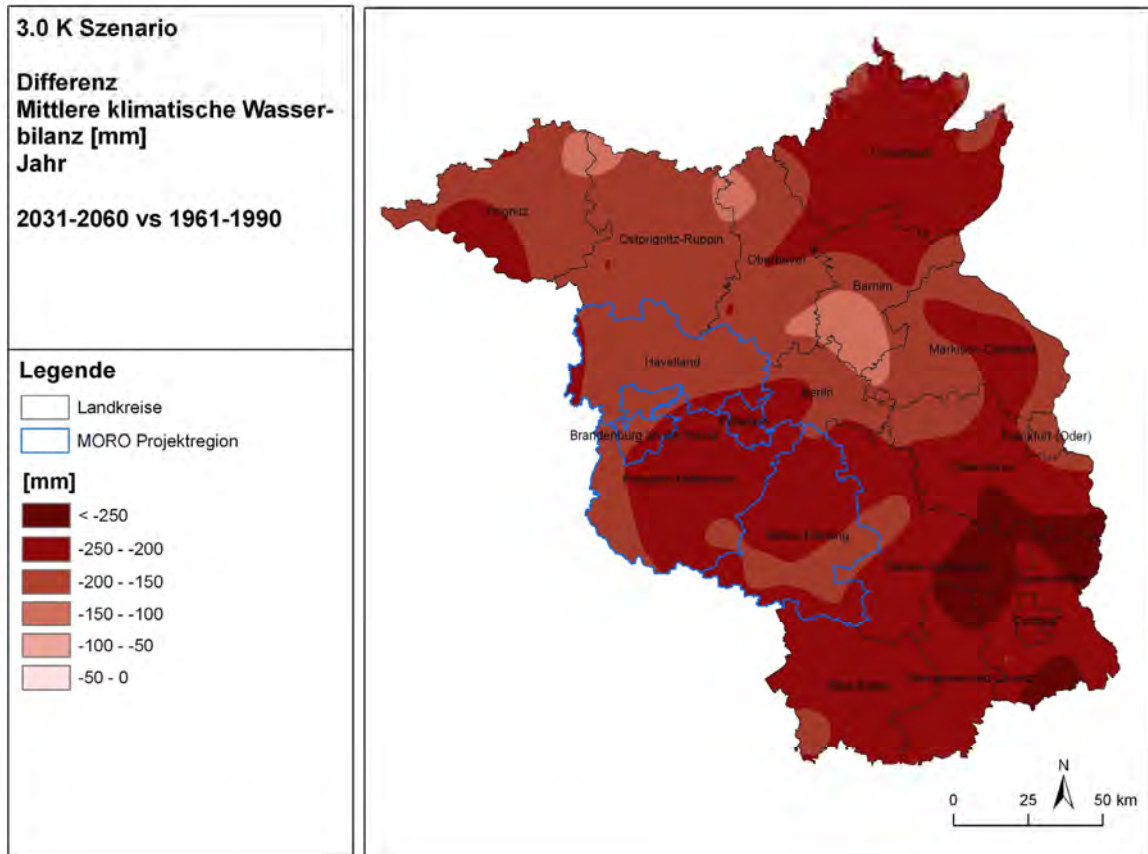
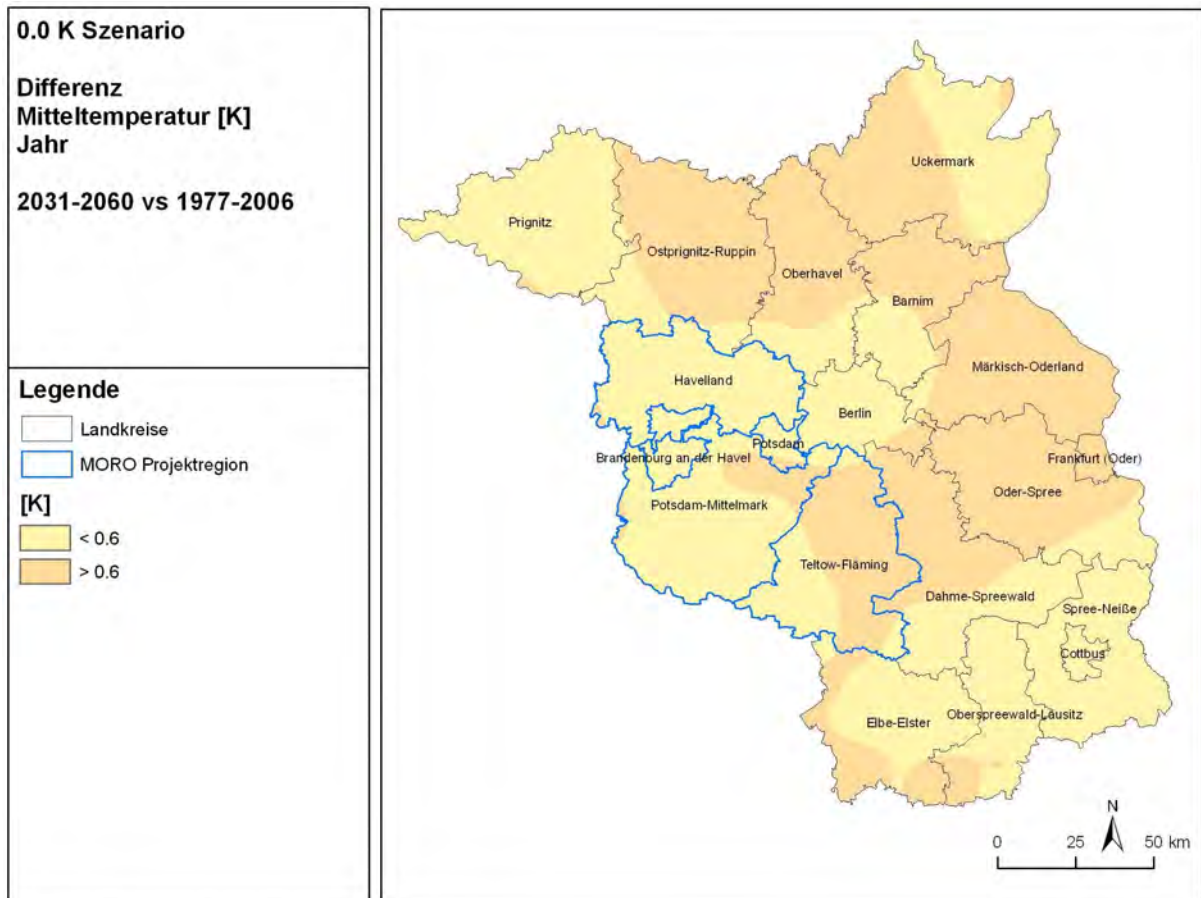


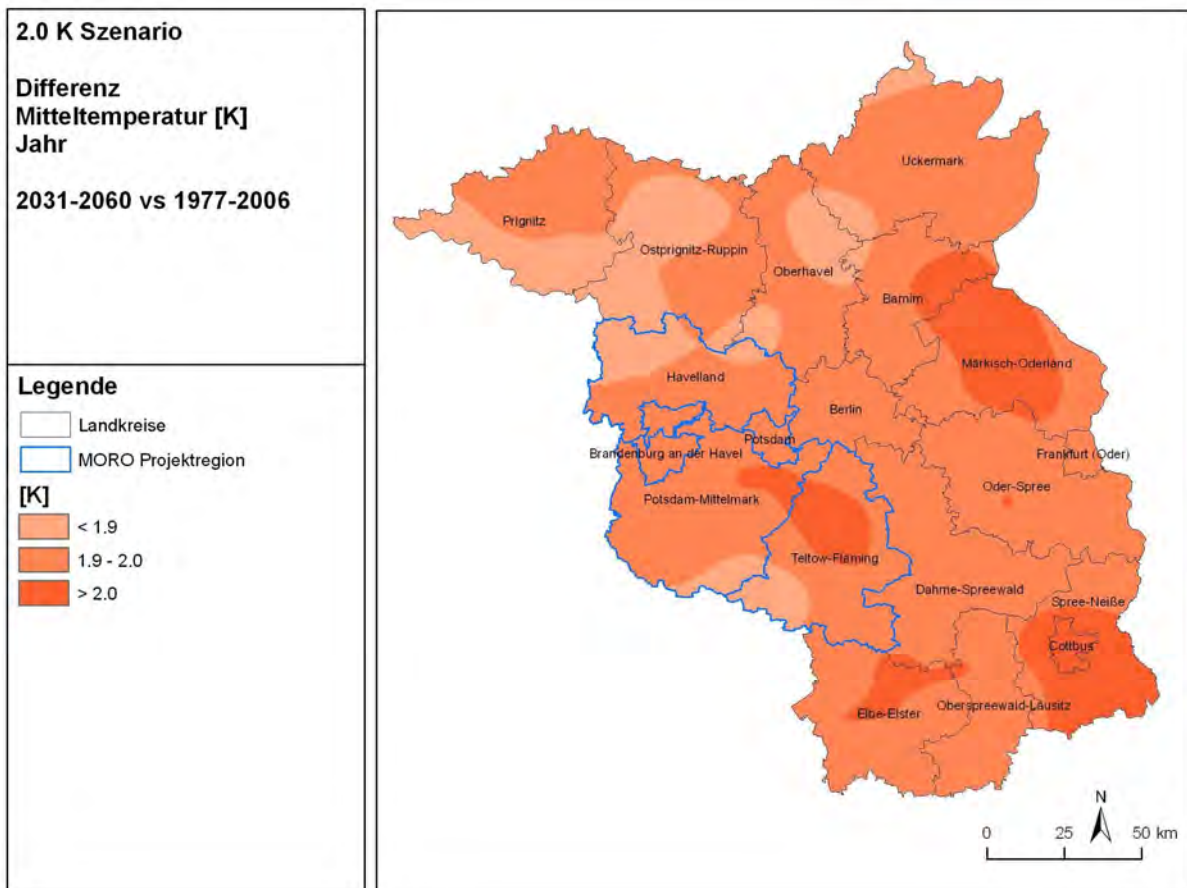
Abb. 1.44: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1961-90 im 3K-Szenario

## 1.5.2.2. Vergleich mit dem Basiszeitraum 1977-2006

## 1.5.2.2.1. Temperatur



**Abb. 1.45: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 0K-Szenario**



**Abb. 1.46: Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario**

Veränderung der Mitteltemperatur (K), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario (siehe Abb. 1.11).

1.5.2.2.2. Niederschlag

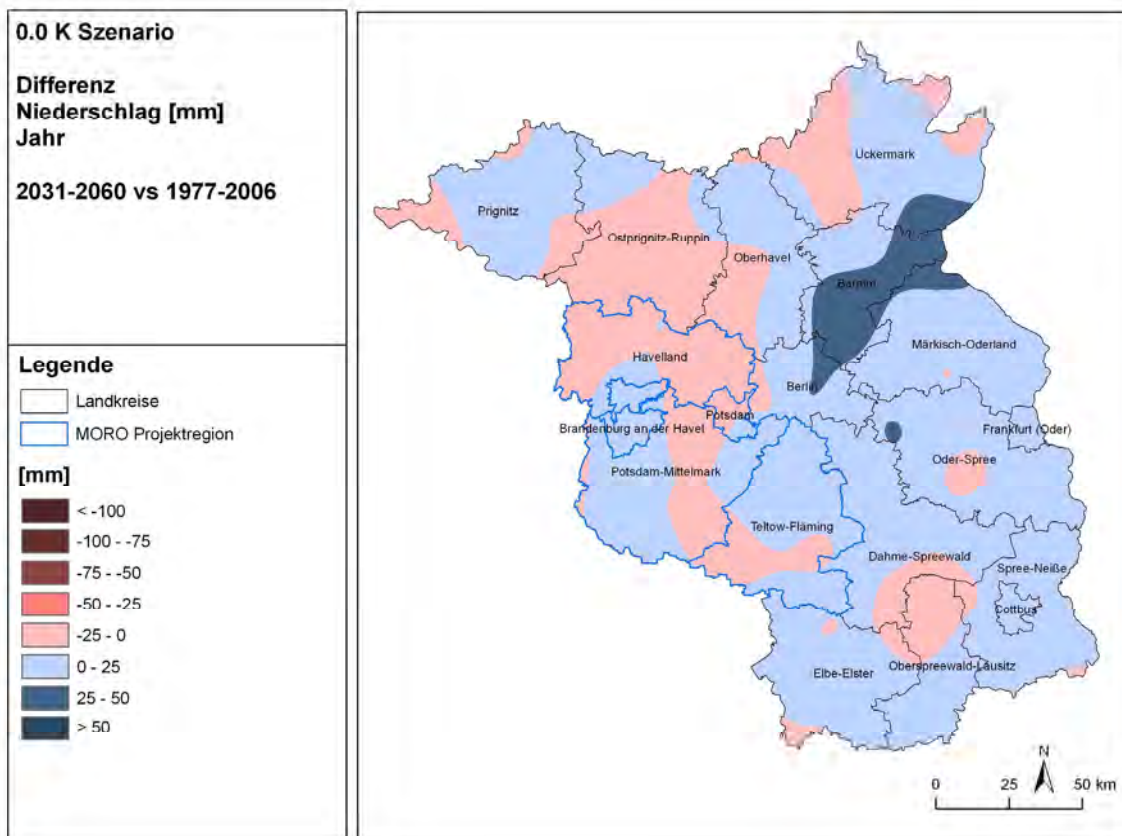


Abb. 1.47: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im OK-Szenario

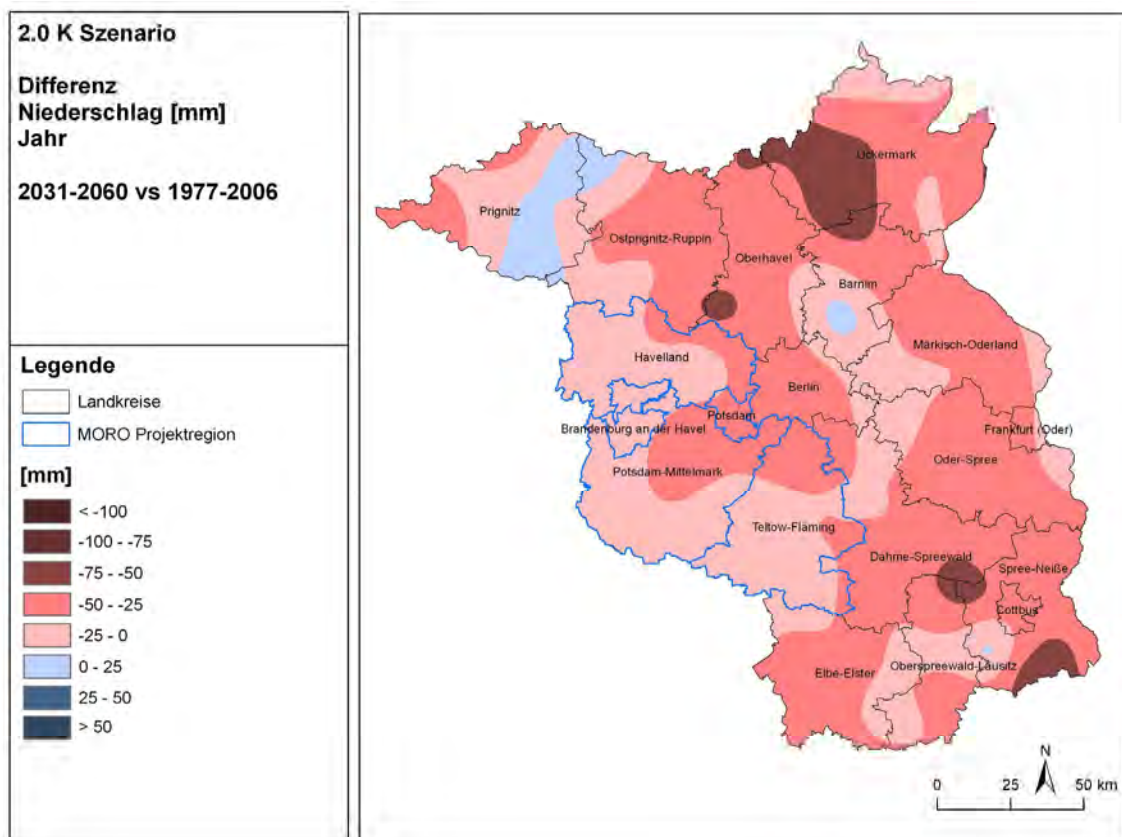


Abb. 1.48: Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario

Veränderung des mittleren Jahresniederschlages (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario (siehe Abb. 1.14).

### 1.5.2.2.3. Klimatische Wasserbilanz

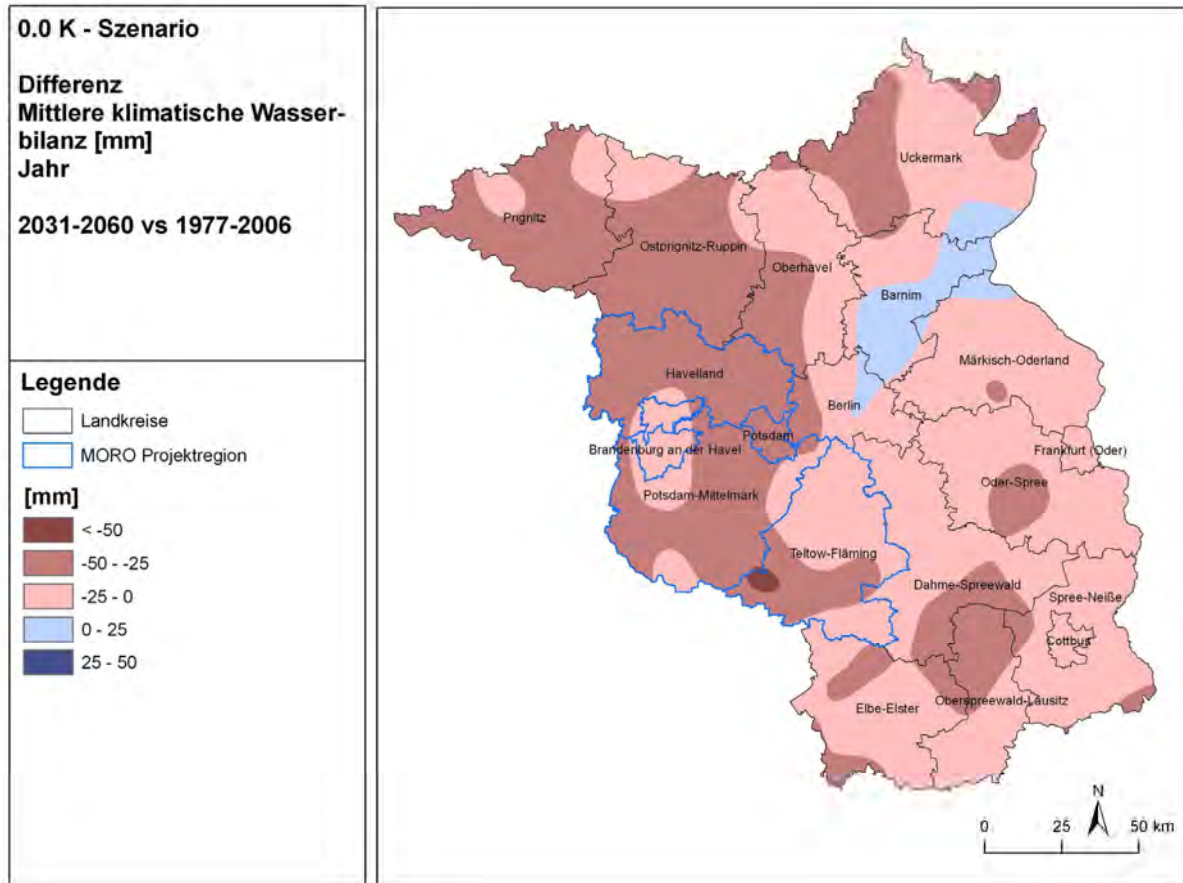
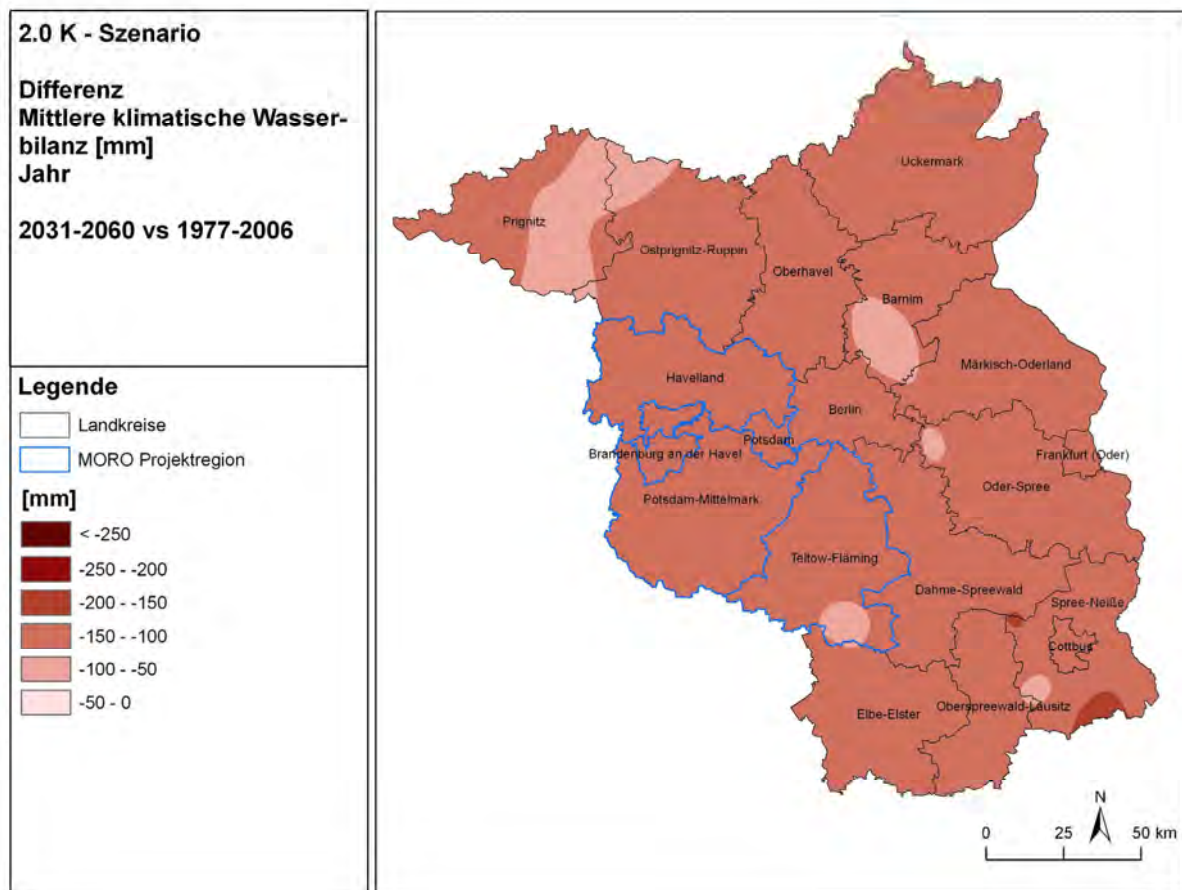


Abb. 1.49: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im OK-Szenario



**Abb. 1.50: Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 2K-Szenario**

Veränderung der mittleren klimatischen Wasserbilanz (mm), Vergleich des Zeitraums 2031-2060 mit den Jahren 1977-2006 im 3K-Szenario (Abb. 1.16).

## 1.6. Literatur

- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theor. Appl. Climatol.* 92, No. 3–4, 209–223
- Werner, P. C., Gerstengarbe, F.-W. (1997): Proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research*, 8, 3, 171–182



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**

<b>2. Hydrologie .....</b>	<b>58</b>
<b>2.1. Aufgabenstellung .....</b>	<b>58</b>
<b>2.2. Einleitung.....</b>	<b>58</b>
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
<b>2.3. Ergebnisse .....</b>	<b>72</b>
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
<b>2.4. Literatur.....</b>	<b>86</b>

**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 m<sup>3</sup> pro Kopf das zweitniedrigste Wasserdargebot. Zum Vergleich: Im Einzugsgebiet der deutschen Donau stehen pro Kopf und Jahr ca. 4000 m<sup>3</sup> 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.

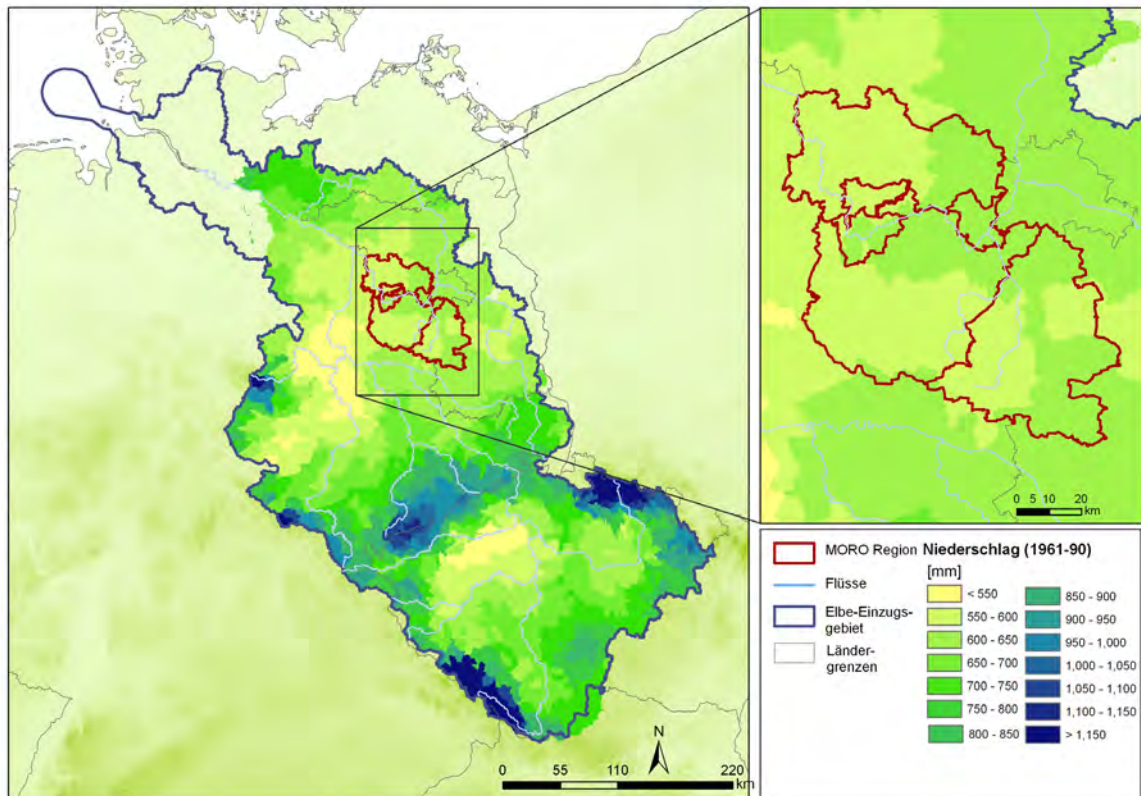


Abb. 2.1: Mittlere jährliche Niederschläge 1961-1990

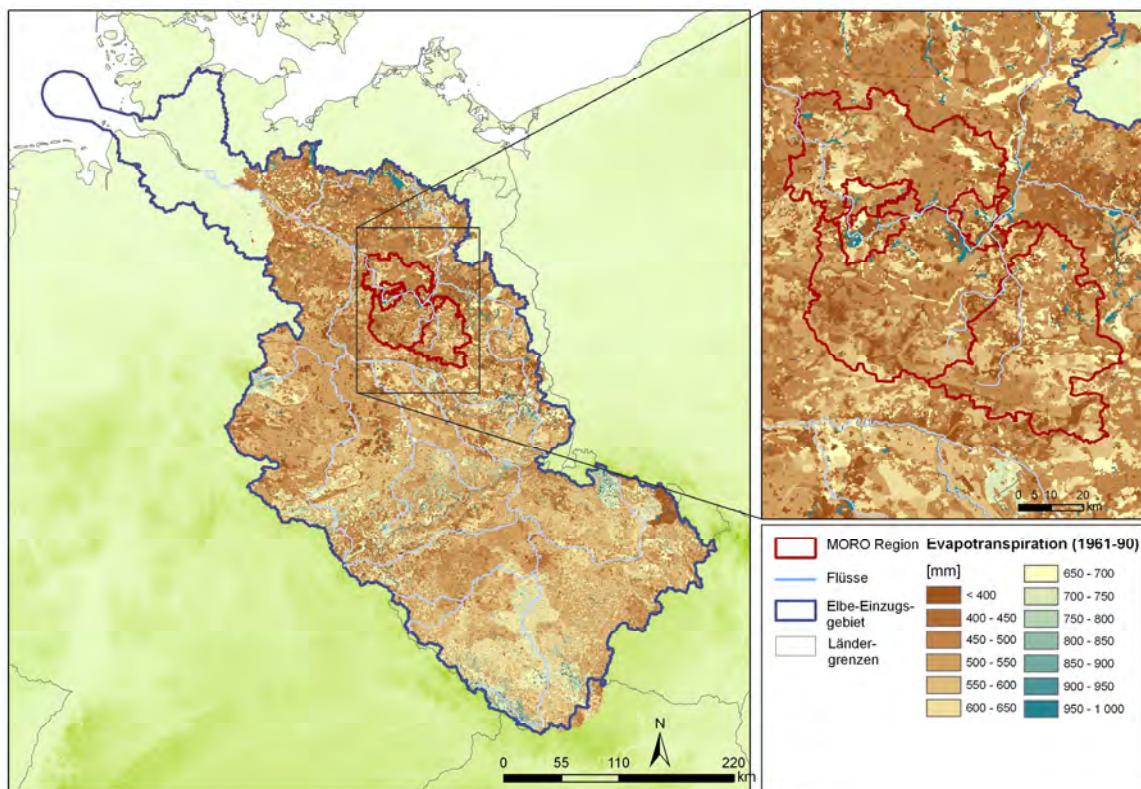
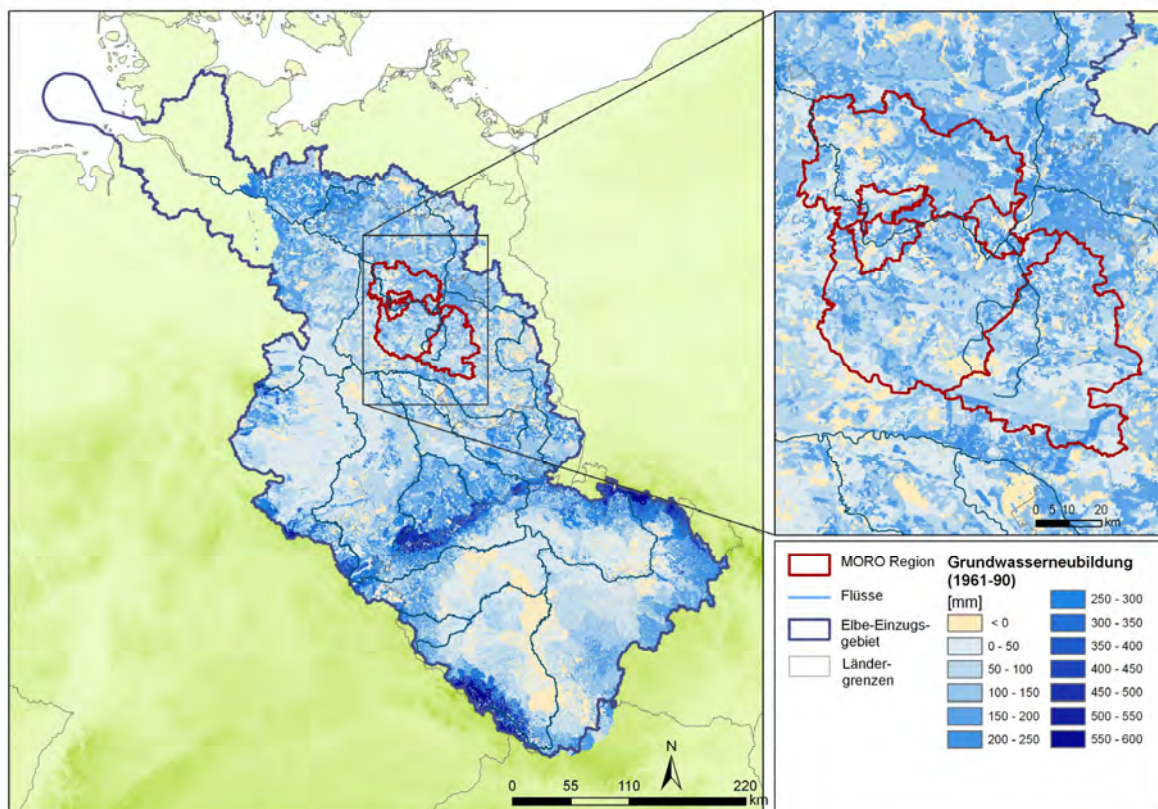


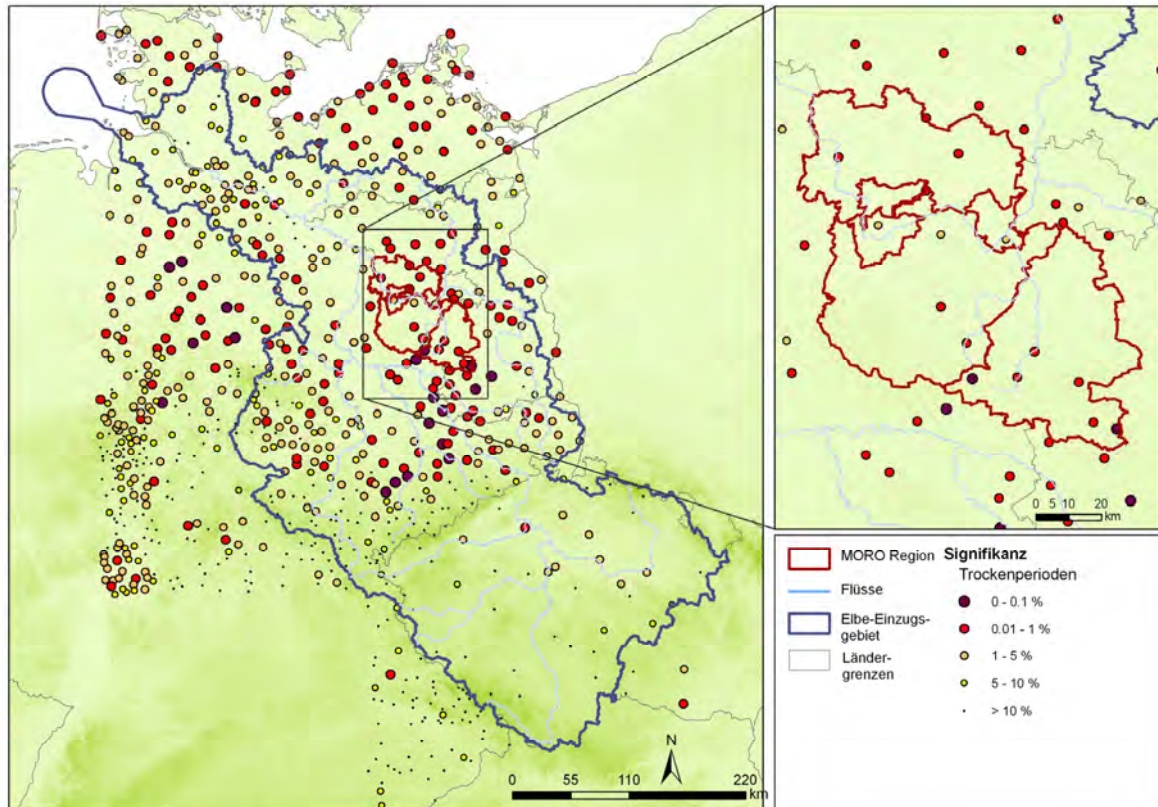
Abb. 2.2: Simulierte mittlere jährliche aktuelle Verdunstung 1961-1990

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.



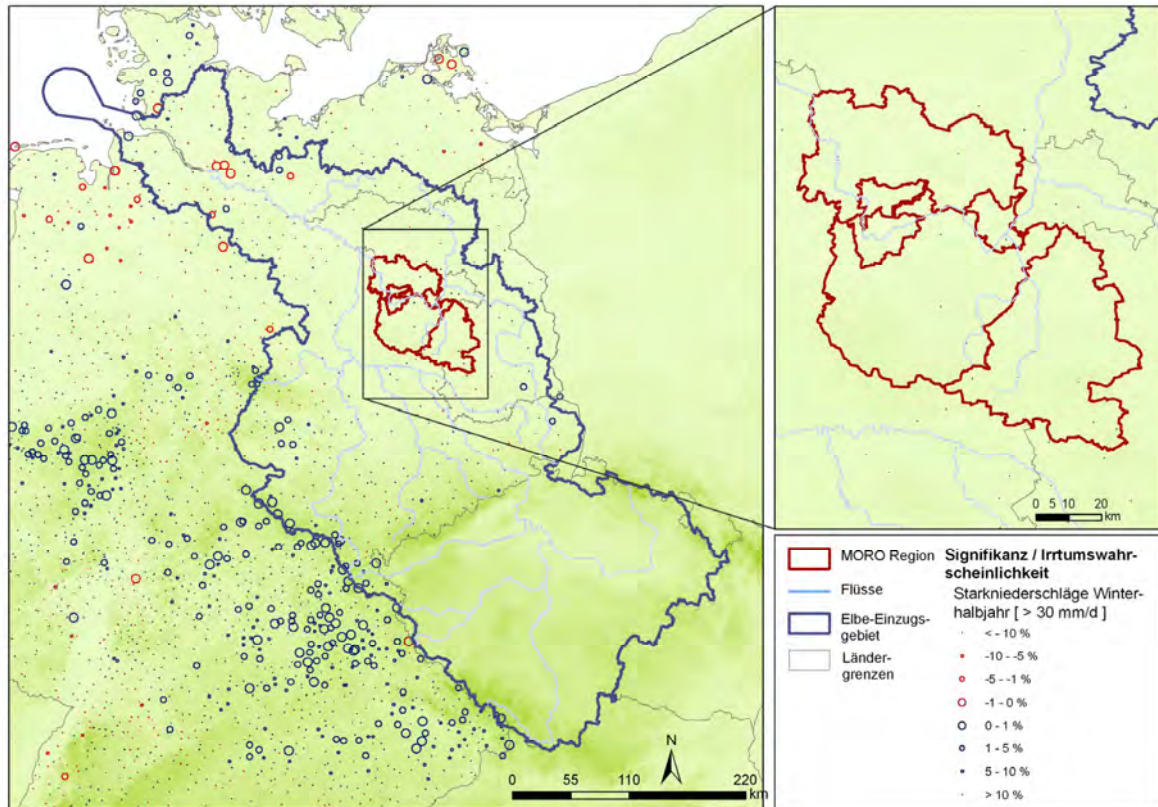
**Abb. 2.3: Simulierte mittlere jährliche Grundwasserneubildung 1961-1990**

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

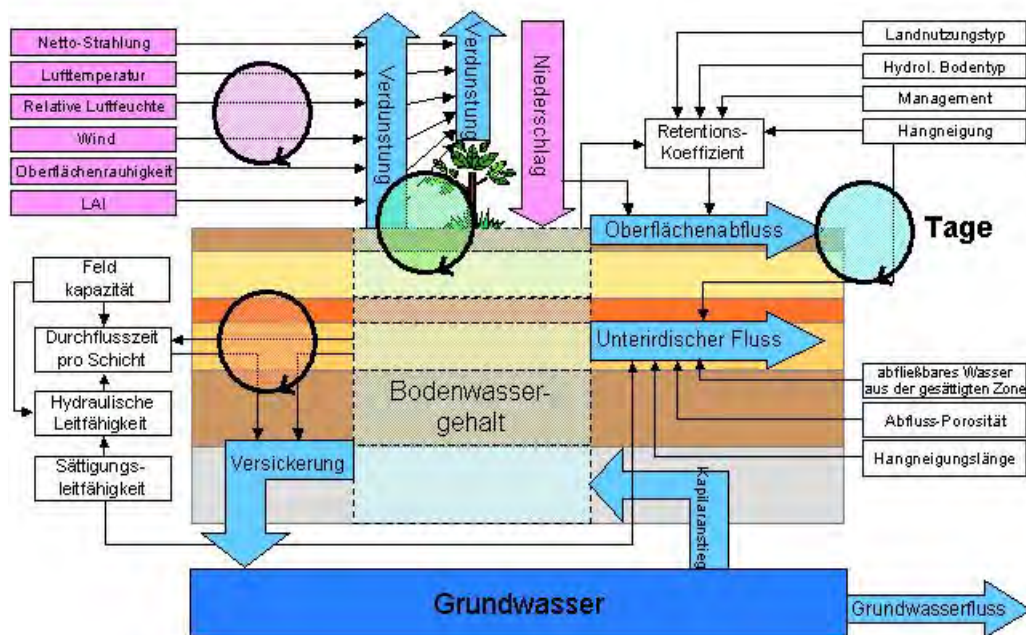
### 2.2.2.1. Das ökohydrologische Modell SWIM

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  $E_p$  [ $\text{mm d}^{-1}$ ] mithilfe der Strahlung  $R_a$  [ $\text{MJ m}^{-2}$ ] und der Temperatur durch folgende Formel berechnet:

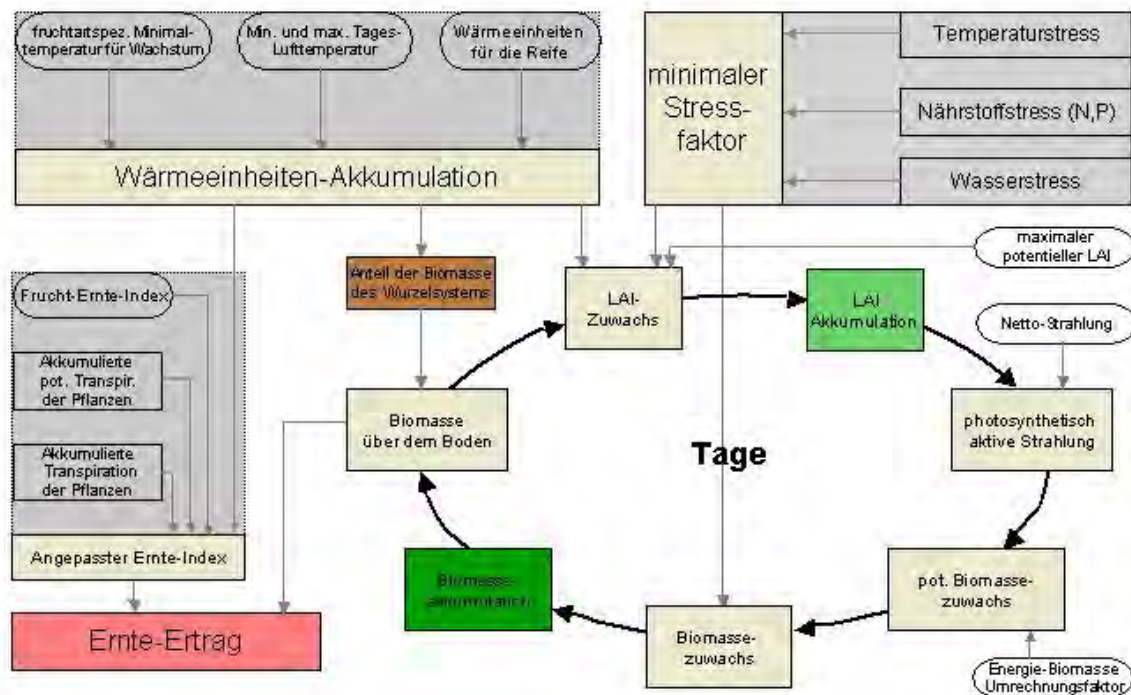
$$E_{P_t} = 1.28 * \left( \frac{R_{a_t}}{H_t} \right) * \left( \frac{\delta}{\delta - \gamma} \right). \quad (1)$$

Dabei ist die latente Wärme  $H$  [ $\text{MJ kg}^{-1}$ ] eine Funktion der mittleren täglichen Temperatur  $T$  [K],  $\delta$  ist die Steigung der gesättigten Dampfdruckkurve [ $\text{kPa C}^{-1}$ ] und  $\gamma$  die Psychrometerkonstante [ $\text{kPa C}^{-1}$ ].

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).

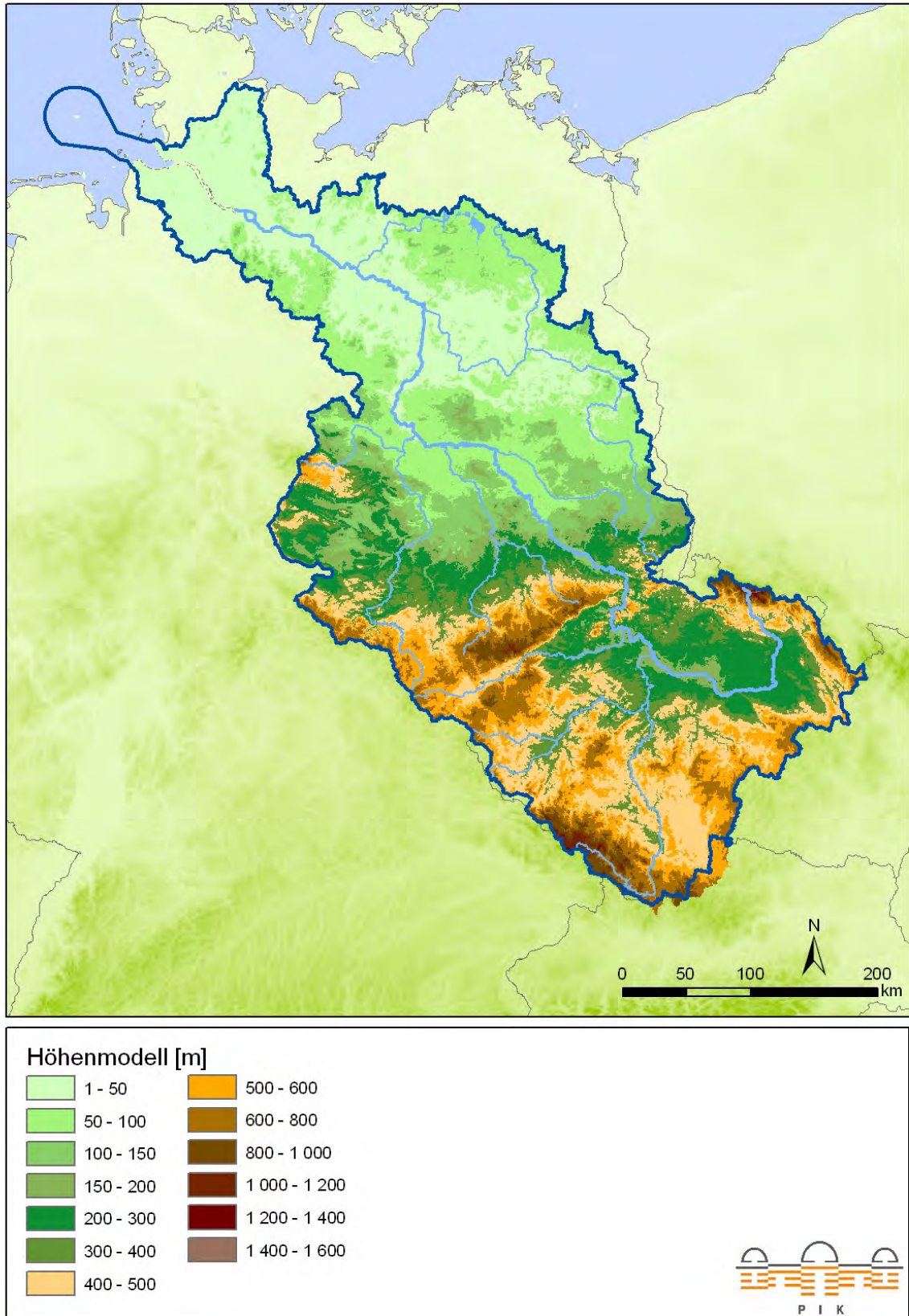
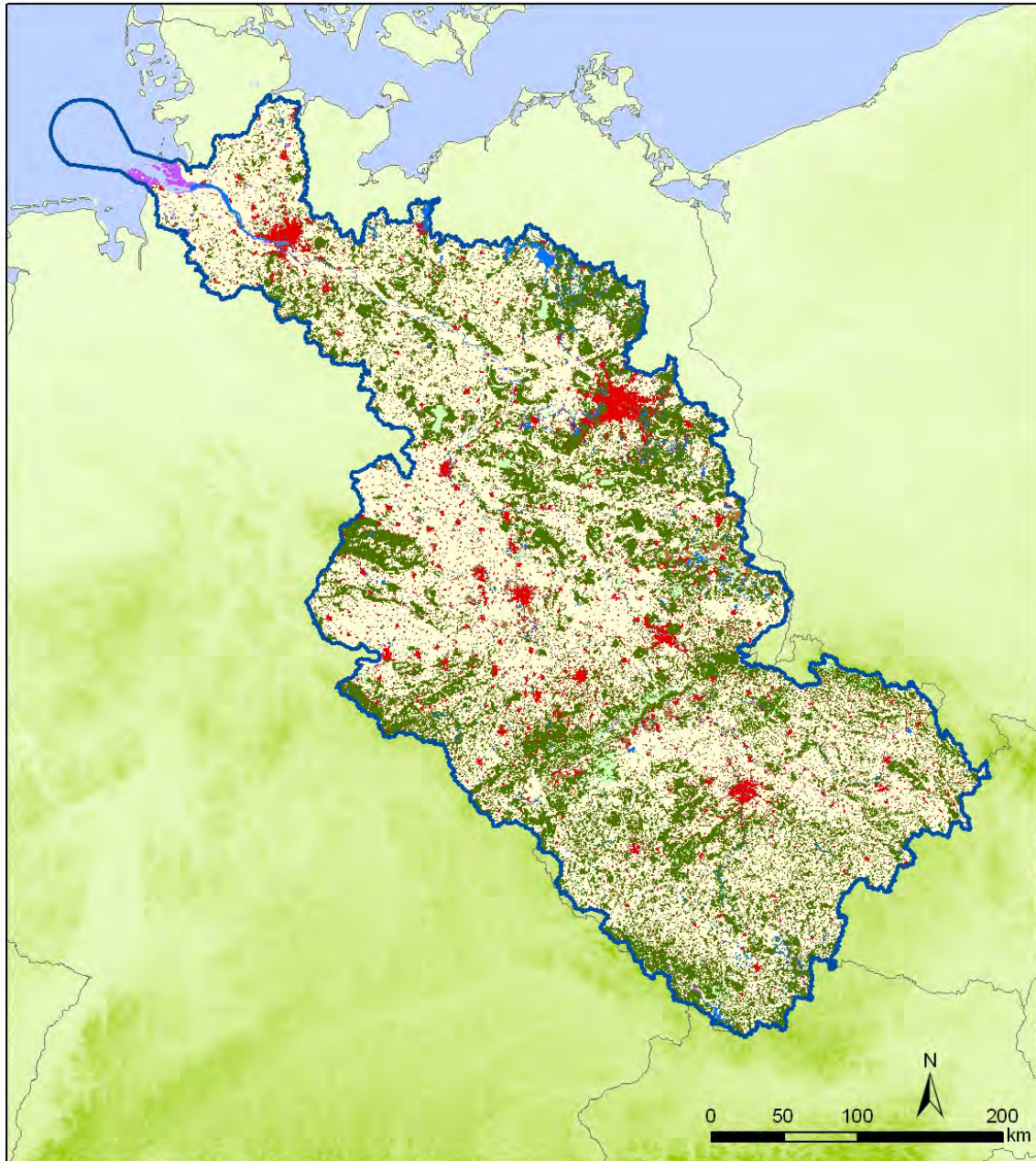


Abb. 2.6: Verwendetes Höhenmodell für die hydrologischen Simulationen



### Corine land cover 2000

- Durchgängig städtische Prägung; Nicht durchgängig städtische Prägung; Industrie- und Gewerbeflächen; Baustellen; Städtische Grünflächen; Sport- und Freizeitanlagen
- Straßen, Eisenbahn; Hafengebiete; Flughäfen
- Abbauflächen
- Deponien und Abraumhalden
- Nicht bewässertes Ackerland; Weinbauflächen; Obst- und Beerenobstbestände; Wiesen und Weiden;
- Komplexe Parzellenstrukturen; Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung
- Laubwälder; Nadelwälder; Mischwälder
- Natürliches Grünland; Heiden und Moorheiden; Wald- Strauch- Übergangsstadien
- Strände, Dünen und Sandflächen; Felsflächen ohne Vegetation;
- Flächen mit spärlicher Vegetation; Brandflächen
- Sümpfe; Torfmoore; Salzwiesen; In der Gezeitenzone liegende Flächen
- Gewässerläufe; Wasserflächen; Lagunen; Mündungsgebiete



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

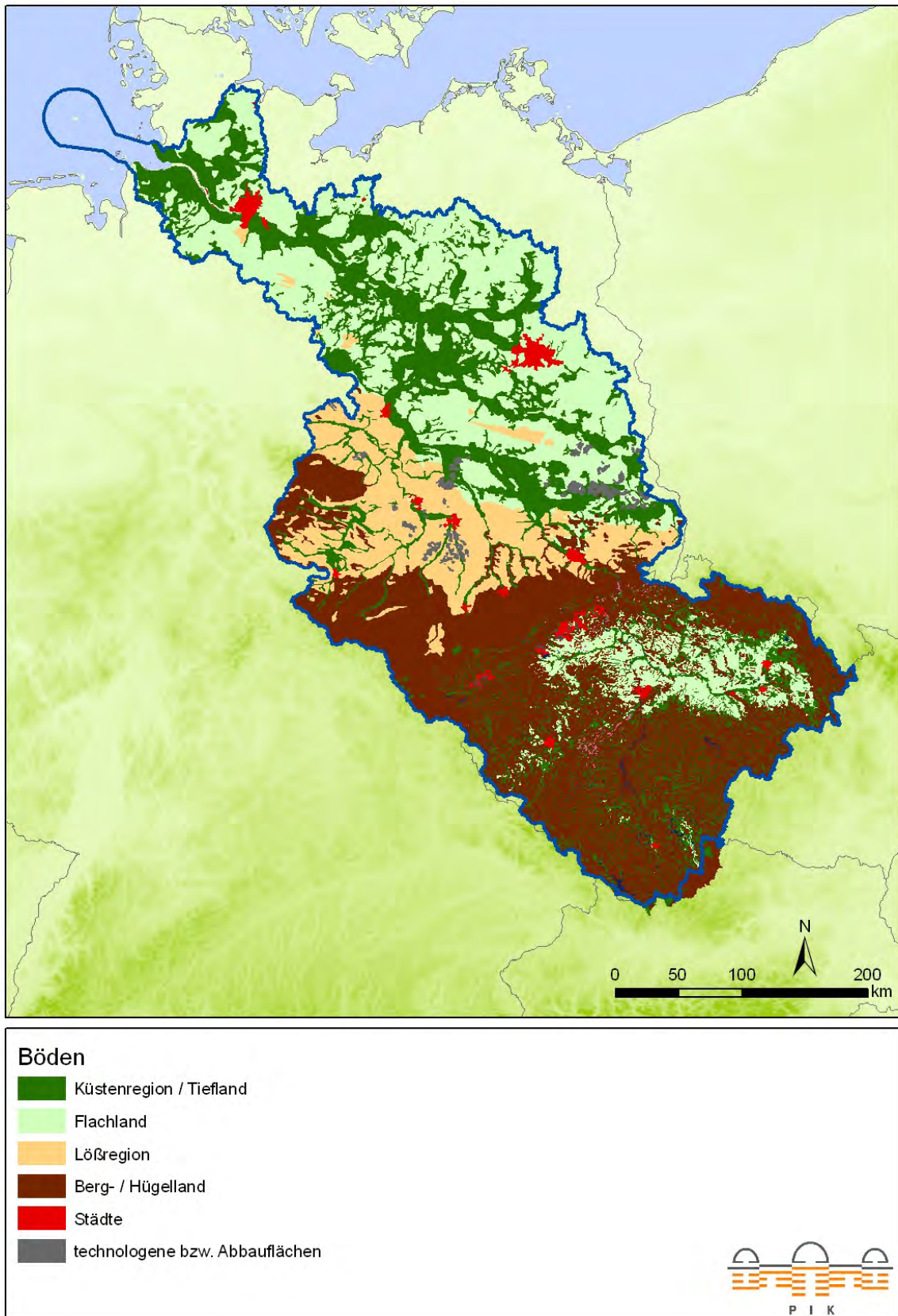


Abb. 2.8: Verwendetes Bodenmodell für die hydrologischen Simulationen

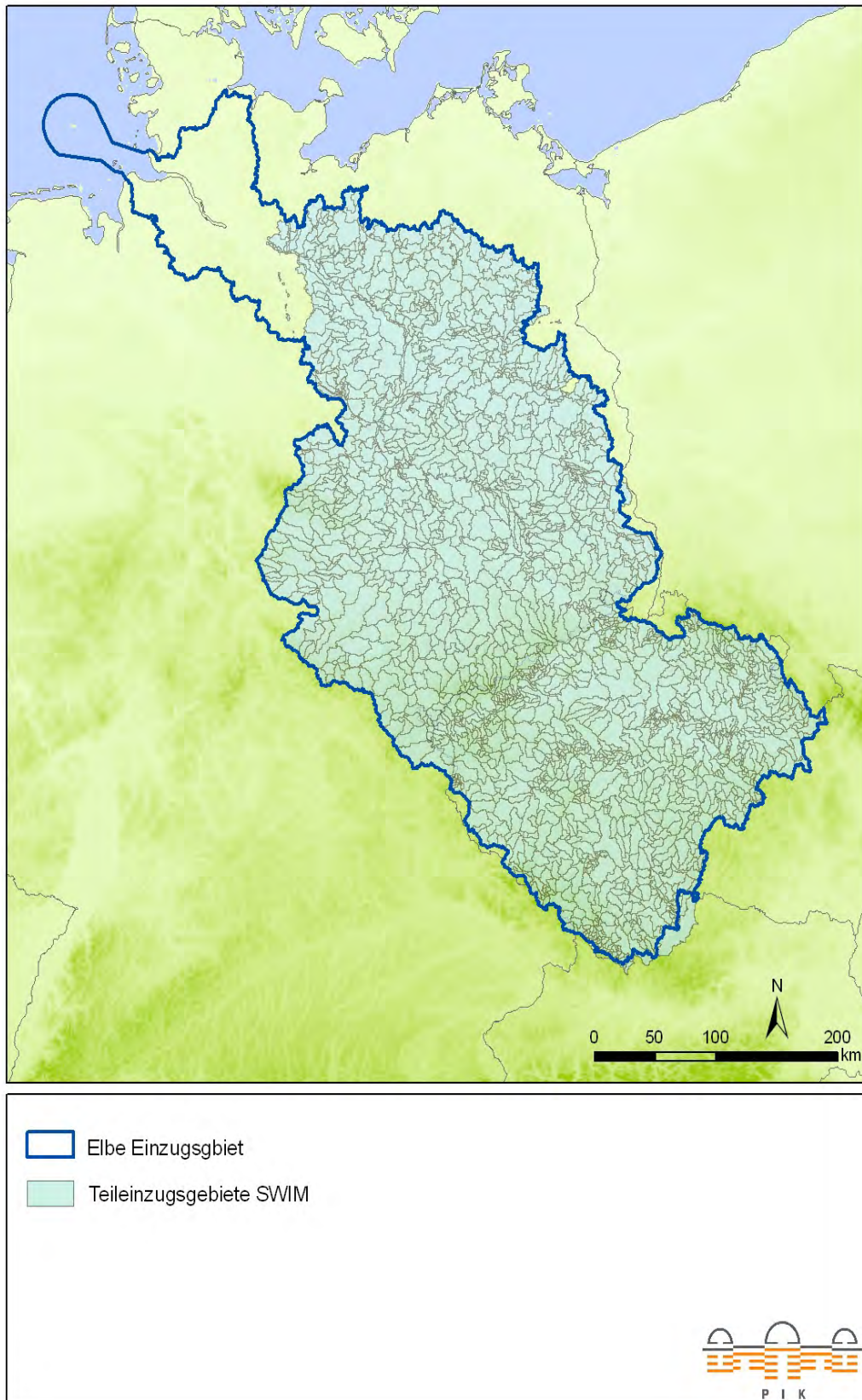


Abb. 2.9: Verwendete räumliche Informationen der SWIM-Teileinzugsgebiete für die hydrologischen Simulationen

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 1000<sup>1</sup>), Grundlage der Landnutzungsdaten die CORINE 2000-Klassifikation<sup>2</sup>. Insgesamt werden 109 unterschiedliche Leitbodentypen und 15 Landnutzungstypen unterschieden. Die Teileinzugsgebietsgrenzen stammen vom Umweltbundesamt in Berlin<sup>3</sup> (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.

---

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

<sup>2</sup> CORINE Land Cover 2000, Umweltbundesamt, DLR-DFD 2004

<sup>3</sup> 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.

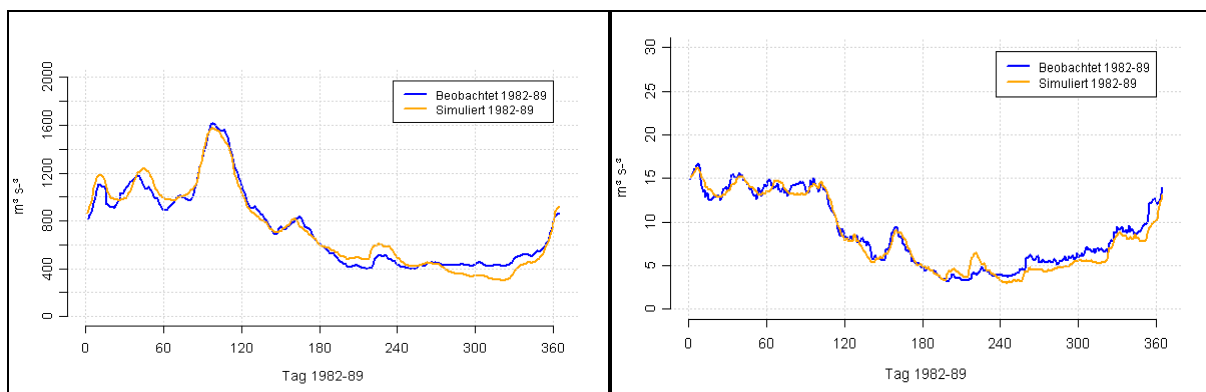
## 2.3. Ergebnisse

### 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

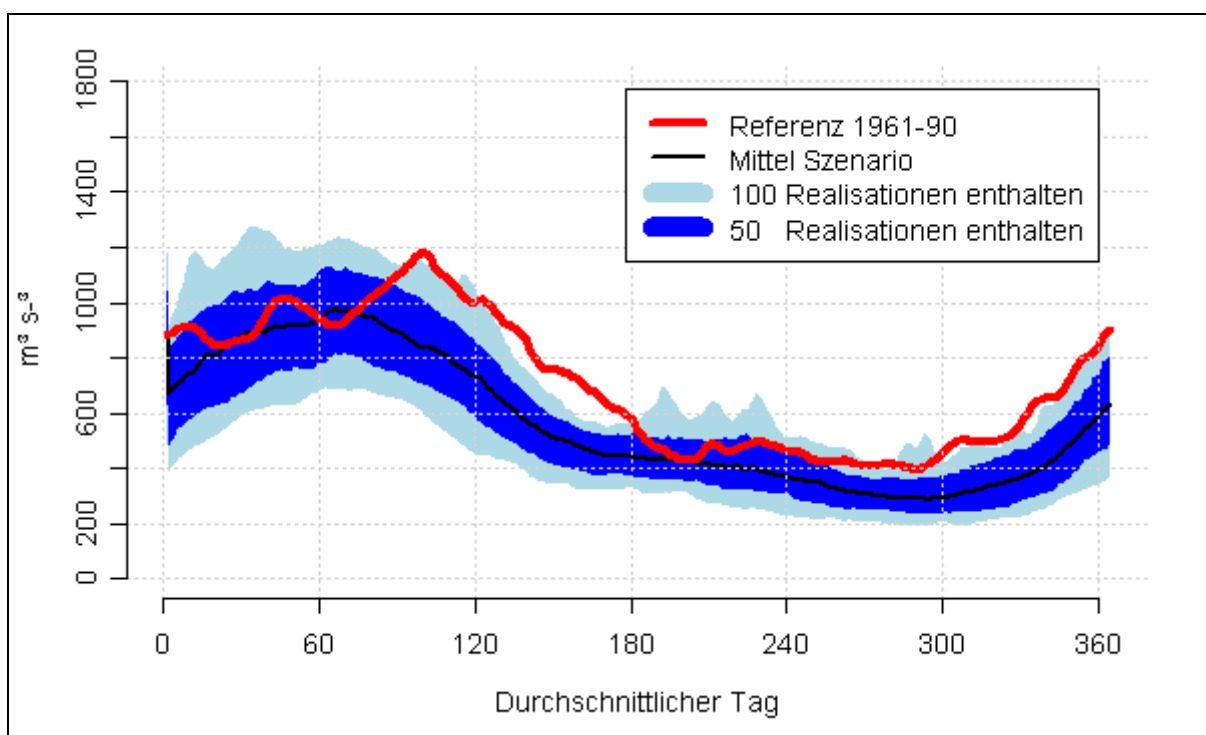
Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Klimafolgen für die Elbe und die Nuthe, berechnet durch das Modell SWIM unter STAR-Szenarienbedingungen, jeweils als Unterschied der mittleren täglichen Abflüsse der Jahre 1961-1990 und 2011-2040 und 2031-60.

#### 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 Klimarealisierungen 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

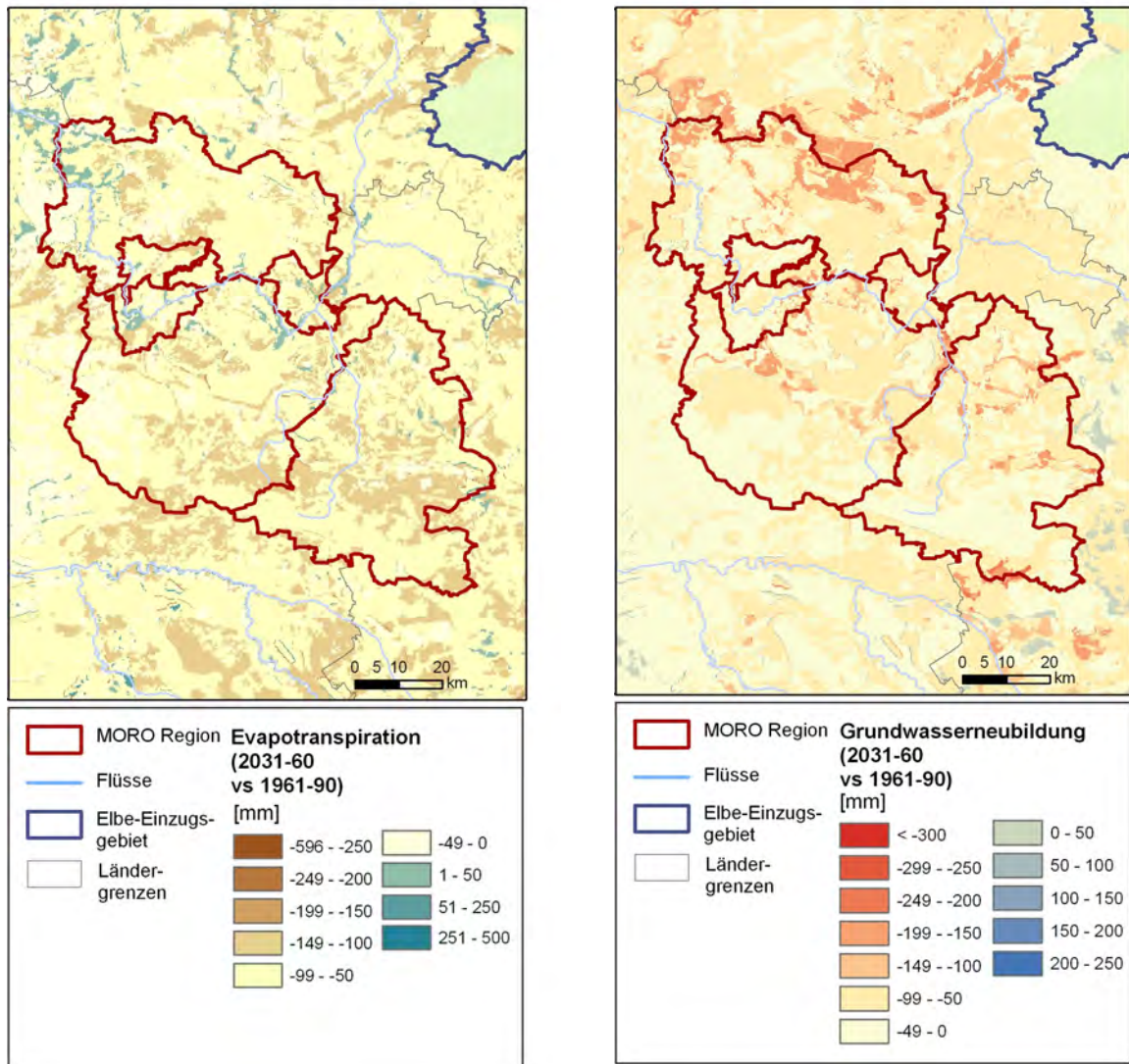
zeitigen Frühjahr, da durch die höheren Temperaturen sich auch die Pflanzen früher entwickeln und eine insgesamt ausgeprägtere und länger andauernde Trockenphase im Sommer. Im Frühjahr und Herbst liegen alle 100 mittleren täglichen Abflüsse für die Periode 2031-60 unter denen der Referenzperiode 1961-90.

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.

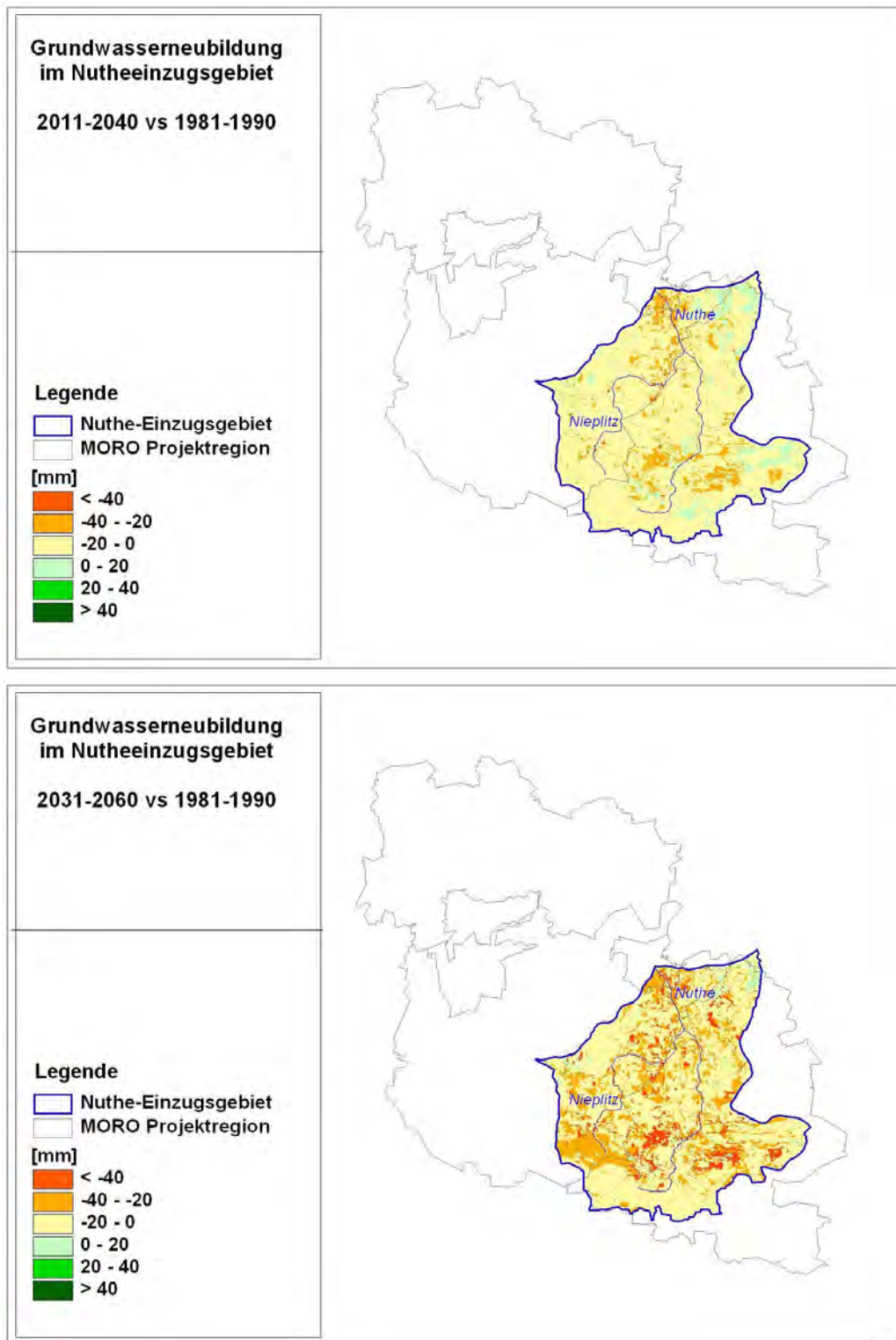
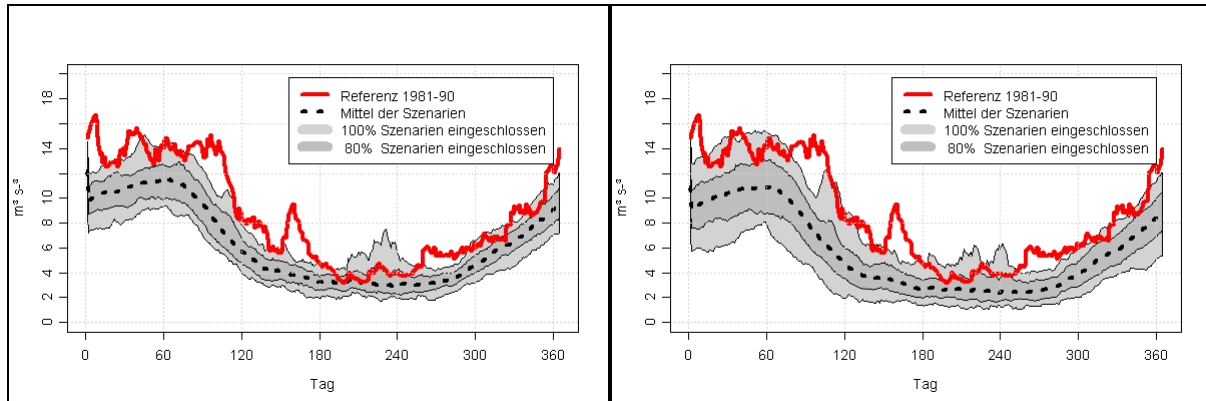
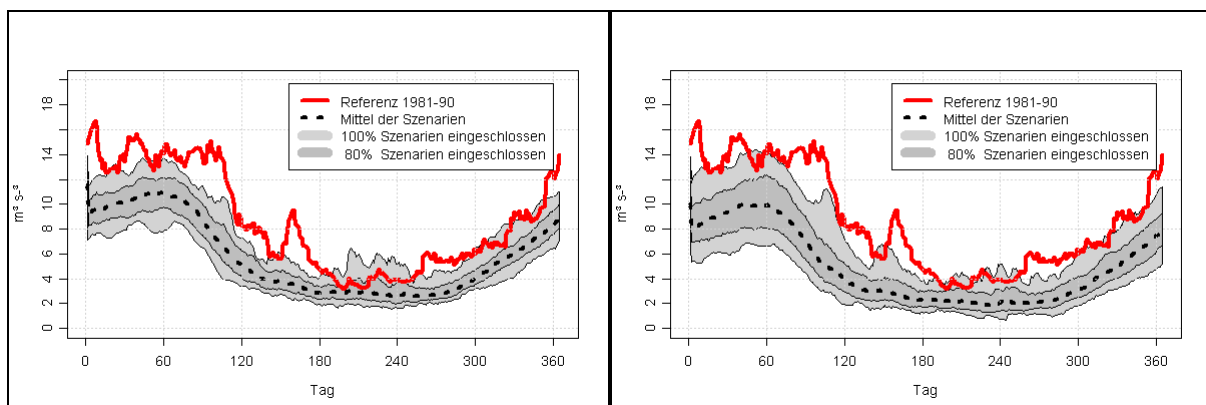


Abb. 2.13: Entwicklung der Grundwasserneubildung in der Nuthe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 2K (STAR, Mittel aus 100 Realisationen) als Vergleich der mittleren simulierten Werte 1981-1990 und der Szenarienperiode 2011-2040 links und 2031-2060 rechts (Mittel aus jeweils 100 Realisationen).

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.



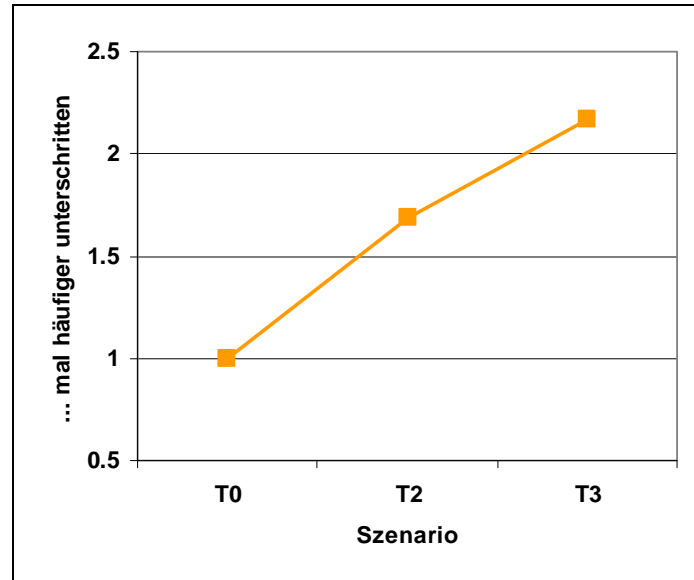
**Abb. 2.14:** Abflussentwicklung in der Nuthe bei einem Temperaturanstieg bis 2060 um 2K (STAR, 100 Realisationen), Änderungen der durch SWIM simulierte, mittleren täglichen Abflüsse der Nuthe im Jahresverlauf am Pegel Babelsberg unter Szenarienbedingungen, links als Vergleich der mittleren simulierten 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 Szenariensperioden 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.

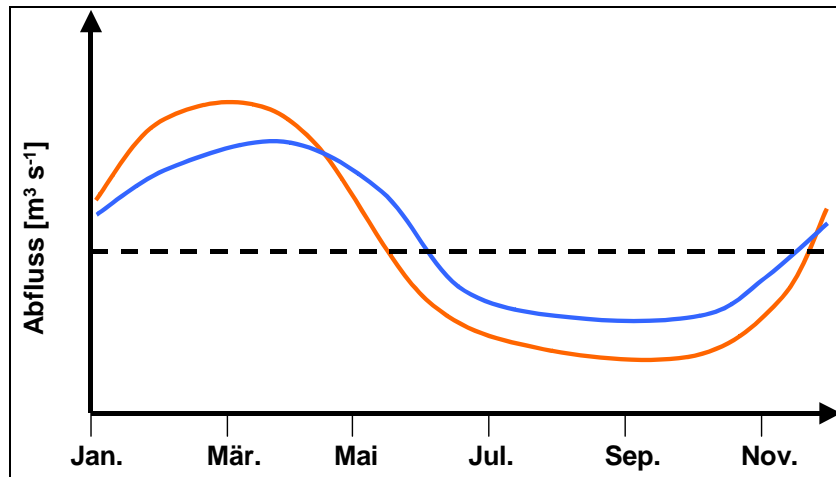
Auch in Gebieten, in denen insgesamt der Niederschlag nicht abnimmt oder sogar leicht zunimmt, kann dadurch trotzdem das Wasserdargebot sinken.

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 sensiblen 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](http://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](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](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](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.



POTSDAM-INSTITUT FÜR  
KLIMAFOLGENFORSCHUNG

## **Expertise 3 "Klimawandel und Landwirtschaft 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: Andrea Lüttger

Forschungsbereich „Klimawirkung und Vulnerabilität“

## Inhaltsverzeichnis

<b>3. LANDWIRTSCHAFT .....</b>	<b>94</b>
<b>3.1. Aufgabenstellung .....</b>	<b>94</b>
<b>3.2. Methodik .....</b>	<b>94</b>
3.2.1. Datengrundlage .....	94
3.2.1.1. Einteilung in Boden-Klima-Räume .....	96
3.2.1.2. Simulationsansatz - Konzeption der modellgestützten Projektion von Klimaerträgen .....	97
3.2.1.3. Interpretation der Ertragssimulation .....	101
3.2.1.4. Grenzen des gewählten Modellkonzepts .....	101
3.2.1.5. Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> -Düngungseffektes .....	101
<b>3.3. Ergebnisse .....</b>	<b>102</b>
3.3.1. Ertragsentwicklung in der Vergangenheit .....	102
3.3.2. Ertrags- und Klimavariabilität innerhalb der Boden-Klima- Räume .....	103
3.3.3. Ertragsrelevantes Klimaänderungssignal .....	106
3.3.4. Ertragsänderung in der Zukunft ohne CO <sub>2</sub> -Effekt .....	108
3.3.5. Einfluss einer erhöhten CO <sub>2</sub> -Konzentration auf den Ertrag ..	109
3.3.5.1. Klimafolgen unter Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> - Düngungseffektes .....	110
3.3.5.2. Berücksichtigung von Schaderregern und Krankheiten .....	110
3.3.6. Anpassungsoptionen .....	110
<b>3.4. Zusammenfassung .....</b>	<b>111</b>
<b>3.5. Literatur .....</b>	<b>112</b>

**Abbildungsverzeichnis**

- Abb. 3.1: Lage der Boden-Klima-Räume 102 und 104 in Ostdeutschland und der Projektregion MORO mit den einzelnen Landkreisen Havelland, Potsdam-Mittelmark, Teltow-Fläming sowie den kreisfreien Städten Potsdam und Brandenburg..... 96
- Abb. 3.2: Entwicklung des Ertrages ( $y$ ) und der Ertragsänderungsrate ( $y'$ ) von Winterweizen (a, b), Winterroggen (c, d) und Silomais (e, f) im Zeitraum 1952-2008 mit dem siebenjährigen gleitenden Durchschnitt für  $y$  und  $y'$  .....103

## Tabellenübersicht

Tab. 3.1:	Übersicht über die verwendeten Klimastationen in den Landkreisen, bzw. kreisfreien Städten .....	95
Tab. 3.2:	Übersicht zur Zuordnung der Landkreise zu den Boden-Klima-Räumen 102 und 104, unterstrichen sind die Landkreise, bzw. kreisfreien Städte der Projektregion Havelland-Fläming .....	97
Tab. 3.3:	Witterungsgrößen (xi), Einheiten und Abkürzungen .....	98
Tab. 3.4:	Zeitbezüge der in der Modellbildung für die Fruchtarten Winterweizen (WW), WR (Winterroggen) und Silomais (SM) genutzten Klimavariablen....	98
Tab. 3.5:	Korrelationskoeffizienten zwischen simulierten und beobachteten Ertragsänderungsraten für die Validierungsperiode 1996-2006 nach Bundesländern und für Ostdeutschland insgesamt (Parametrisierung 1981-95) ....	99
Tab. 3.6:	Zeitabschnitte und ihre Bezeichnung .....	100
Tab. 3.7:	Modifizierende Wirkung des CO <sub>2</sub> -Düngungseffektes auf C3- und C4-Pflanzen für eine Spanne von relativen Ertragseffekten (aus: Kropp et al., 2009) .....	102
Tab. 3.8:	Mittelwerte ( $\bar{y}$ ), Variabilitätskoeffizienten (V) und mittlere Ertragsänderungsrate ( $\bar{y}'$ ) der Praxiserträge auf Landkreisbasis von Winterweizen, Winterroggen und Silomais in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) für den Zeitraum 1961-90 .....	104
Tab. 3.9:	Mittelwerte ( $\bar{y}$ ), Variabilitätskoeffizienten (V) und mittlere Ertragsänderungsrate ( $\bar{y}'$ ) der Praxiserträge auf Landkreisbasis von Winterweizen, Winterroggen und Silomais in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) für den Zeitraum 1977-2006.....	104
Tab. 3.10:	Werte ausgewählter Klimagrößen der Boden-Klima-Räume Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) für die Jahre 1961-1990.....	105
Tab. 3.11:	Werte ausgewählter Klimagrößen der Boden-Klima-Räume Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) für die Jahre 1977-2006.....	106
Tab. 3.12:	Jahrestemperatur (Tmit in °C), Jahresniederschlag (Nied in mm) und jährliche Verdunstung (ETP in mm) als Differenzen des Zeitraums 2011-2040 bzw. 2031-60 gegenüber 1961-90 in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) und für das Land Brandenburg bei einer Temperaturerhöhung um 0, 2 und 3K.....	107
Tab. 3.13:	Jahrestemperatur (Tmit in °C), Jahresniederschlag (Nied in mm) und jährliche Verdunstung (ETP in mm) als Differenzen des Zeitraums 2011-2040 bzw. 2031-60 gegenüber 1977-2006 in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM +	

	TF) und für das Land Brandenburg bei einer Temperaturerhöhung um 0, 2 und 3K.....	107
Tab. 3.14:	Simulierte Ertragsänderungen (%) für Winterweizen (WW); Winterroggen (WR) und Silomais (SM) in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) und im Land Brandenburg, Vergleich der Zeiträume 2011-40 und 2031-60 gegenüber 1961-90 bei einem Temperaturanstieg von 0K, 2K und 3K (ohne CO <sub>2</sub> -Düngungseffekt) .....	108
Tab. 3.15:	Simulierte Ertragsänderungen (%) für Winterweizen (WW); Winterroggen (WR) und Silomais (SM) in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) und im Land Brandenburg, Vergleich der Zeiträume 2011-40 und 2031-60 gegenüber 1977-2006 bei einem Temperaturanstieg von 0K, 2K und 3K (ohne CO <sub>2</sub> -Düngungseffekt) .....	109

**Kernaussagen:**

- Die Empfindlichkeit für Ertragsänderungen ist im Ostdeutschen Tiefland (Potsdam-Mittelmark, Teltow-Fläming) durch die im Vergleich höhere Jahresmitteltemperatur und Strahlung, sowie den geringeren Niederschlag und die Standortbedingungen größer als im Nordostdeutschen Binnentiefland (Havelland).
- Ansteigende Temperaturen führen zu Ertragssteigerungen bei Winterweizen, Roggen und Mais. Die Ertragszunahme ist bei 2K Temperaturanstieg am höchsten, ein weiterer Temperaturanstieg führt zu Ertragsrückgängen, insbesondere bei Silomais im Ostdeutschen Tiefland.
- Die ansteigende CO<sub>2</sub>-Konzentration kann zusätzlich einen deutlichen Ertragsanstieg bewirken. Allerdings werden die Ertragssteigerungen nach bisherigen Untersuchungen mit einer verminderten Proteinqualität bei Winterweizen einhergehen.

### **3. Landwirtschaft**

#### **3.1. Aufgabenstellung**

Die Region Havelland-Fläming zeichnet sich im Vergleich zu anderen landwirtschaftlich genutzten Regionen Deutschlands durch das stärker kontinental geprägte Klima mit geringen Niederschlägen, längeren trockenen und wärmeren Perioden im Frühsommer und oftmals Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität aus. Durch den Klimawandel ist die Landwirtschaft mit ihrer direkten Abhängigkeit von Witterungsverläufen besonders betroffen. Unter der Annahme eines Klimawandels, wie er im STAR-Modell mit dem Szenarien der Temperaturerhöhung um 0K, 2K und 3K möglich ist, wird in dem sich anschließenden Kapitel der Zusammenhang zwischen Klimawandel und den Auswirkungen auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen dargestellt.

#### **3.2. Methodik**

##### **3.2.1. Datengrundlage**

Für den Modellansatz des statistischen Ertragsmodells wurde der DWD/PIK-Datensatz für meteorologische Stationen Deutschlands für den Zeitraum 1951-2006 verwendet. Er basiert auf täglichen Stationsdaten des deutschen Wetterdienstes für Niederschlags- und Klimastationen. Die Stationsdaten wurden am PIK durch Interpolation zu kompletten synoptischen Klimadatensätzen für den Zeitraum 1951-2006 aufgefüllt. Insgesamt wurden 88 Stationsreihen für die Auswertung herangezogen. Die Klimadaten der Stationsreihen für die Untersuchung wurden landkreisweise, bzw. wie in Kap. 3.2.1.1 beschrieben, in Regionen mit ähnlichen Boden- und Klimaverhältnissen (Boden-Klima-Räumen) durch flächengewichtete Mittelung zusammengefasst. Da sich die Boden-Klima-Räume über die betrachtete Projektregion Havelland-Fläming hinaus erstrecken, wurden für die vollständige Beschreibung der Klimaverhältnisse auch Stationsdaten von Station anderer Landkreise von Brandenburg, aber auch von Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt herangezogen. Eine Übersicht über die verwendeten Stationen gibt Tab. 3.1. Als Szenariendaten wurden STAR Daten für den Zeitraum 2007–2060 verwendet. Detaillierte Angaben zu den verwendeten Datensätzen finden sich in der Expertise 1 (vgl. S. 9ff) zum Klima.

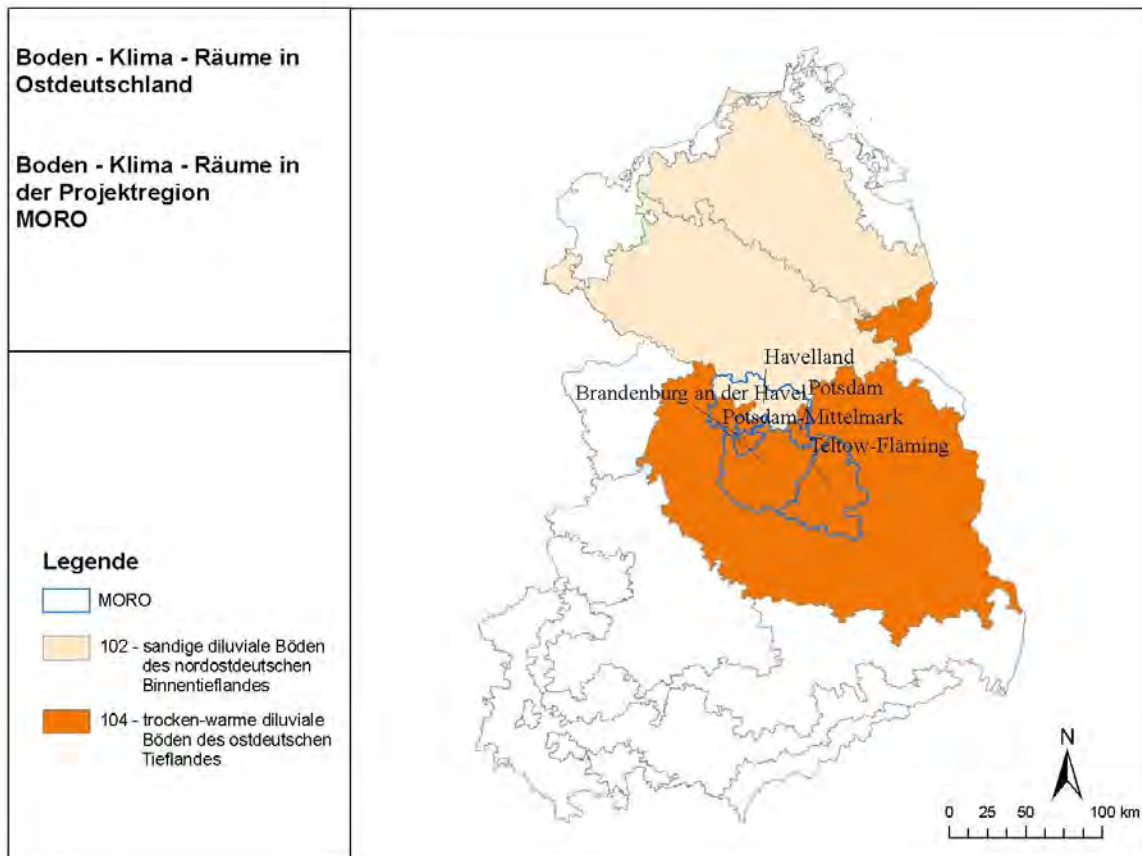
**Tab. 3.1: Übersicht über die verwendeten Klimastationen in den Landkreisen, bzw. kreisfreien Städten**

Name des Landkreises	Nummer des Landkreises	Nummer der Klimastation
Havelland	12063	17127, 17128
Oberhavel	12065	17005, 17010, 17110, 17111, 17112, 17113, 17114
Ostprignitz-Ruppin	12068	17006, 17129, 17130, 17131, 17151
Prignitz	12070	16111, 16115, 16186, 17140, 17146
Ludwigslust	13054	16001, 16121, 16146, 16149, 16150, 16153, 16154, 16199
Müritz	13056	17009, 17106, 17142, 17148
Parchim	13060	16010, 16122, 16168, 17004, 17147
Berlin	11000	17001, 17002, 17117
Brandenburg an der Havel	12051	17124
Cottbus	12052	23001
Frankfurt (Oder)	12053	18110
Potsdam	12054	17007
Dahme-Spreewald	12061	17003, 17118, 22180, 23119
Elbe-Elster	12062	22002, 22115, 22120, 22123, 22124, 22125, 22126, 22127
Oberspreewald-Lausitz	12066	22118, 22119
Oder-Spree	12067	17115, 17116, 17119, 18002, 18106, 18109
Potsdam-Mittelmark	12069	17121, 17122, 17123, 17125
Spree-Neiße	12071	23103, 23116, 23117, 23118
Teltow-Fläming	12072	17120, 22181, 22182, 22183, 22184, 22185
Hoyerswerda	14264	23108
Anhalt-Zerbst	15151	16105, 17107, 17108, 22158
Wittenberg	15171	22011, 22128, 22129, 22130, 22157
Jerichower Land	15358	17126

Die Ertragsdaten vor 1991 wurden statistischen Jahrbüchern der DDR-Bezirke entnommen und in die 2003 gültige Kreisgliederung flächengewichtet umgerechnet. Die Daten seit 1991 entstammen Veröffentlichungen der Statistischen Landesämter. Änderungen der Kreisgrenzen wurden analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise bei der Aufbereitung von DDR-Daten berücksichtigt. Bei der Berechnung der Ertragsparameter wurden die Ertragsdaten kreisfreier Städte mit ihren eher kleineren landwirtschaftlich genutzten Flächen nicht berücksichtigt.

### 3.2.1.1. Einteilung in Boden-Klima-Räume

Die Boden-Klima-Räume, klassifiziert nach Roßberg (2007) wurden mit den Landkreisen in Deutschland verschnitten. Alle Landkreise, deren Fläche zu 70% innerhalb eines Boden-Klima-Raumes (BKR) lagen, wurden dem entsprechenden BKR zugeordnet. Die Region Havelland-Fläming des MORO-Projektes liegt in Boden-Klima-Räumen, die in ihrer Ausdehnung von Mecklenburg-Vorpommern bis nach Sachsen und Sachsen-Anhalt hineinreichen (Abb. 3.1).



**Abb. 3.1:** Lage der Boden-Klima-Räume 102 und 104 in Ostdeutschland und der Projektregion MORO mit den einzelnen Landkreisen Havelland, Potsdam-Mittelmark, Teltow-Fläming sowie den kreisfreien Städten Potsdam und Brandenburg

Die Projektregion MORO liegt in den beiden Boden-Klima-Räumen ‚Nordostdeutschen Binnentiefland‘ (BKR 102) mit dem Landkreis Havelland und dem ‚Ostdeutschen Tiefland‘ (BKR 104) mit den Landkreisen Potsdam-Mittelmark und Teltow-Fläming. Zwar befinden sich 30% der Fläche des Havellandes - der Südosten und –westen im Ostdeutschen Tiefland, aufgrund der oben beschriebenen Zuordnung wird das Havelland jedoch dem Norddeutschen Binnentiefland zugerechnet (Tab. 3.2).

**Tab. 3.2: Übersicht zur Zuordnung der Landkreise zu den Boden-Klima-Räumen 102 und 104, unterstrichen sind die Landkreise, bzw. kreisfreien Städte der Projektregion Havelland-Fläming**

Boden-Klima-Raum (Nummer)	Boden-Klima-Raum (Bezeichnung)	Landkreis bzw. kreisfreie Stadt
102	sandige diluviale Böden des nordostdeutschen Binnentieflandes	<u>Havelland</u> Oberhavel Ostprignitz-Ruppin Prignitz Ludwigslust Müritz Parchim
104	trocken-warme diluviale Böden des ostdeutschen Tieflandes	<u>Brandenburg an der Havel</u> Cottbus Frankfurt(Oder) <u>Potsdam</u> Dahme-Spreewald Elbe-Elster Oberspreewald-Lausitz Oder-Spree <u>Potsdam-Mittelmark</u> Spree-Neiße <u>Teltow-Fläming</u> Hoyerswerda Dessau Anhalt-Zerbst Wittenberg Jerichower Land

Bei der Mittelwertbildung des Klimas für einzelne BKR's wurde die Größe der Landkreise berücksichtigt. Die Berechnung der Mittelwerte eines BKR's erfolgte flächengewichtet.

Analog dazu wurden die Mittelwerte für das Land Brandenburg flächengewichtet aus den Daten der Landkreise berechnet.

### 3.2.1.2. Simulationsansatz - Konzeption der modellgestützten Projektion von Klimaerträgen

Die modellgestützte Ertragsprojektion erfolgt in fünf Schritten, dabei wird der Modellansatz von Wechsung et al. (2008) genutzt:

1. Berechnung der Ertragsratenmodelle anhand beobachteter Ertrags- und Klimadaten der Vergangenheit
2. Validierung des Ertragsratenmodells für eine in 1. nicht genutzte Periode des rezenten Klimas

3. Simulation der jährlichen Ertragsänderungsraten für eine synthetische Klimareihe
4. Integrative Verknüpfung der jährlichen Ertragsänderungsraten
5. Ermittlung der Szenarieneffekte ohne und mit CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt

### zu 1.

Die Wirkung des Klimas auf den Ertrag wurde mit einem statistischen Modell dargestellt, welches die Beziehung der jährlichen Ertragsänderung zur Klimaänderung beschreibt. Das Ertragsmodell setzt die relativen Ertragsänderungen im Vergleich zum Vorjahr,  $y'_{t,t-1} = y_t/y_{t-1}$  in Beziehung zu den relativen Änderungen summarischer Witterungsgrößen,  $x'(i)_{t,t-1} = x(i)_t/x(i)_{t-1}$ . Abhängig von der Kultur wurden verschiedene Witterungsgrößen (Tab. 3.3) in definierten Zeitabschnitten (Tab. 3.4) in Bezug zu den jährlichen Ertragsänderungen von Winterweizen, Silomais und Roggen gesetzt.

**Tab. 3.3: Witterungsgrößen (xi), Einheiten und Abkürzungen**

Beschreibung der Witterungsgrößen $x_i$	Einheit	Abkürzung
Tagesmitteltemperatur	°C	T
Niederschlagssumme	mm	NS
Potentielle Evapotranspiration (= Verdunstungsanspruch, nach Turc-Ivanov)	mm	ETP
Tage ohne Niederschlag	Anzahl	oNied
Luftfeuchtigkeit	%	Relf
Temperaturspannweite	°C	Tsw
Strahlung	J/m <sup>2</sup>	Str
Strahlung/Temperatur	J/m <sup>2</sup> /°C	Str/T
Temperatursumme mit T > 6°C	°C	Tsum

**Tab. 3.4: Zeitbezüge der in der Modellbildung für die Fruchtarten Winterweizen (WW), WR (Winterroggen) und Silomais (SM) genutzten Klimavariablen**

Zeitabschnitt	Abkürzung	Kultur
Mai – Oktober	Mai-Okt	WW, WR, SM
Mai – Juni	Mai-Jun	WW, WR, SM
Mai – Juli	Mai-Jul	WW, WR, SM
Juli – August	Jul-Aug	WW, WR, SM
August-Oktober	Aug-Okt	SM

Als Modellansatz wurde folgendes allgemeines Modell verwendet:

$$y' = y'_0 \prod_{i=1}^n x'(i)^{a_i} \text{ mit}$$

$y'$  - relativer Änderungsfaktor des Ertrages im Vergleich zum Vorjahr (1- keine Änderung)

$y'_0$  - mittlerer relativer Ertragsanstieg im Vergleich zum Vorjahr (Ertragssteigerungsrate durch technologischen Fortschritt)

$x'(i)$  - relativer Änderungsfaktor der i-ten Einflussvariablen im Vergleich zum Vorjahr (1- keine Änderung)

$a_i$  - Parameter

Für die Parameterschätzung wurde auf die logarithmisierte Form

$\log(y') = \log(y'_0) + a_1 \log(x'_1) + a_2 \log(x'_2) + \dots + a_i \log(x'_i) + a_n \log(x'_n)$ ,  $i=1, \dots, n$  zurückgegriffen.

Die Modellschätzung erfolgte für die Jahre 1981-1995 auf Ebene der Landkreise für alle Kreise in Ostdeutschland.

## zu 2.

Nach ihrer Parametrisierung wurden die Landkreismodelle genutzt, um die jährlichen Ertragsänderungsraten, ausgehend von den beobachteten Klimadaten für die Jahre 1996 bis 2006 zu simulieren. Die simulierten Mittel der jährlichen Änderungsraten für Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Ostdeutschland insgesamt wurden mit den beobachteten Änderungsraten im Validierungszeitraum verglichen.

Die Korrelationskoeffizienten für Winterweizen, Winterroggen und Silomais ist für diejenigen Bundesländer dargestellt, über deren Territorien sich die BKR 102 und 104 erstrecken, außerdem für Ostdeutschland insgesamt (Tab. 3.5).

**Tab. 3.5: Korrelationskoeffizienten zwischen simulierten und beobachteten Ertragsänderungsraten für die Validierungsperiode 1996-2006 nach Bundesländern und für Ostdeutschland insgesamt (Parametrisierung 1981-95)**

Bundesland	Winterweizen	Winterroggen	Silomais
Brandenburg	0,63**	0,86***	0,92***
Mecklenburg-Vorpommern	0,62**	0,70**	0,77***
Sachsen-Anhalt	0,80***	0,47ns	0,92***
Ostdeutschland	0,73**	0,67**	0,93***

\*\*\*  $p \leq 0,01$ , \*\*  $p \leq 0,05$ , \*  $p \leq 0,1$ , Irrtumswahrscheinlichkeit für die Signifikanz des Zusammenhangs

Die Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Ertragsänderungsraten war für die Bundesländer mit Ausnahme von Winterroggen in Sachsen-Anhalt sehr gut. Eine befriedigende Anpassung wurde ebenfalls auf der Ebene

Ostdeutschlands für alle betrachteten Kulturen erhalten. Aufgrund der Validierungsergebnisse war somit die Projektion des Ertrages möglich.

### zu 3.

Zunächst erfolgte die Simulation der jährlichen Ertragsänderungsraten für eine synthetische Klimareihe, getrennt für jeden Landkreis, in dem ein valides Modell geschätzt wurde. Hierzu wurden der DWD/PIK-Datensatz von 1951-2006 genutzt. Anschließend wurde die Simulationen mit den Szenariendatensätzen des STAR-Modells mit Temperaturerhöhung um 0K, 2K und 3K durchgeführt. Die simulierten jährlichen Ertragsänderungsraten wurden zu einer synthetischen Reihe für den Zeitraum 1951-2060 zusammengefügt.

Die landkreisweisen Ertragsänderungsraten werden zu Änderungsraten für Boden-Klima Räume und das Land insgesamt gemittelt.

### zu 4.

Durch multiplikative Verknüpfung der gemittelten Ertragsänderungsraten  $1, \dots, t, \dots, n$  je Boden-Klima-Raum und für das Land insgesamt gelangt man zu der relativen Ertragsänderung zum Zeitpunkt  $t$  im Vergleich zum Ertrag am Zeitpunkt  $t=0$  (integrative Komponente). Durch Multiplikation der relativen Ertragsänderung mit dem Basisertrag ( $y(0)$ ) erhält man den Absolutertrag  $y(t)$ . Der Bezug zum Absolutertrag wird irrelevant, wenn Erträge zweier Zeitpunkte, bzw. mittlere Erträge zweier Perioden miteinander ins Verhältnis gesetzt werden. Der Bezugs-ertrag kürzt sich heraus und man erhält die relative Ertragsänderung zwischen zwei Perioden.

### zu 5.

Die Szenarieneffekte ergeben sich, indem die mittleren Relativerträge der Szenarienzeiträume (2011-40 und 2031-60) mit denen der Basiszeiträume (1961-90 und 1977-2006) in Beziehung gesetzt werden. Der Bezug zum Basisniveau kürzt sich hierbei heraus. Der mittlere Relativertrag zur Mitte einer Periode wird aus linearen Trendfunktionen abgelesen, die über Anfang und Ende der betrachteten Perioden hinausgehen. Hierdurch wird der Einfluss zufälliger Häufungen von „guten“ und „schlechten“ Ertragsjahren in einem Zeitraum auf das Vergleichsergebnis gemindert.

**Tab. 3.6: Zeitabschnitte und ihre Bezeichnung**

Zeitabschnitt	Bezeichnung
1961-1990	Basiszeitraum 1
1977-2006	Basiszeitraum 2
2011-2040	Szenarienperiode 1
2031-2060	Szenarienperiode 2

### 3.2.1.3. Interpretation der Ertragssimulation

Die simulierten Ertragsänderungen sind ausschließlich klimageprägt. Sie beziehen sich auf das mittlere technologische Ertragsniveau der Kontrollperiode und beinhalten keine Aussagen über die technologischen Möglichkeiten zu einer weiteren Ertragssteigerung durch die Einführung neuer Sorten und Anbauverfahren. Klimabedingte Ertragsverluste können durch den technologischen Ertragsfortschritt vermindert, aber auch überkompensiert werden. Dies wird hier nicht betrachtet.

### 3.2.1.4. Grenzen des gewählten Modellkonzepts

Die Gültigkeitsgrenzen des Modells werden durch den in der Vergangenheit beobachteten Schwankungsbereich des Klimas gesetzt. In dem Maße wie das neue Klima den Schwankungsbereich versetzt, können Toleranzschwellen der Ertragsbildung überschritten werden, die in der Vergangenheit nicht erreicht wurden. Diese Effekte werden durch den gewählten Modellansatz nicht erfasst.

### 3.2.1.5. Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes

Die direkte Wirkung des Anstiegs der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration auf den Ertragseffekt im Vergleich zum Klima der Kontrollperiode wird nachträglich berücksichtigt. Hierzu werden CO<sub>2</sub>-abhängige Korrekturfaktoren kalkuliert. Die Faktoren vermindern negative Ertragseffekte infolge von Wasserstress und verstärken positive Ertragseffekte (vgl. Wechsung, 2008). Durch die stimulierende Wirkung von erhöhtem CO<sub>2</sub> werden Ertragsverluste gemindert und Ertragsgewinne gesteigert.

Die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration wird nach dem Berner Modell und dem Emissionsszenario A1B bis 2026 von gegenwärtig 387 ppm auf 432 ppm ansteigen und im Jahr 2050 bei 523 ppm liegen. Die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-abhängigen Korrekturen für eine Spanne von Szenarioeffekten von -40 bis +30% bezüglich der hier betrachteten Zeitspannen ist in Tab. 3.7 für das Emissionsszenario A1B zusammenfassend dargestellt.

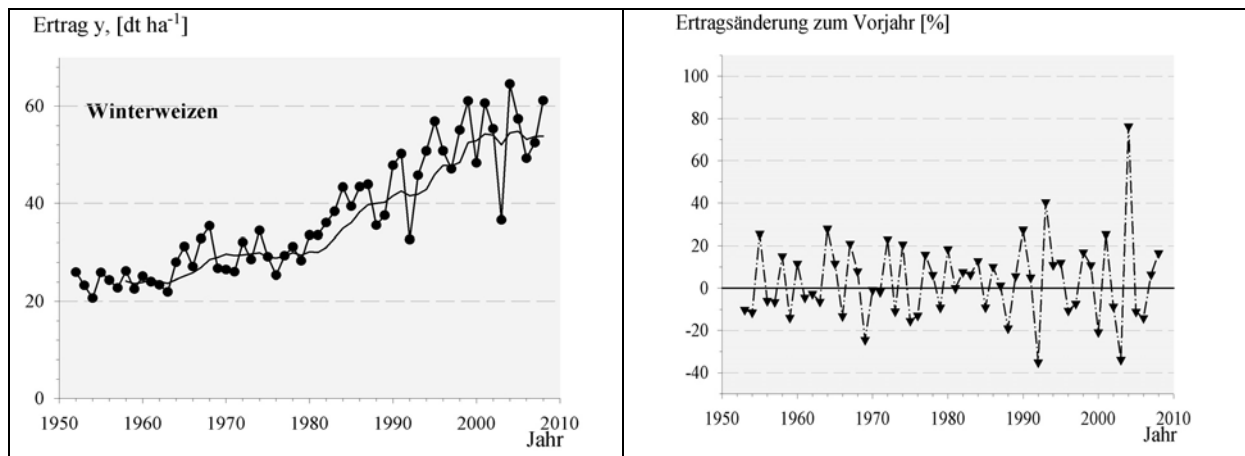
**Tab. 3.7: Modifizierende Wirkung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes auf C3- und C4-Pflanzen für eine Spanne von relativen Ertragseffekten (aus: Kropp et al., 2009)**

Jahr	C3-Pflanze (Weizen, Roggen)		C4-Pflanze (Mais)	
	2026	2056	2026	2056
CO <sub>2</sub> -Konzentration (ppm)	435	547	435	547
Ertragseffekt				
-40	-35	-32	-38	-34
-30	-25	-18	-27	-23
-20	-14	-6	-17	-12
-10	-3	5	-7	-1
0	7	13	3	6
10	18	24	13	17
20	28	36	24	27
30	39	47	34	38

### 3.3. Ergebnisse

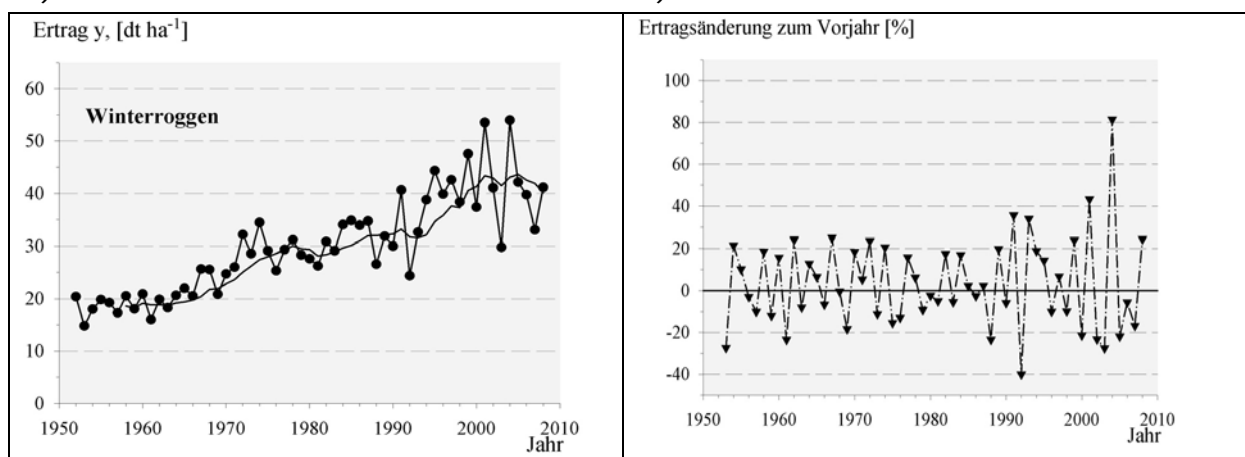
#### 3.3.1. Ertragsentwicklung in der Vergangenheit

Die Winterweizen- und Winterroggenenerträge in Brandenburg haben sich seit Anfang der 60er Jahre bis heute verdoppelt. Die schwarze, durchgezogene Linie zeigt die Entwicklung des 7jährigen, gleitenden durchschnittlichen Ertrages (Abb. 3.2, a und c).



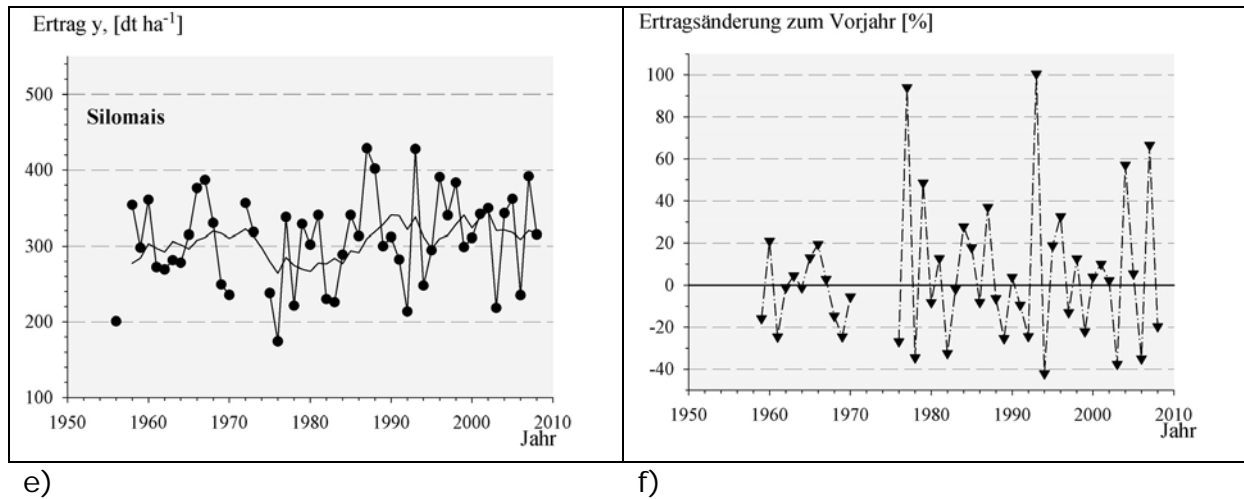
a)

b)



c)

d)



**Abb. 3.2: Entwicklung des Ertrages ( $y$ ) und der Ertragsänderungsrate ( $y'$ ) von Winterweizen (a, b), Winterroggen (c, d) und Silomais (e, f) im Zeitraum 1952-2008 mit dem siebenjährigen gleitenden Durchschnitt für  $y$  und  $y'$**

Die jährlichen Ertragsschwankungen, dargestellt als prozentuale Zu- oder Abnahme gegenüber dem Vorjahr, liegen zumeist innerhalb des 30% Abweichungsbereiches. Seit den 90er Jahren haben allerdings die jährlichen Ertragsschwankungen bei Wintergetreide stärker zugenommen (Abb. 3.2, b und d).

In Brandenburg haben sich die Erträge von Silomais nur geringfügig erhöht. Auffallend sind jedoch die starken, jahresweisen Ertragsschwankungen in einem Bereich von (-40%) bis (+100%) (Abb. 3.2, e und f).

### 3.3.2. Ertrags- und Klimavariabilität innerhalb der Boden-Klima-Räume

In den folgenden Tabellen (Tab. 3.8 - Tab. 3.10) sind verschiedene Ertragskennziffern der untersuchten Kulturen Weizen, Roggen und Mais in den einzelnen Boden-Klima-Räumen dargestellt. Neben dem mittleren Ertrag ( $\bar{y}$ ) wird die Abweichung vom Ertragsmittelwert als Variabilitätskoeffizient ( $V$ ) angegeben. Je höher der Variabilitätskoeffizient, desto größer waren die Ertragsunterschiede von Jahr zu Jahr. Dieses ist bedingt durch Umwelteinflüsse (Klima) oder Standortbedingungen (Bodengüte). In der Vergangenheit ist der Ertrag aller Kulturen angestiegen (Abb. 3.2). Der jährliche Ertragszuwachs innerhalb eines bestimmten Zeitraums ist in den folgenden Tabellen als Ertragsänderungsrate ( $\bar{y}'$ ) aufgeführt.

In der Vergangenheit lag im Zeitraum von 1961-90 im Ostdeutschen Tiefland das durchschnittliche Ertragsniveau bei Wintergetreide leicht über dem Niveau im Nordostdeutschen Binnentiefland (Tab. 3.8). In den Jahren 1977-2006 sind die durchschnittlichen Erträge weiter angestiegen (Tab. 3.9). Die jährliche Ertragszunahme war bei Winterweizen mit gut 2%, (bzw. 3% im Basiszeitraum 2) geringfügig höher als bei Winterroggen.

**Tab. 3.8: Mittelwerte ( $\bar{y}$ ), Variabilitätskoeffizienten (V) und mittlere Ertragsänderungsrate ( $\bar{y}'$ ) der Praxiserträge auf Landkreisbasis von Winterweizen, Winterroggen und Silomais in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) für den Zeitraum 1961-90**

Kultur	Ertragskennziffer	Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL)	Ostdeutsches Tiefland (PM + TF)
Winterweizen	$\bar{y}$ (dt ha <sup>-1</sup> )	31,5	33,0
	V (%) von $\bar{y}$	21,0	22,7
	$\bar{y}'$ (%)	2,2	2,2
Winterroggen	$\bar{y}$ (dt ha <sup>-1</sup> )	27,3	27,6
	V (%) von $\bar{y}$	16,6	20,8
	$\bar{y}'$ (%)	1,5	1,3
Silomais	$\bar{y}$ (dt ha <sup>-1</sup> )	309,5	299,3
	V (%) von $\bar{y}$	17,9	23,2
	$\bar{y}'$ (%)	-0,2	-2,0

Der Variabilitätskoeffizient bei Getreide war im Zeitraum von 1961-90 im Nordostdeutschen Binnentiefeland um bis zu 3% geringer, dies deutet auf günstigere Boden- und Klimaverhältnisse hin als im Ostdeutschen Tiefland. Die in Abb. 3.2 b und d erkennbare Zunahme der jährlichen Ertragsschwankungen ab den 90er Jahren lässt sich am Anstieg des Variabilitätskoeffizienten vor allem bei Wintergetreide im Norddeutschen Binnentiefeland ablesen (Tab. 3.9).

**Tab. 3.9: Mittelwerte ( $\bar{y}$ ), Variabilitätskoeffizienten (V) und mittlere Ertragsänderungsrate ( $\bar{y}'$ ) der Praxiserträge auf Landkreisbasis von Winterweizen, Winterroggen und Silomais in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) für den Zeitraum 1977-2006**

Kultur	Ertragskennziffer	Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL)	Ostdeutsches Tiefland (PM + TF)
Winterweizen	$\bar{y}$ (dt ha <sup>-1</sup> )	47,3	45,9
	V (%) von $\bar{y}$	26,1	21,3
	$\bar{y}'$ (%)	2,9	3,0
Winterroggen	$\bar{y}$ (dt ha <sup>-1</sup> )	37,8	34,6
	V (%) von $\bar{y}$	24,0	18,6
	$\bar{y}'$ (%)	1,9	1,4
Silomais	$\bar{y}$ (dt ha <sup>-1</sup> )	325,0	308,2
	V (%) von $\bar{y}$	15,6	22,3
	$\bar{y}'$ (%)	1,9	3,1

Eine Ertragszunahme von Silomais um etwa  $15 \text{ dt ha}^{-1}$  hat es im Nordostdeutschen Binnentiefland von 1977-2006 gegenüber 1961-90 gegeben. Die Ertragsunterschiede von Jahr zu Jahr sind im Ostdeutschen Tiefland wesentlich ausgeprägter. Dies wird durch den Variabilitätskoeffizient deutlich, der im Ostdeutschen Tiefland mit rund 23% deutlich höher als im Nordostdeutsches Binnentiefland mit 16% liegt (Tab. 3.10).

**Tab. 3.10: Werte ausgewählter Klimagrößen der Boden-Klima-Räume Nordostdeutsches Binnentiefland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) für die Jahre 1961-1990**

Boden-Klima-Raum	Nordostdeutsches Binnentiefland (HVL)	Ostdeutsches Tiefland (PM + TF)
Tagesmitteltemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	8,4	8,9
Niederschlagssumme [mm]	580,0	548,9
Potentielle Verdunstung [mm]	599,7	632,8
Globalstrahlung [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]	35,3	36,4
	Mai-Oktober	
Tagesmitteltemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	14,2	14,8
Niederschlagssumme [mm]	318,1	308,5
Potentielle Verdunstung [mm]	503,1	526,9
Strahlung [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]	26,1	26,6

Ein Vergleich der Klimagrößen der beiden Boden-Klima-Räume zeigt, dass die Jahresmitteltemperatur, aber auch die durchschnittliche Temperatur während der Hauptvegetationszeit von Mai-Oktober im Ostdeutschen Tiefland um bis zu  $0.7^{\circ}\text{C}$  höher lag (Tab. 3.10 und Tab. 3.11).

Die höhere Temperatur hatte eine höhere potentielle Verdunstung bei einem geringeren Niederschlagsniveau zur Folge. Auf Standorten in Potsdam-Mittelmark und Teltow-Fläming mit Böden von geringer Wasserspeicherkapazität führte dies vor allem bei den Sommerkulturen wie Silomais in Jahren mit längerer Vorsommertrockenheit zu stärkeren, jährlichen Ertragsschwankungen.

**Tab. 3.11: Werte ausgewählter Klimagrößen der Boden-Klima-Räume Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) für die Jahre 1977-2006**

Boden-Klima-Raum	Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL)	Ostdeutsches Tiefland (PM + TF)
Jahr		
Tagesmitteltemperatur [°C]	8,9	9,4
Niederschlagssumme [mm]	595,0	555,8
Potentielle Verdunstung [mm]	615,4	651,5
Globalstrahlung [J/m <sup>2</sup> ]	35,6	36,8
Mai-Oktober		
Tagesmitteltemperatur [°C]	14,6	15,3
Niederschlagssumme [mm]	323,9	309,2
Potentielle Verdunstung [mm]	511,3	537,8
Strahlung [J/m <sup>2</sup> ]	26,1	26,6

### 3.3.3. Ertragsrelevantes Klimaänderungssignal

In Brandenburg wird ein Anstieg der Jahresmitteltemperaturen gegen Mitte dieses Jahrhunderts erwartet. Um die Bandbreite der Erwartungen besser erfassen zu können, wurden 3 Szenarien gegenübergestellt: die Temperaturerhöhung um 0, 2 und 3K. Hierbei wurde jeweils die mittlere Realisierung gewählt.

Nach dem Modell STAR ergeben sich bei einem Vergleich mit dem Zeitraum 1961-90 die in Tab. 3.12 dargestellten Entwicklungen.

In der Szenarienperiode 1 steigen die mittleren Temperaturen voraussichtlich, je nach Temperaturanstiegsszenario, um 0,8 - 2K, in der Szenarienperiode 2 auf bis zu 3,3K gegenüber dem Vergleichszeitraum von 1961-1990 an. Gleichzeitig geht die die Gesamtmenge an Niederschlag im Mittel des Landes zurück. Allerdings werden sich die mittleren Niederschläge im Nordostdeutschen Binnentiefeland mit dem Landkreis Havelland kaum ändern. Im Ostdeutschen Tiefland mit den Landkreisen Potsdam-Mittelmark und Teltow-Fläming muss dagegen von leicht zurückgehenden Niederschlägen ausgegangen werden. Zusammen mit einem stärkeren Ansteigen der Temperatur bei einer durchschnittlich höheren Mitteltemperatur wird die Verdunstung dadurch stärker zunehmen. Zur Mitte des Jahrhunderts werden die Unterschiede zwischen den Boden-Klima-Räumen weiter zunehmen.

**Tab. 3.12: Jahrestemperatur (Tmit in °C), Jahresniederschlag (Nied in mm) und jährliche Verdunstung (ETP in mm) als Differenzen des Zeitraums 2011-2040 bzw. 2031-60 gegenüber 1961-90 in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) und für das Land Brandenburg bei einer Temperaturerhöhung um 0, 2 und 3K**

BKR	Szenario	2011-40 vs 1961-90			2031-60 vs 1961-90		
		Tmit [°C]	Nied [mm]	ETP [mm]	Tmit [°C]	Nied [mm]	ETP [mm]
Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL)	OK	0.8	18.6	35.1	1.1	19.1	50.8
	2K	1.5	12.1	78.3	2.4	-10.6	127.7
	3K	1.9	0.5	104.8	3.1	-17.8	182.3
Ostdeutsches Tiefland (PM+TF)	OK	0.8	9.0	37.8	1.1	10.9	54.1
	2K	1.5	2.4	81.4	2.4	-17.5	136.0
	3K	2.0	-29.0	112.6	3.3	-52.5	195.5
Land Brandenburg	OK	0.8	10.8	36.5	1.1	11.7	52.2
	2K	1.6	0.7	80.2	2.4	-21.1	132.8
	3K	2.0	-22.6	109.1	3.2	-47.1	189.4

**Tab. 3.13: Jahrestemperatur (Tmit in °C), Jahresniederschlag (Nied in mm) und jährliche Verdunstung (ETP in mm) als Differenzen des Zeitraums 2011-2040 bzw. 2031-60 gegenüber 1977-2006 in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) und für das Land Brandenburg bei einer Temperaturerhöhung um 0, 2 und 3K**

BKR	Szenario	2011-40 vs 1977-2006			2031-60 vs 1977-2006		
		Tmit [°C]	Nied [mm]	ETP [mm]	Tmit [°C]	Nied [mm]	ETP [mm]
Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL)	OK	0.4	3.6	19.4	0.6	4.1	35.1
	2K	1.1	-2.9	62.6	1.9	-25.6	112.0
	3K	1.5	-14.5	89.1	2.7	-32.8	166.6
Ostdeutsches Tiefland (PM+TF)	OK	0.4	2.1	19.1	0.6	4.0	35.4
	2K	1.1	-4.6	62.6	2.0	-24.4	117.3
	3K	1.5	-35.9	93.9	2.8	-59.4	176.8
Land Brandenburg	OK	0.4	3.9	18.4	0.6	4.8	34.1
	2K	1.1	-6.2	62.1	2.0	-28.0	114.7
	3K	1.5	-29.5	91.0	2.7	-53.9	171.3

Der Vergleich der Witterungsparameter der Szenarienperioden mit dem zweiten Zeitraum 1977-2006 zeigt eine parallele Entwicklung. Durch den in diesem Zeitraum bereits eingegangenen Temperaturanstieg fällt die Temperatur- und Verdunstungsänderung geringer aus.

3.3.4. Ertragsänderung in der Zukunft ohne CO<sub>2</sub>-Effekt

Ein Vergleich der zukünftigen Ertragsänderung mit dem Zeitraum 1961-90 zeigt, dass die voraussichtlichen klimatischen Ertragsaussichten von Wintergetreide in der Modellregion für die kommenden Jahrzehnte als günstig bezeichnet werden können. Mit ansteigenden Temperaturen um bis zu 2K bei einem geringfügigen Rückgang des Jahresniederschlages werden die Getreideerträge um bis zu 9% ansteigen (Tab. 3.14). Ein Temperaturanstieg um 3K wird von Getreide noch toleriert, die Ertragsaussichten von Silomais werden jedoch insbesondere im Ostdeutschen Tiefland zurückgehen.

**Tab. 3.14: Simulierte Ertragsänderungen (%) für Winterweizen (WW); Winterroggen (WR) und Silomais (SM) in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) und im Land Brandenburg, Vergleich der Zeiträume 2011-40 und 2031-60 gegenüber 1961-90 bei einem Temperaturanstieg von 0K, 2K und 3K (ohne CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt)**

BKR	Kultur	0K		2K		3K	
		2011-40 vs 1961-90	2031-60 vs 1961-90	2011-40 vs 1961-90	2031-60 vs 1961-90	2011-40 vs 1961-90	2031-60 vs 1961-90
Nordostdeutsches Binnentiefeland (HVL)	WW	2	3	9	6	1	0
	WR	5	3	7	6	4	3
	SM	6	3	6	1	2	-1
Ostdeutsches Tiefland (PM+TF)	WW	1	4	5	2	3	2
	WR	7	6	8	5	6	5
	SM	14	7	9	1	-6	2
Land Brandenburg	WW	3	4	6	3	3	2
	WR	5	4	7	5	5	2
	SM	13	10	9	2	-2	1

Bei einem Vergleich der Ertragsänderung der Szenarienperioden mit der Basisperiode von 1977-2006 zeigt sich, dass die ansteigenden Temperaturen insbesondere im Ostdeutschen Tiefland die Ertragsaussichten von Silomais deutlich verschlechtern werden. Bereits zur Mitte des Jahrhunderts muss bei einem Temperaturanstieg von 2K mit einem Ertragsrückgang gerechnet werden, und ein Anstieg der Temperatur um 3K dürfte Ertragsrückgänge um bis zu 16% zur Folge haben. Kaum Auswirkungen hat dagegen ein Anstieg der Temperatur im Haveland (Tab. 3.15).

**Tab. 3.15: Simulierte Ertragsänderungen (%) für Winterweizen (WW); Winterroggen (WR) und Silomais (SM) in den Boden-Klima-Räumen Nordostdeutsches Binnentiefland (HVL) und Ostdeutsches Tiefland (PM + TF) und im Land Brandenburg, Vergleich der Zeiträume 2011-40 und 2031-60 gegenüber 1977-2006 bei einem Temperaturanstieg von 0K, 2K und 3K (ohne CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt)**

BKR	Kultur	0K		2K		3K	
		2011-40 vs 1977-2006	2031-60 vs 1977-2006	2011-40 vs 1977-2006	2031-60 vs 1977-2006	2011-40 vs 1977-2006	2031-60 vs 1977-2006
Nordostdeutsches Binnentiefland (HVL)	WW	4	5	11	9	3	2
	WR	2	0	4	3	1	0
	SM	3	1	3	-1	0	-4
Ostdeutsches Tiefland (PM+TF)	WW	1	3	5	2	2	2
	WR	3	2	4	1	2	1
	SM	2	-5	-2	-10	-16	-9
Land Brandenburg	WW	3	4	6	3	3	2
	WR	2	1	4	2	2	0
	SM	2	-1	-1	-8	-11	-8

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Vergleich der Ertragsänderungen in den Szenarienzeiträumen der Zukunft mit denen unterschiedlicher Basiszeiträume der Vergangenheit zunächst einmal zeigt, dass im 2K Szenario generell für alle Leitfruchtarten Ertragssteigerungen um bis zu 9 % (Tab. 3.14), bzw. Ertragssteigerungen bei Getreide um bis zu 11 % zu erwarten sind (Tab. 3.15). Zur Mitte des Jahrhunderts werden die Ertragszuwächse zurückgehen.

Deutlich erkennbar ist der dämpfende Einfluss eines Temperaturanstieges von 3K auf die Ertragsaussichten. Während die Erträge von Weizen und Roggen nahezu unverändert bleiben, verschlechtern sich die Erträge vom Silomais deutlich um bis zu -16%. Dies trifft insbesondere das Ostdeutsche Tiefland mit den Landkreisen Teltow-Fläming und Potsdam-Mittelmark.

### 3.3.5. Einfluss einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration auf den Ertrag

Dem Klimaszenarium A1B liegt nach dem Bern-CC Modell ein Anstieg der gegenwärtigen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 386 ppm auf 523 ppm im Jahr 2050 zugrunde, was einer Verdopplung des vorindustriellen Niveaus entspricht. Da die CO<sub>2</sub>-Erhöhung die Photosynthese stimuliert und die Verdunstungsverluste der Pflanzen vermindert (Amthor 1998; Tubiello, et al. 2007), werden die Ertragsänderungen (Tab. 3.14 und Tab. 3.15) durch die in Kap. 3.2.1.5 beschriebenen Korrekturfaktoren ergänzt. Hierdurch könnte im Mittel in Brandenburg bei einem Temperaturanstieg von 2K, welches dem Szenario A1B entspricht, ein Ertragsan-

stieg von bis zu 16 % bei Winterweizen (3+13) im Zeitraum 2031-60 gegenüber 1961-90 erzielt werden. Bei Silomais wäre es bei dem Temperaturanstiegsszenario von 2 K im Mittel für Brandenburg etwa 8 % an Ertragszuwachs im Zeitraum 2031-60 gegenüber den Jahren 1961-90.

#### 3.3.5.1. Klimafolgen unter Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes

Bezüglich der Wirksamkeit des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes ist generell ist zu beachten, dass die kompensierende Wirkung von erhöhtem CO<sub>2</sub> an eine ausreichende Stickstoffversorgung der Pflanzen gebunden ist. Da aus unterschiedlichen Gründen (Klima- und Gewässerschutz, Rohstoffverknappung, Nachfrageanstieg) von einem deutlichen Anstieg der Preise für Stickstoffdünger auszugehen ist, kann der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt nicht ohne weiteres kostenneutral realisiert werden. Dies wird nur möglich sein, wenn gleichzeitig die Effizienz der Stickstoffdüngung erheblich gesteigert wird.

Das schlechte Wasserhaltevermögen auf einigen Flächen des Untersuchungsgebietes wird trotz ausreichendem Stickstoffeinsatz und höheren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der limitierende Faktor bei der Maisproduktion sein.

Zur tendenziell ertragsstabilisierenden Wirkung von erhöhtem CO<sub>2</sub> ist noch anzumerken, dass sie zulasten der Proteinzusammensetzung geht, was sich insbesondere bei Weizen qualitätsmindernd auswirkt (Wu et al. 2004; Högy und Fangmeier 2008; Piikki et al. 2008).

#### 3.3.5.2. Berücksichtigung von Schaderregern und Krankheiten

Die Abschätzung der Ertragswirkung kann jedoch keine ertragsmindernde Faktoren wie neue Schaderreger oder Krankheiten berücksichtigen. Zwar wurden diese bei der Modellbildung implizit einbezogen, soweit sie in der Vergangenheit eine ertragsrelevante Bedeutung hatten. Für die Zukunft können aber die als Folge des Klimawandels neu aufgetretenen Schaderreger und ihre Bedeutung für die Ertragssicherheit nicht abgeschätzt werden.

#### 3.3.6. Anpassungsoptionen

Zukünftig wird während der Vegetationszeit weniger Wasser für die Pflanzen zur Verfügung stehen. Der Grund hierfür ist die ansteigende Verdunstung bei etwa gleichbleibendem Niederschlagsniveau. Hinzu kommen zunehmend längere niederschlagsfreie Phasen im Mai-Juli. Besonders auf grundwasserfernen Standorten und Böden mit geringem Wasserhaltevermögen werden Anpassungsmaßnahmen erforderlich sein.

Als mögliche Anpassungen an die sich veränderten Produktionsbedingungen kommen auf diesen Standorten daher

- a) eine Ausweitung der Beregnungsflächen
- b) ein zunehmender Anbau trockenresistenter Pflanzenarten (z.B. Hirse)

- c) der Anbau von mehrjährigen Pflanzen, welche die Winterfeuchtigkeit besser ausnutzen können, wie beispielsweise Elefantengras oder Miscanthus zur Biomasseproduktion in Frage.

Flankiert werden sollten die Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft von Maßnahmen zur Verminderung von Verdunstungsverlusten. Hierbei stehen Anpassungsmaßnahmen wie eine Intensivierung der Beregnung allerdings im Widerspruch, da zusätzliche Beregnungsflächen zu höheren Verdunstungsverlusten beitragen. Lösungsansätze könnten eine Kombination verschiedener Maßnahmen, aber auch Maßnahmen zur Vermeidung von Verdunstungsverlusten in anderen Sektoren wie z.B. der Forstwirtschaft sein.

Insgesamt werden mittelfristig gute Chancen für die Landwirtschaft gesehen. Ansteigende Temperaturen bei ausreichender Wasserversorgung ermöglichen beispielsweise den Anbau von Silomaisorten mit höheren Reifezahlen oder auch den Anbau von neueren, wärmeliebenderen Sorten. Die Ergebnisse werden durch Olesen et al. (2002) bestätigt, die für die Landwirtschaft in Mitteleuropa in den kommenden Jahrzehnten unter Klimawandel insgesamt günstige Bedingungen voraussehen.

### **3.4. Zusammenfassung**

Durch den CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt können die klimabedingten Ertragszuwächse auf Landesebene und auf der Ebene der Klima-Boden-Räume zunehmen. Ertragssteigerungen sind sowohl bei den Winterweizen und Winterroggen, als auch bei Silomais bis zur Mitte des Jahrhunderts möglich, da die klimatischen Ertragsbedingungen weiterhin günstig sein werden. Ein Temperaturanstieg oberhalb von 2K wird jedoch zu Ertragsrückgängen insbesondere bei Mais führen, der nicht mehr nur durch den evtl. zum Tragen kommenden CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt abgemildert werden kann.

### 3.5. Literatur

- Amthor, J. S. (1998): "Perspective on the relative insignificance of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration to crop yield." *Field Crops Research* 58(2): 109-127.
- Högy, P. und A. Fangmeier (2008): "Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on grain quality of wheat." *Journal of Cereal Science* 48(3): 580-591.
- Kropp J, Roithmeier, O., Hattermann, F., Rachimow, C., Lüttger, A., Wechsung, F., Lasch, P., Christiansen ES, Reyer, C., Suckow, F., Gutsch, M., Holsten, A., Kartschall, T., Wodinski, M., Hauf Y, Conradt, T., Österle, H., Walther, C., Lissner, T., Lux, N., Tekken, V., Ritchie, S., Kossak, J., Klaus M, Costa, L., Vetter, T., Klose, M. (2009) Klimawandel in Sachsen-Anhalt: Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Endbericht. Potsdam. In. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, p 449
- Olesen, J. E. und M. Bindi (2002): "Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy." *European Journal of Agronomy* 16(4): 239-262.
- Piikki, K., L. De Temmerman, K. Ojanperä, H. Danielsson und H. Pleijel (2008): "The grain quality of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in relation to elevated ozone uptake and carbon dioxide exposure." *European Journal of Agronomy* 28(3): 245-254.
- Roßberg D, Michel V., Graf, R. und Neukampf, R. (2007) Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. *Nachrichtenbl Deut Pflanzenschutz* 59:155-161
- Tubiello, F. N., J. S. Amthor, K. J. Boote, M. Donatelli, W. Easterling, G. Fischer, R. M. Gifford, M. Howden, J. Reilly und C. Rosenzweig (2007): "Crop response to elevated CO<sub>2</sub> and world food supply: A comment on "Food for Thought..." by Long et al., *Science* 312:1918-1921, 2006." *European Journal of Agronomy* 26(3): 215-223.
- Wechsung, F., F.-W. Gerstengarbe, P. Lasch und A. Lüttger (2008): "Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel." PIK-Report No. 112. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam.
- Wu D.-X., Wang G.-X., Bai Y.-F., Liao J.-X. (2004) Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104:493-507



POTSDAM-INSTITUT FÜR  
KLIMAFOLGENFORSCHUNG

## **Expertise 4 "Klimawandel und Waldentwicklung der Region Havelland-Fläming"**

Bericht zum

**Modellvorhaben der Raumordnung**

**Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel für die Region Ha-  
velland-Fläming**



### **Auftraggeber:**

Regionale Planungsgemeinschaft Havelland-Fläming

Herr Harald Knauer

Oderstraße 65

14513 Teltow

Autoren: P. Lasch, F. Suckow, M. Gutsch, A. Murawski, J. Petraschek  
Forschungsbereich „Klimawirkung und Vulnerabilität“

## Inhaltsverzeichnis

<b>4. Forstwirtschaft .....</b>	<b>119</b>
<b>4.1. Aufgabe .....</b>	<b>119</b>
<b>4.2. Methodik.....</b>	<b>120</b>
4.2.1. Anwendung eines Impaktmodells für die Berechnung verschiedener Indikatoren.....	120
4.2.2. Anwendung des prozess-basierten Waldwachstums- modells 4C zur Abschätzung der Produktivität.....	122
4.2.2.1. Waldproduktivität: Simulation der ÖWK- Bestände.....	122
4.2.2.2. Waldumbaueignung von Baumarten .....	123
4.2.2.3. Produktivität landwirtschaftlicher Flächen mit Aspen-KUP.....	124
<b>4.3. Daten.....</b>	<b>124</b>
4.3.1 Zeiträume und Szenarien.....	124
4.3.2 Klimastationen .....	125
4.3.3 Standorte, Bestände .....	125
<b>4.4. Analysen mit dem Impaktmodell .....</b>	<b>125</b>
4.4.1. Dürre-Index .....	125
4.4.2. Klimatisches Waldbrandrisiko (WBI) .....	132
4.4.3. Erosionsrisiko.....	137
<b>4.5. 4C-Analysen für die ÖWK-Bestände .....</b>	<b>142</b>
4.5.1. Auswertung für alle ÖWK-Kiefernbestände.....	142
4.5.1.1 Simulation mit realen ÖWK-Beständen .....	142
4.5.1.2 Simulation mit hypothetischen Beständen (Kiefer, Buche, Eiche) unter Bewirtschaftung	148
4.5.2. Waldumbauindikator .....	163
<b>4.6. Holzertrag von Aspen-KUP auf Ackerflächen .....</b>	<b>167</b>
<b>4.7. Zusammenfassung.....</b>	<b>169</b>
<b>4.8. Literatur .....</b>	<b>170</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 4.1: Ableitung des Waldumbauindikators .....	124
Abb. 4.2: Dürre-Index, gemittelt für 1961-1990 (oben), 1977-2006 (unten) .....	127
Abb. 4.3: Dürre-Index für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	129
Abb. 4.4: Dürre-Index für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	130
Abb. 4.5: Dürre-Index für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	131
Abb. 4.6: Klimatischer Waldbrandindex, gemittelt für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten) .....	133
Abb. 4.7: Klimatischer Waldbrandindex für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	134
Abb. 4.8: Klimatischer Waldbrandindex für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	135
Abb. 4.9: Klimatischer Waldbrandindex für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	136
Abb. 4.10: Mittlere Erosionsrisikoklasse für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten) .....	138
Abb. 4.11: Änderung der Erosionsrisikoklasse im Vergleich zu 1961-1990 für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	139
Abb. 4.12: Änderung der Erosionsrisikoklasse im Vergleich zu 1961-1990 für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	140
Abb. 4.13: Änderung der Erosionsrisikoklasse im Vergleich zu 1961-1990 für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	141
Abb. 4.14: Mittelwert (gestrichelt), Median, 5. und 95. Perzentil (Punkte), sowie 10. und 90. Perzentil und Standardabweichung (Box) der NPP [t C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ] für 117 Kiefernrein- und Mischbestände, dargestellt über alle drei Landkreise (PM, HVL, TF), den Basiszeitraum 1961-1990 und die beiden Szenarienzeiträume .....	142
Abb. 4.15: Simulierte und für forstliche Wuchsbezirke gemittelte NPP, berechnet an den ÖWK-Flächen, für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten) .....	144
Abb. 4.16: Simulierte und für forstliche Wuchsbezirke gemittelte NPP, berechnet an den ÖWK-Flächen, für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	145
Abb. 4.17: Simulierte und für forstliche Wuchsbezirke gemittelte NPP, berechnet an den ÖWK-Flächen, für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	146
Abb. 4.18: Simulierte und für forstliche Wuchsbezirke gemittelte NPP, berechnet an den ÖWK-Flächen, für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	147
Tab. 4.7: Jährliche NPP [t C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ] als dreißigjähriges Mittel über 122 Kiefernbestände, aufgeteilt nach Landkreisen .....	148
Abb. 4.19: NPP 35-jähriger Kiefernbestände, gemittelt für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten) .....	149
Abb. 4.20: NPP 35-jähriger Kiefernbestände, gemittelt für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	150
Abb. 4.21: NPP 35-jähriger Kiefernbestände, gemittelt für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	151
Abb. 4.22: NPP 35-jähriger Kiefernbestände, gemittelt für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	152

Abb. 4.23: NPP 35-jähriger Eichenbestände gemittelt für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten) .....	154
Abb. 4.24: NPP 35-jähriger Eichenbestände, gemittelt für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	155
Abb. 4.25: NPP 35-jähriger Eichenbestände, gemittelt für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	156
Abb. 4.26: NPP 35-jähriger Eichenbestände, gemittelt für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	157
Abb. 4.27: NPP 35-jähriger Buchenbestände, gemittelt für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten) .....	159
Abb. 4.28: NPP 35-jähriger Buchenbestände, gemittelt für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	160
Abb. 4.29: NPP 35-jähriger Buchenbestände, gemittelt für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	161
Abb. 4.30: NPP 35-jähriger Buchenbestände, gemittelt für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	162
Abb. 4.31: Waldumbaueignung, aufgeschlüsselt nach den Anteilen der ÖWK-Flächen, für Periode P1 (2011-2040) und Periode P2 (2031-2060) .....	163
Abb. 4.32: Waldumbaueignung der ÖWK-Flächen in den untersuchten Landkreisen unter dem OK-Szenario für 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	164
Abb. 4.33: Waldumbaueignung der ÖWK-Flächen in den untersuchten Landkreisen unter dem 2K-Szenario für 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	165
Abb. 4.34: Waldumbaueignung der ÖWK-Flächen in den untersuchten Landkreisen unter dem 3K-Szenario für 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten) .....	166

## **Tabellenübersicht**

Tab. 4.1: Thematische Leistungsbeschreibung der Expertise 4, betrachtete Zeiträume und vorgesehene Art der Ergebnisdarstellung .....	119
Tab. 4.2: Klassifizierung der Erosionsgefährdung .....	122
Tab. 4.3: Landkreis- und Periodenmittelwerte des Dürrindizes für die OK-, 2K- und 3K-Szenarien .....	126
Tab. 4.4: Landkreis- und Periodenmittelwerte des klimatischen Waldbrandindex für die OK-, 2K- und 3K-Szenarien .....	132
Tab. 4.5: Jährliche NPP [ $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ] als dreißigjähriges Mittel über alle 112 Kiefern-Flächen, aufgeteilt nach Landkreisen .....	143
Tab. 4.6: Relative Änderung [%] der jährlichen NPP über alle 112 Kiefern-Flächen in Relation zur NPP für 1977-2006 .....	143
Tab. 4.7: Jährliche NPP [ $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ] als dreißigjähriges Mittel über 122 Kiefernbestände, aufgeteilt nach Landkreisen .....	148
Tab. 4.8: Jährliche NPP [ $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ] als dreißigjähriges Mittel über 122 Eichenbestände, aufgeteilt nach Landkreisen .....	153
Tab. 4.9: Jährliche NPP [ $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ] als dreißigjähriges Mittel über 122 Buchenbestände, aufgeteilt nach Landkreisen .....	158
Tab. 4.10: Jährliche Erträge der Aspen-KUP (Mitt - Mittelwert, Min - minimaler Wert, Max - maximaler Wert, Sdev - Standardabweichung) .....	168

**Kernaussagen für die Region Havelland-Fläming:**

- Unter den angenommenen Klimaprojektionen steigt die Dürregefährdung für die Vegetation.
- Ein Anstieg der klimatisch bedingten Waldbrandgefahr ist zu erwarten.
- Die durch Niederschlag bedingte Erosionsgefährdung geht leicht zurück. Die Auswirkungen von Extremniederschlägen wurden nicht berücksichtigt.
- Steigende Temperaturen führen zu längeren Vegetationsperioden und damit zu höherer Produktivität der Kiefern- und Eichenbestände, der Produktivitätsgewinn geht aber mit dem 3K-Szenario und zur Mitte des Jahrhunderts wieder etwas zurück.
- Die Buche erzielt geringere Produktivitätssteigerungen als die Kiefer und die Eiche und man muss unter dem 3K-Szenario im Zeitraum 2031-2060 in den Kreisen Potsdam-Mittelmark und Teltow-Fläming mit einem Rückgang der Produktivität im Vergleich zum Zeitraum 1977-2006 rechnen.
- Für einen großen Teil der heutigen, untersuchten Kiefernflächen ist langfristig der Waldumbau mit Buche aufgrund der zunehmenden Trockenheit mit einem starken Risiko verbunden. Für ungefähr die Hälfte der betrachteten Flächen wird die Eiche empfohlen.
- Der Anbau von Kurzumtriebsplantagen auf schlechteren landwirtschaftlichen Flächen mit trockenheitstoleranten Baumarten (z.B. Zitterpappel) ist eine Alternative für die Landwirtschaft.

## 4. Forstwirtschaft

### 4.1. Aufgabe

Mit dem prozess-basierten Waldwachstumsmodell 4C wird für die Kiefer und eine weitere Hauptbaumart (Eiche) in sinnvollen Teilräumen die Abschätzung des Biomassewachstums unter Klimawandel vorgenommen. Die Ergebnisse werden in Form von Tabellen und Karten dargestellt und interpretiert. Untersucht werden die forstwirtschaftlichen Nutzungsbedingungen unter den drei Klimaszenarien (0, 2 und 3 Kelvin) und die Änderungen in den Vergleichszeiträumen (Tab. 4.1).

**Tab. 4.1: Thematische Leistungsbeschreibung der Expertise 4, betrachtete Zeiträume und vorgesehene Art der Ergebnisdarstellung**

Nr.	Beschreibung	Zeiträume	Art der Darstellung
1	klimatische Waldbrandgefahr für Vergangenheit und drei Klimaszenarien, Ausweisung besonders betroffener Regionen	1961-1990; 1977-2006; 2011-2040; 2031-2060	Karten, Tabellen
2	Waldvegetationsrelevanter Trockenstressindikator für Vergangenheit und drei Klimaszenarien	1961-1990; 1977-2006; 2011-2040; 2031-2060	Karten, Tabellen
3	Produktivität der Kiefernbestände unter Klimawandel für Vergangenheit und drei Klimaszenarien	1961-1990; 1977-2006; 2011-2040; 2031-2060	Karten, Tabellen
4	Waldumbaupotentiale unter Klimawandel; (drei Klimaszenarien)	2011-2040; 2031-2060	Karten, Tabellen
5	Biomassepotential auf landwirtschaftlichen Flächen mit Aspen-KUP	1987-2006; 2041-2060	Tabellen
6	Bodenerosionsgefahr unter Klimawandel (drei Klimaszenarien)	1961-1990; 1977-2006; 2011-2040; 2031-2060	Karten

## 4.2. Methodik

Die Waldentwicklung in der Region Havelland-Fläming unter Klimawandel wird mithilfe von Modellen abgeschätzt. Dazu werden zwei am PIK entwickelte Modelle eingesetzt, ein Impaktmodell und das Waldwachstumsmodell 4C. In den folgenden Unterkapiteln werden diese Modelle beschrieben.

### 4.2.1. Anwendung eines Impaktmodells für die Berechnung verschiedener Indikatoren

Zur Berechnung von einfachen Impaktfunktionen wird ein Impaktmodell genutzt, das auf Grundlage der täglichen meteorologischen Größen der PIK-Datenbank bzw. der STAR-Szenarien die im Folgenden beschriebenen Indikatoren berechnet.

#### a) Trockenstressindikator (Dürre-Index)

Der Trockenstressindikator ist die durchschnittliche Anzahl aufeinanderfolgender Tage im Jahr ohne Niederschlag zwischen den Monaten April bis Oktober in einem betrachteten Zeitraum. Eine Zunahme dieses Indikators bedeutet demzufolge eine Zunahme der Länge von Trockenperioden in den Monaten April bis Oktober. Die Berechnung wird folgendermaßen vorgenommen:

$$D = \frac{\sum_{j=1}^p m_j}{p} \quad \text{wobei} \quad m_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}}{n_j}$$

mit

$D$  - mittlerer Trockenstressindikator im betrachteten Zeitraum

$m_j$  - mittlere Anzahl aufeinanderfolgender Tage ohne Niederschlag im Jahr  $j$

$p$  - Anzahl der Jahre im betrachteten Zeitraum

$x_{ij}$  - Anzahl aufeinanderfolgender Tage ohne Niederschlag in Trockenperiode  $i$  des Jahres  $j$

$n_j$  - Anzahl der Trockenperioden im Jahr  $j$

#### b) Klimatisches Waldbrandrisiko (WBI)

Zur Abschätzung der witterungsbedingten Waldbrandgefahr wird mithilfe der täglichen meteorologischen Daten ein Waldbrandindex berechnet. Der hier verwendete Waldbrandindex wurde nach dem M68-Index von Käse (Käse 1969) implementiert, der in der DDR genutzt wurde und in die operationellen Verfahren des Deutschen Wetterdienstes integriert worden ist. Auf der Basis von Lufttemperatur und Sättigungsdefizit der Luft wird täglich eine Kennziffer berechnet, die durch Korrekturfaktoren in Abhängigkeit von Luftfeuchte und Phänologie (Aus-

triebsdaten von Birke und Robinie) modifiziert werden (Flemming 1994). Diese Kennziffer wird nochmals durch bestimmte Regen- oder Schneemengen korrigiert und ab Mitte Februar bzw. ab Abtauen der Schneedecke aufsummiert. Den Kennziffern werden anschließend die Waldbrandwarnstufen 1 bis 5 zugeordnet. Das arithmetische Mittel der täglichen Waldbrandwarnstufen wird als Jahresindex der Waldbrandgefährdung dargestellt.

### c) Bodenerosionsrisikoklasse

Erosion durch fließendes Wasser findet fast ausschließlich auf unbewachsenen Standorten statt. In der heutigen Kulturlandschaft finden sich solche Bedingungen hauptsächlich auf landwirtschaftlichen Flächen, auf denen zwischen den Fruchtfolgen gepflügt wird und damit der Boden für einen Zeitraum unbedeckt bleibt. Mit der allgemeinen Bodenabtragsgleichung lässt sich der erwartete mittlere jährliche Bodenabtrag kalkulieren:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

A - langjähriger mittlerer jährlicher Bodenabtrag in t/ha

R - Regen- und Oberflächenabflussfaktor

K - Bodenerodierbarkeitsfaktor

L - Hanglängenfaktor

S - Hangneigungsfaktor

C - Bedeckungs- u. Bearbeitungsfaktor

P - Erosionsschutzfaktor

Die Faktoren, die nicht bestimmt werden können, werden auf 1 gesetzt. Dies wurde bei dem Erosionsschutzfaktor P angewendet, da die benötigten Informationen für das betrachtete Gebiet nicht zur Verfügung standen. Der P-Faktor beschreibt das Verhältnis des Bodenabtrages mit Kontourpflügen (quer zum Hang) und/oder Streifenanbau (Abfolge schmaler bebauter und unbebauter Feldstreifen) zum Bodenabtrag beim Pflügen in Hangrichtung. Ebenso wurde der Hanglängenfaktor L auf 1 gesetzt, da Zweifel bestehen über die Güte einer Hanglängenkarte, die mittels eines geografischen Informationssystem aus einem digitalen Höhenmodell abgeleitet wird. Der Bedeckungs- u. Bearbeitungsfaktor C wurde ebenfalls fest auf 1 gesetzt, da die Flächennutzung nicht berücksichtigt wurde und die Karten für theoretisch unbedeckte Böden erstellt werden.

Die verbleibenden Faktoren bestimmen sich wie folgt:

$$R = 0.141 * N - 1.48$$

(Schwertmann et al. 1990): abgeleitet aus Untersuchungen in Bayern, gültig für Mitteleuropa,

N - Sommerniederschlag [1.Mai – 31.Okt.]

$$S = 10.8 * \sin(\lambda) + 0.03 \text{ bei Hangneigung } < 9 \% (\lambda < 15.8384^\circ)$$

$$S = 16.8 * \sin(\lambda) - 0,5 \quad \text{bei Hangneigung } \geq 9 \%$$

(Renard et al. 1997),

$\lambda$  - Hangneigungswinkel in [°]

K - abgeschätzt aus der Bodenart (über BUEK 1000 (BGR 1998) zugewiesen) mittels (AG\_Boden 2005)

Nach Ermittlung des Bodenabtrags wird dieser in sieben Stufen klassifiziert – von 0 „kein Bodenabtrag“ bis 6 „sehr hoch“ – und als potenzielle Erosionsgefahr ausgegeben (Tab. 4.2).

**Tab. 4.2: Klassifizierung der Erosionsgefährdung**

Erosionsrisikoklasse	Bodenabtrag	Potenzielle Erosionsgefährdung
0	$A < 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	keine
1	$1 \leq A < 2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	sehr gering
2	$2 \leq A < 5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	gering
3	$5 \leq A < 10 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	mäßig
4	$10 \leq A < 25 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	mittel
5	$25 \leq A < 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	hoch
6	$A > 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	sehr hoch

Zu beachten bleibt die große Wirkung der hier außer Acht gelassenen Faktoren Bedeckung, Bearbeitung und Erosionsschutz, die lokal sehr stark variieren und daher die Erosionsneigung sehr stark beeinflussen. Da das Modell für landwirtschaftliche Flächen erstellt und validiert wurde, empfiehlt sich die Betrachtung des Risikos auch nur auf diesen Flächen.

#### 4.2.2. Anwendung des prozess-basierten Waldwachstumsmodells 4C zur Abschätzung der Produktivität

Zur Abschätzung der Produktivität von Waldbeständen wird das am PIK entwickelte prozess-basierte Waldwachstumsmodell 4C (Bugmann et al. 1997; Schaber et al. 1999; Lasch et al. 2005) eingesetzt. Das Modell erlaubt eine Simulation der Produktivität und des Wachstums von Wäldern unter Berücksichtigung von Standortfaktoren wie Bodeneigenschaften und den klimatischen Bedingungen. Eine genauere Beschreibung ist dem Anhang zu entnehmen.

##### 4.2.2.1. Waldproduktivität: Simulation der ÖWK-Bestände

Im Rahmen von Projekten, die am PIK bearbeitet wurden (Deutsche Waldstudie, ForestFocus-Projekt (Meiwes et al. 2007)), standen Daten zu den ÖWK-Beständen (Bestände der Ökologischen Waldzustandskontrolle) in Brandenburg zur Verfügung (Wolff 2002), siehe Kapitel 4.3.3. An den Standorten dieser Be-

stände wurden Simulationen für die festgelegten Zeiträume mit den ausgewählten Klimaszenarien durchgeführt. Die Wirkung steigender atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration auf das Wachstum wurde nicht berücksichtigt. Für die Analysen in Kapitel 4.4 wurden Mittelwerte der jährlichen Nettoprimärproduktion (NPP) in t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ausgewertet. Die NPP ist ein Indikator für die Produktivität eines Waldbestandes, sie wird durch Allokation auf den Stamm, die Blattmasse und die Wurzeln der Bäume verteilt. Eine Änderung der NPP zeigt eine gleichgerichtete Änderung des Stammzuwachses an. Aufgrund verschiedener Holzdichten der Baumarten führen ähnliche NPP-Werte für die Baumarten zu deutlich unterschiedlichen Stammholzzuwächsen.

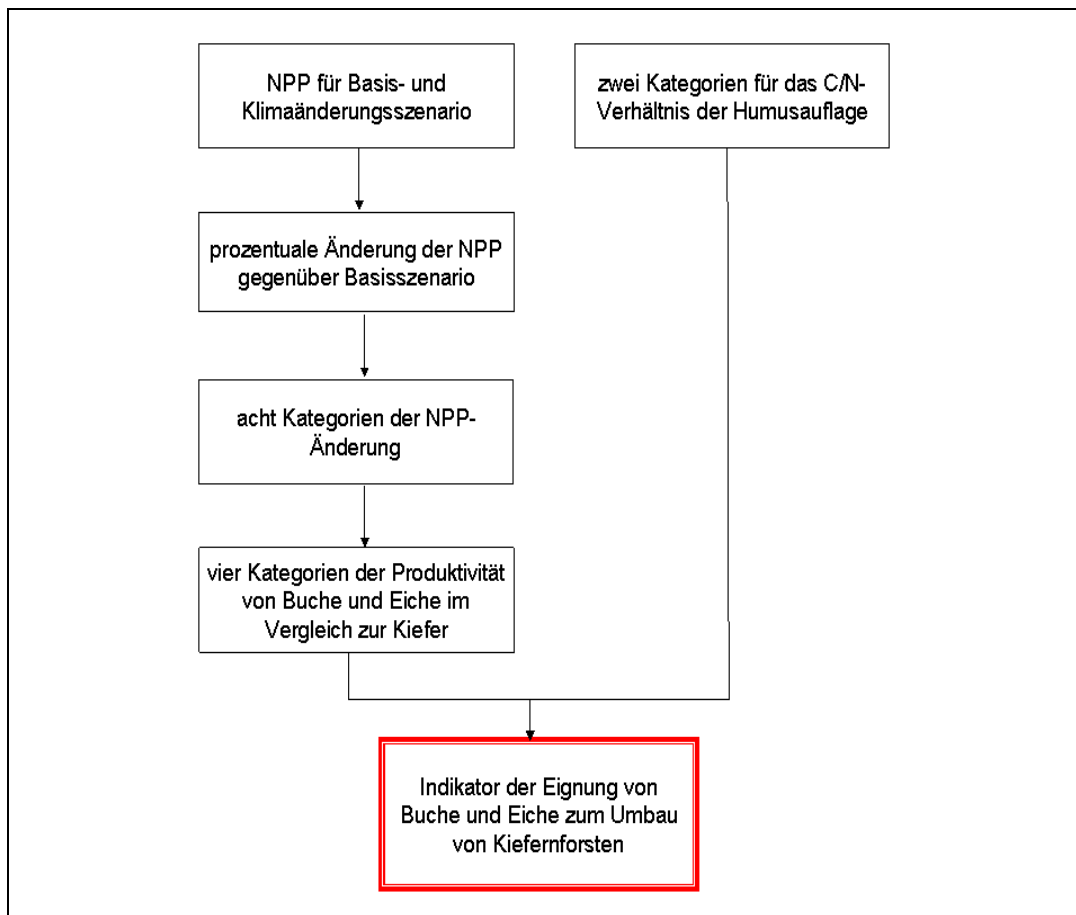
#### 4.2.2.2. Waldumbaueignung von Baumarten

Zur Abschätzung der Umbaueignung von Kiefernforsten mit Buche oder Eiche wurde ein Indikator entwickelt, der, basierend auf Simulationsergebnissen des Modells 4C, in mehreren Stufen hergeleitet wird. Dazu wird auf einen Fuzzy-Ansatz zurückgegriffen, der auf der Basis der unscharfen Mengen arbeitet und mit dem die Informationen durch verschiedene Regeln miteinander verknüpft werden (Rommelfanger 2007).

Aus den Werten der NPP, die für die Baumarten Kiefer, Buche und Eiche aus den Simulationsläufen mit den drei Klimaszenarien gewonnen wurden (siehe Kapitel 4.3.3), wird die prozentuale Änderung im Verhältnis zur NPP unter dem Basiszenario bestimmt. Diese Werte werden kategorisiert (acht Kategorien), wobei durch die Einteilung in Fuzzy-Intervalle abrupte Sprünge zwischen den Klassen durch weiche Übergänge ersetzt werden. Im nächsten Schritt wird die Produktivität von Buche und Eiche gegenüber der Kiefer abgeschätzt und in vier Kategorien eingeteilt.

Im Ergebnis erhält man eine Übersicht darüber, ob Buche und Eiche unter Klimawandel eine höhere Produktivitätssteigerung als die Kiefer erzielen können. Dieses Resultat ist standortabhängig, da bereits in die Simulation standortrelevante Daten wie Klima und Informationen über den Boden eingeflossen sind. Da aber die Nährstoffverfügbarkeit, die sich auch im C/N-Verhältnis der Humusaufgabe widerspiegelt, eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung der Anbauwürdigkeit spielt, wird die Information über das C/N-Verhältnis der Auflage (die wiederum nach obigem Muster kategorisiert wurde) mit dem ersten Indikator der Umbaueignung über ein Regelsystem verknüpft (Abb. 4.1).

Letztendlich erhält man einen Indikator, der die Eignung von Buche oder Eiche für einen Umbau von Kiefernbeständen beschreibt und sowohl die simulierte Produktivität der Baumarten als auch die Standortbedingungen berücksichtigt (s. Kapitel 4.5.2).



**Abb. 4.1: Ableitung des Waldumbauindikators**

#### 4.2.2.3. Produktivität landwirtschaftlicher Flächen mit Aspen-KUP

Zur Analyse der Produktivität landwirtschaftlicher Flächen, die für Kurzumtriebsplantagen (KUP) mit Aspen (Zitterpappel) genutzt werden, wurde ebenfalls das Waldwachstumsmodell 4C eingesetzt, das die Anpflanzung, die Ernte und den Neuaustrieb der Aspen simuliert. Diese Fragestellung wurde bereits für Deutschland untersucht (Kollas et al. 2009). Basierend auf diesen Ergebnissen wurden für die hier vorliegende Studie die betreffenden Landkreise separat ausgewertet.

### 4.3. Daten

#### 4.3.1 Zeiträume und Szenarien

Untersucht wurden für die Vergangenheit die Zeiträume 1961-1990 und 1977-2006 und für die Klimaszenarien die Zeiträume 2011-2040 und 2031-2060.

Wie auch in den anderen Expertisen wurden die STAR-Klimaszenarien mit dem Trend OK, 2K, 3K, in jeweils einer Realisierung (sogenannte mittlere Realisierung (Nr. 509)) verwendet. Eine genauere Beschreibung befindet sich in der Expertise 1 "Meteorologische Interpretation des STAR-Klimamodells für die Region Havelland-Fläming".

#### 4.3.2 Klimastationen

Die landkreisbezogenen Indikatoren wurden auf der Basis von 14 Klimastationen in den Landkreisen Havelland, Potsdam-Mittelmark, Teltow-Fläming sowie für Potsdam und Brandenburg (siehe Kapitel Klima) bestimmt.

#### 4.3.3 Standorte, Bestände

Das Modell 4C wurde an 122 ausgewählten Standorten der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK), die in den MORO-Landkreisen liegen, angewendet. Diese Flächen wurden in den achtziger Jahren aufgenommen und sind repräsentativ für die Waldbestände im Alter über 40 in Brandenburg. Jedem Standort wurde eine nahegelegene Klimastation sowie mithilfe der BÜK 1000 ein entsprechendes Bodenprofil zugeordnet. Die Initialisierung der Bestände erfolgte auf der Grundlage des Datenspeicher Waldfonds (DSW). Die 122 ÖWK-Bestände bestehen aus

112 Flächen Kiefernreinbestand

5 Kiefern-Mischbeständen

2 Buchenbeständen

2 Eichen-Mischbeständen

1 Eichenbestand

Die Entwicklung dieser Bestände wurde über 30 Jahre ohne Bewirtschaftung simuliert.

Darüber hinaus wurden zur weiteren Abschätzung der Produktivität von Standorten in dem betrachteten Gebiet an allen 122 ÖWK-Standorten Simulationen mit hypothetischen Beständen durchgeführt. Dazu wurden 35-jährige Buchen-, Eichen- und Kiefernbestände an diese Standorte gesetzt und deren Entwicklung über 30 Jahre mit einer vorgegebenen Durchforstung (Durchforstungsintervall 5 Jahre, Entnahme von 15% der Stammzahl) simuliert.

### 4.4. Analysen mit dem Impaktmodell

Die Berechnung der Indikatoren mit dem Impaktmodell (siehe Kapitel 4.2.1) erfolgte an den Klimastationen, die in den betrachteten Kreisen bzw. in den Städten Potsdam und Brandenburg liegen. Die Werte der Klimastationen, die in einen Landkreis fallen, wurden gemittelt und in den folgenden Tabellen zusammengefasst. Außerdem wurden die Indikatoren auch an allen Klimastationen Brandenburgs berechnet. Die Ergebnisse wurden nach der Methode der inversen Distanz interpoliert und als Karten dargestellt.

#### 4.4.1. Dürre-Index

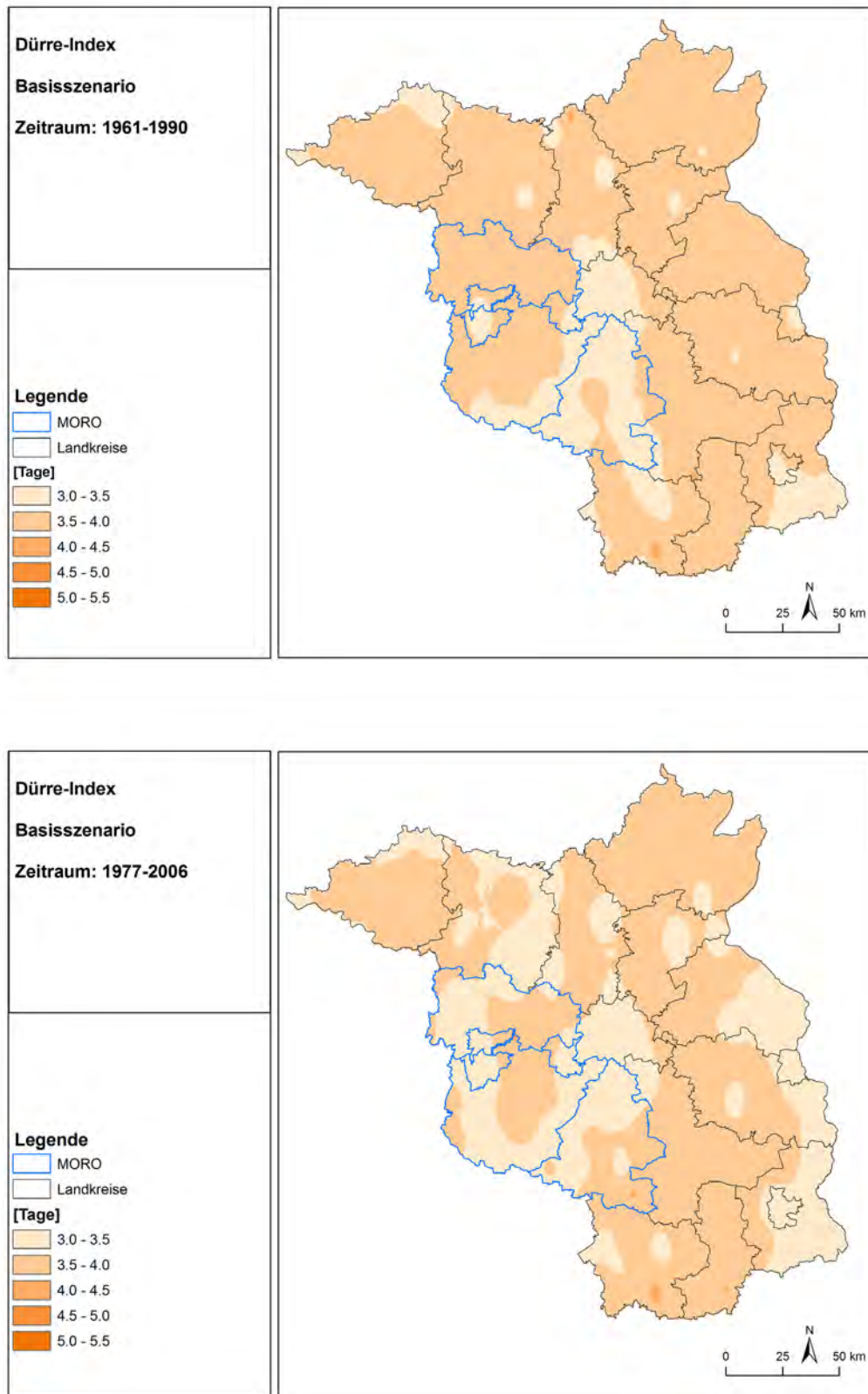
Der Kreis Potsdam-Mittelmark hat sowohl im Basisszenario als auch in den Klimaszenarien den höchsten Dürre-Index, gefolgt vom Kreis Havelland. Mit Ausnahme vom Kreis Teltow-Fläming nimmt der Dürre-Index in der zweiten Periode

des Basisszenarios leicht ab. Unter den Klimaszenarien nimmt der Index überwiegend zu und erreicht in der zweiten Periode des 3K-Szenarios die höchsten Werte (Tab. 4.3).

**Tab. 4.3: Landkreis- und Periodenmittelwerte des Dürrindizes für die 0K-, 2K- und 3K-Szenarien**

Dürre-Index	Basis		0K	2K	3K	0K	2K	3K
	1961-1990	1977-2006	2011-2040			2031-2040		
Potsdam	3.46	3.43	3.53	3.52	3.94	3.69	3.75	4.24
Brandenb.	3.38	3.22	3.32	3.29	3.57	3.42	3.57	4.00
HVL	3.65	3.45	3.62	3.61	3.87	3.76	3.87	4.29
PM	3.72	3.65	3.67	3.80	4.24	3.92	4.11	4.84
TF	3.45	3.60	3.67	3.79	3.98	3.78	3.98	4.52

Die räumliche Verteilung zeigt ebenfalls die leichte Abnahme des Dürre-Index in der zweiten Periode des Basisszenarios für weite Gebiete Brandenburgs (Abb. 4.2). Die untersuchten Kreise und Städte im Osten Brandenburgs liegen dabei größtenteils am unteren Ende der Skala.



**Abb. 4.2: Dürre-Index, gemittelt für 1961-1990 (oben), 1977-2006 (unten)**

Unter den Klimaszenarien kommt es mit steigender Temperatur in ganz Brandenburg zu einer Erhöhung des Dürre-Index, was auch schon für die zweite Periode des OK-Szenarios zutrifft. Der Dürre-Index steigt im 3K-Szenario für die Pe-

riode 2031-2060 gegenüber 1961-1990 um etwa einen halben bis ganzen Tag, dies entspricht einer Steigerung von 17 - 31 %, je nach Landkreis (Abb. 4.3 bis Abb. 4.5). Der höchste Anstieg im Dürre-Index und damit in der mittleren Länge der Trockenperioden wird für den Landkreis Teltow-Fläming berechnet.

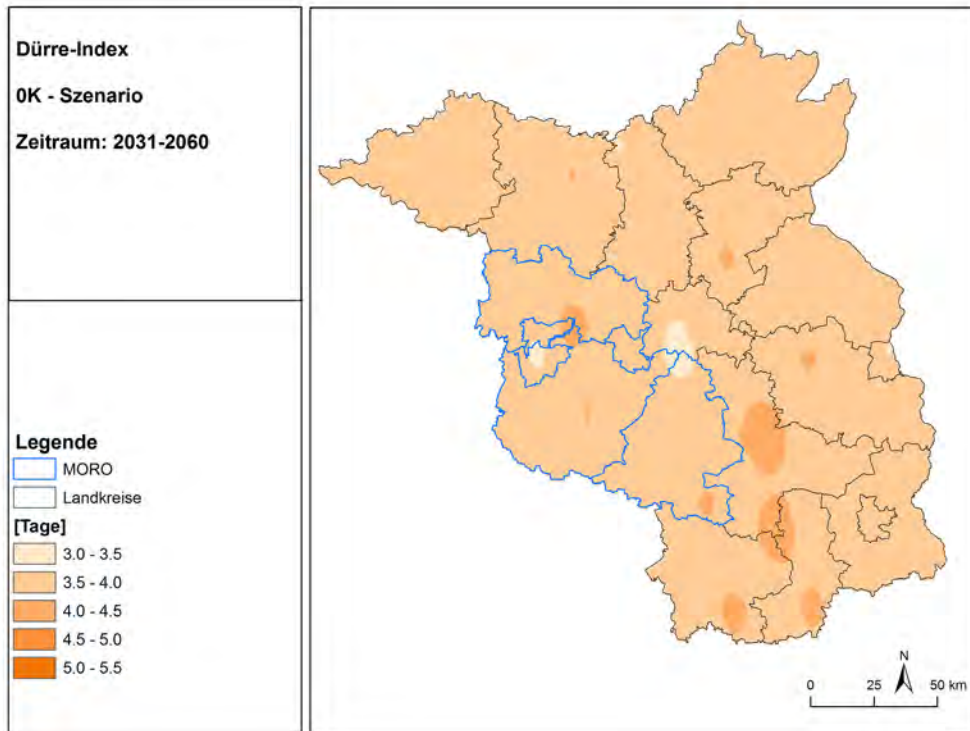
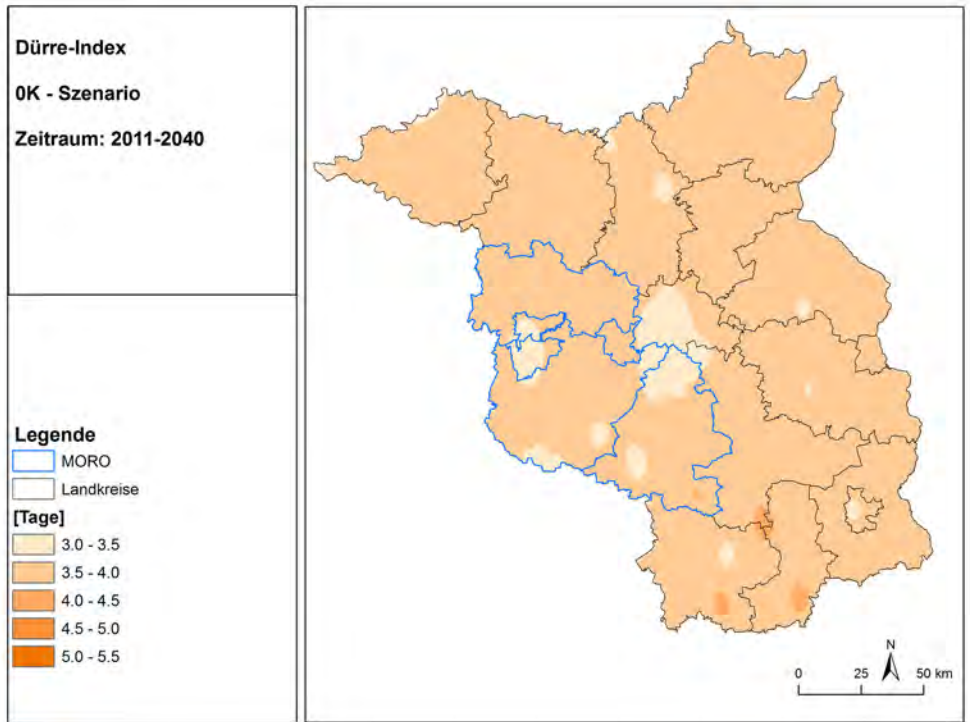


Abb. 4.3: Dürre-Index für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

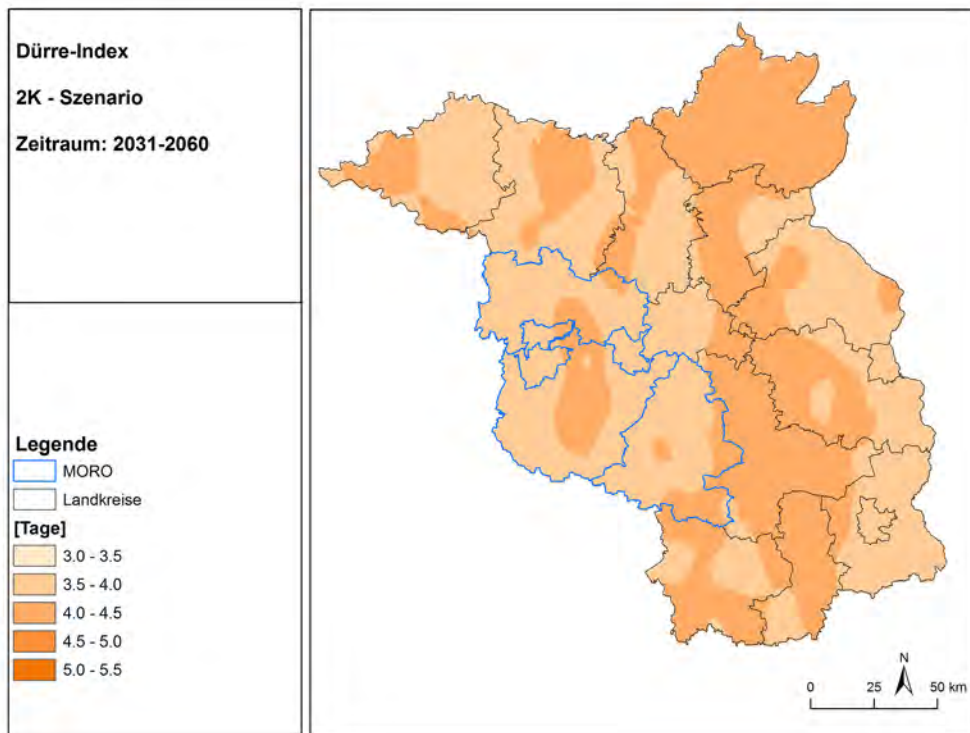
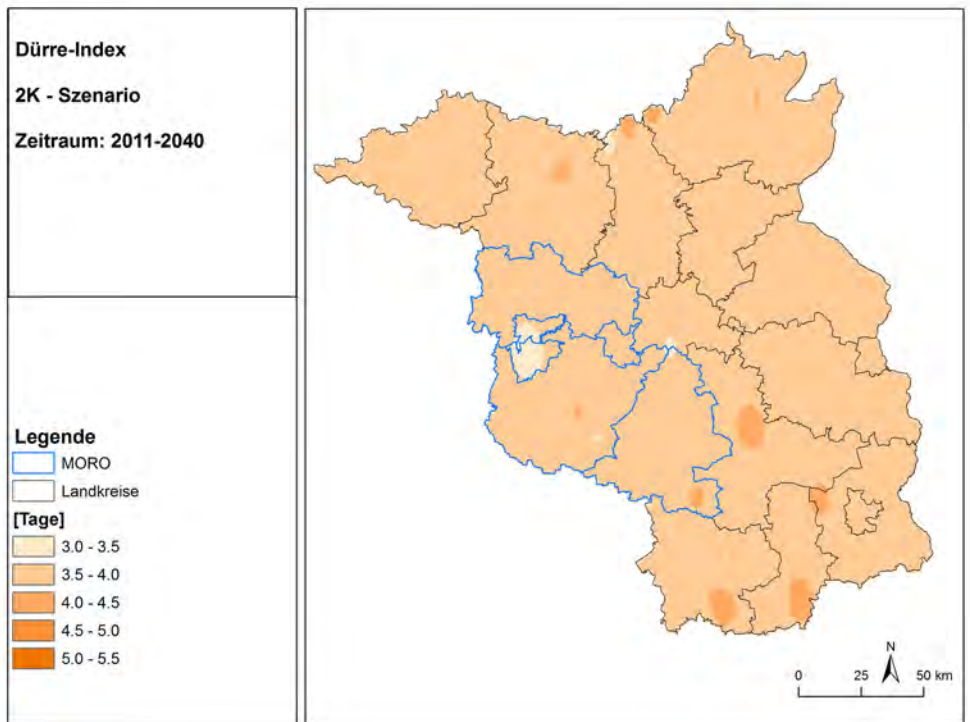


Abb. 4.4: Dürre-Index für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

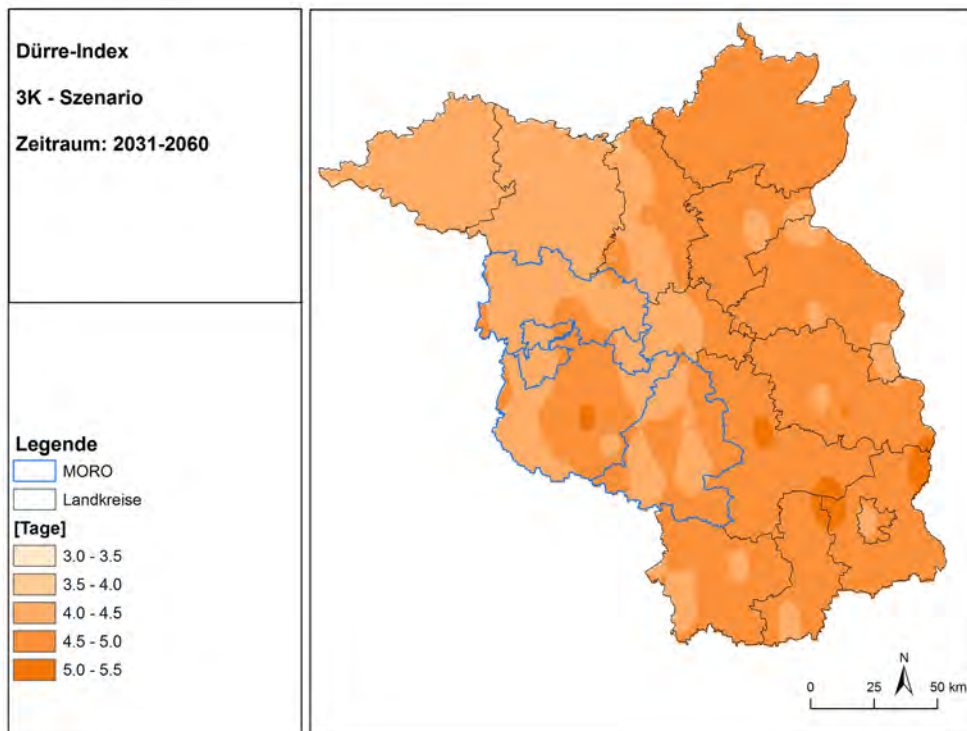
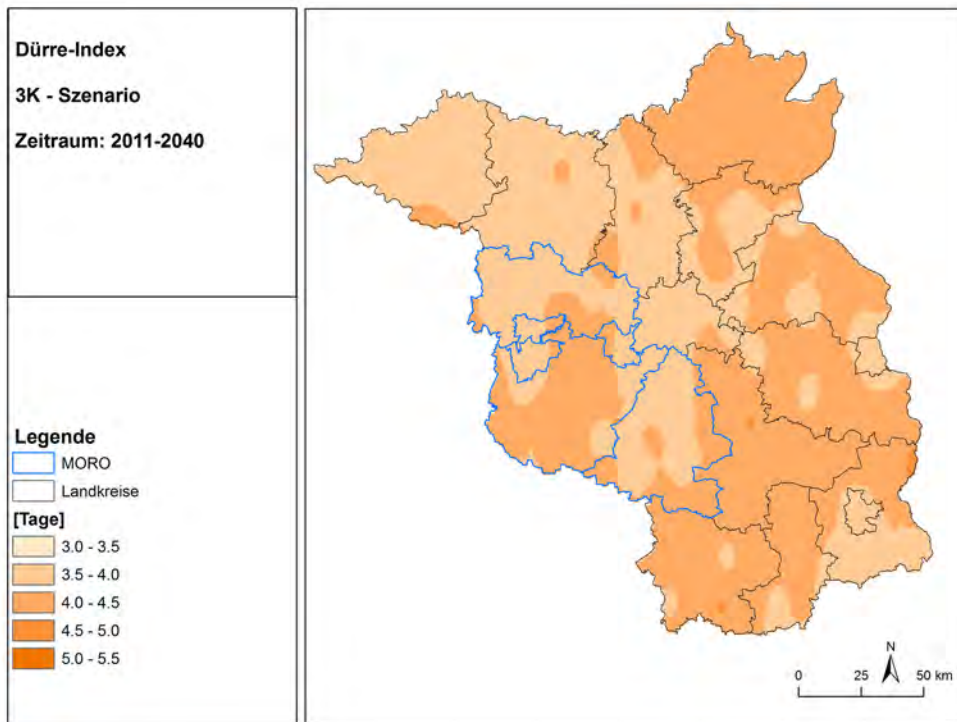


Abb. 4.5: Dürre-Index für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

#### 4.4.2. Klimatisches Waldbrandrisiko (WBI)

Die klimatische Waldbrandgefahr steigt mit zunehmender Temperatur. Bereits in der zweiten Periode des Basisszenarios ist ein leichter Anstieg des Waldbrandrisikos zu verzeichnen (Tab. 4.4). Die Stadt Brandenburg und der Kreis Potsdam-Mittelmark haben überwiegend die höchste klimatische Waldbrandgefahr. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen den Kreisen und Städten gering.

**Tab. 4.4: Landkreis- und Periodenmittelwerte des klimatischen Waldbrandindex für die OK-, 2K- und 3K-Szenarien**

WBI			OK	2K	3K	OK	2K	3K
	1961-1990	1977-2006	2011-2040			2031-2060		
Potsdam	2.12	2.16	2.15	2.27	2.43	2.28	2.50	2.67
Brandenb.	2.26	2.28	2.30	2.39	2.53	2.37	2.56	2.80
HVL	2.20	2.24	2.28	2.36	2.49	2.35	2.54	2.73
PM	2.22	2.28	2.29	2.38	2.55	2.40	2.61	2.79
TF	2.19	2.27	2.27	2.52	2.53	2.36	2.57	2.74

Die Karten für Brandenburg (Abb. 4.6 bis Abb. 4.9) zeigen, dass die Waldbrandgefahr in Teilen des Untersuchungsgebiets schneller steigt als in anderen Regionen Brandenburgs. Die generelle Zunahme der Waldbrandgefährdung insbesondere in der zweiten Periode des 2K- und 3K-Szenarios wird dabei deutlich.

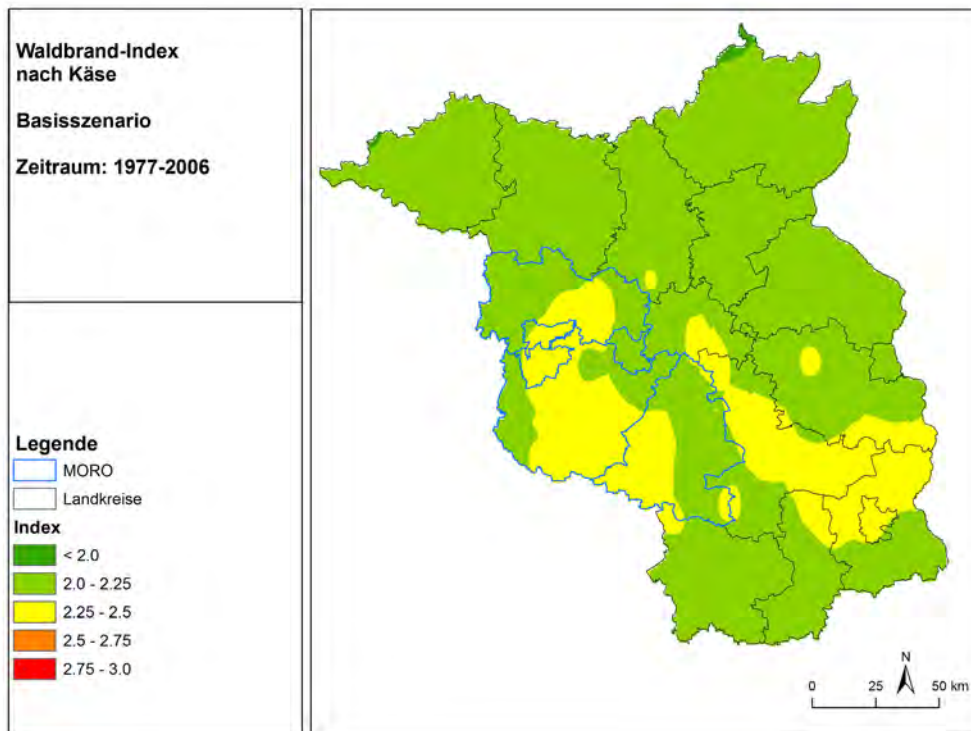
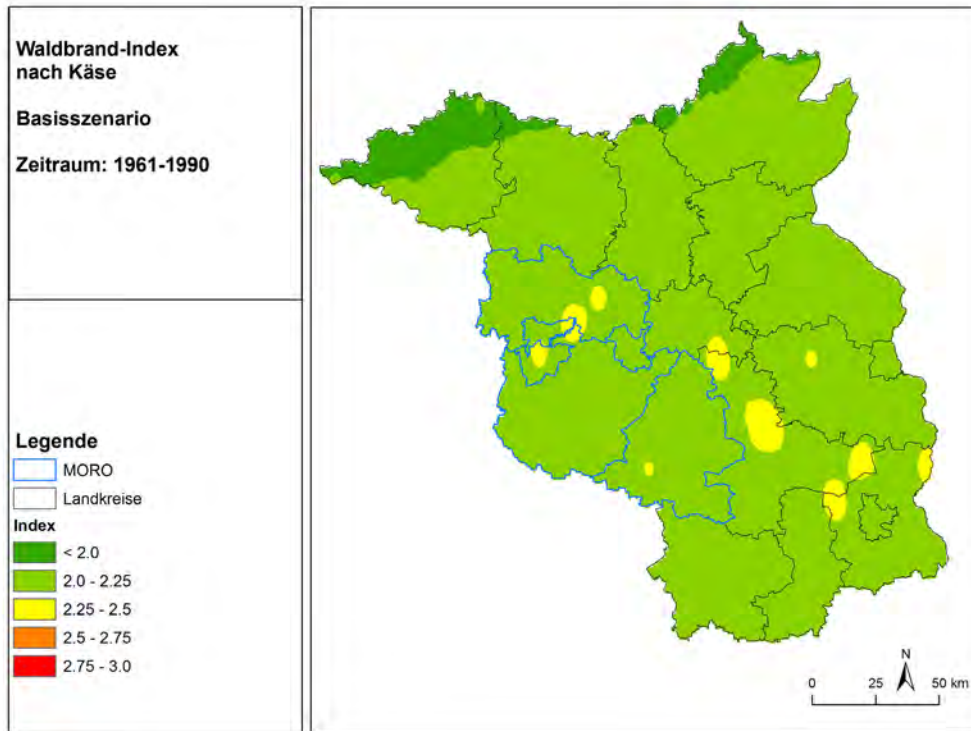


Abb. 4.6: Klimatischer Waldbrandindex, gemittelt für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten)

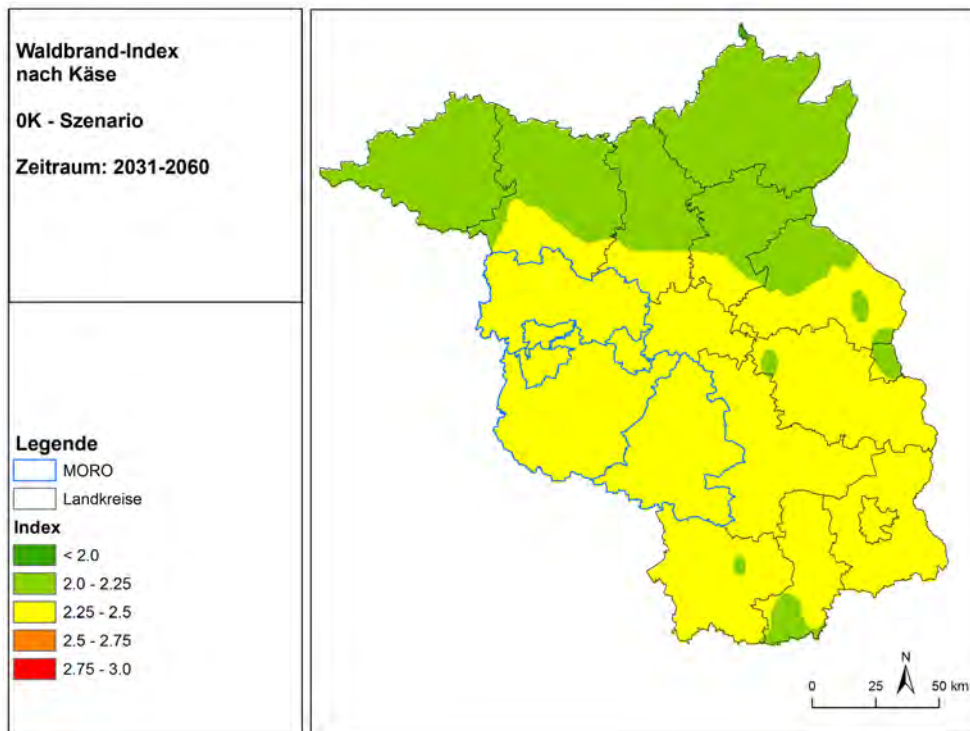
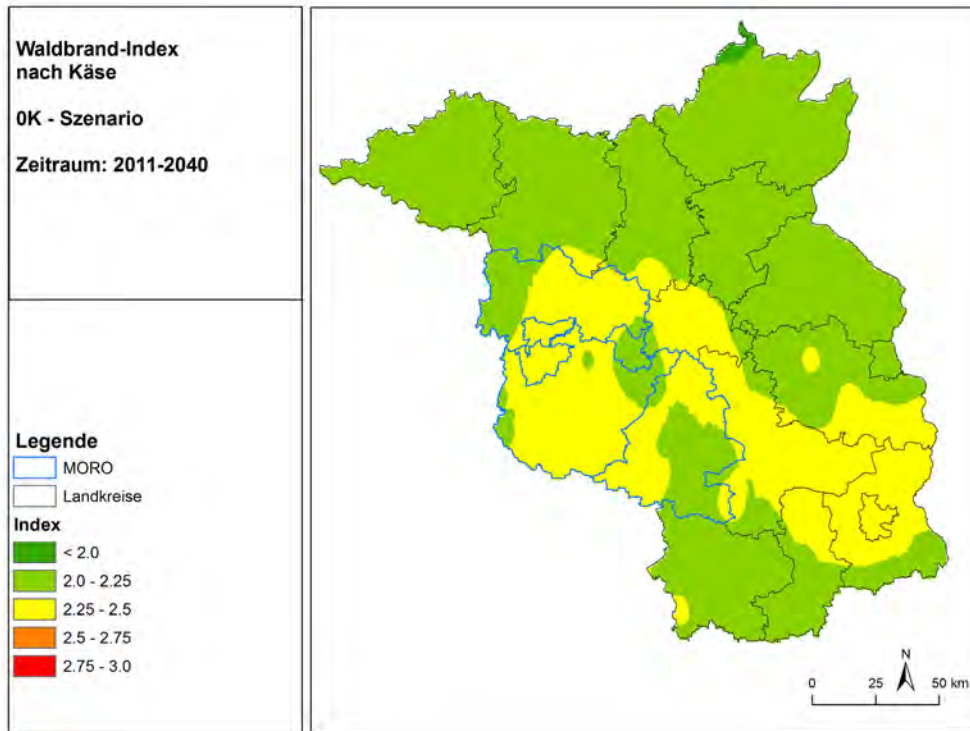


Abb. 4.7: Klimatischer Waldbrandindex für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

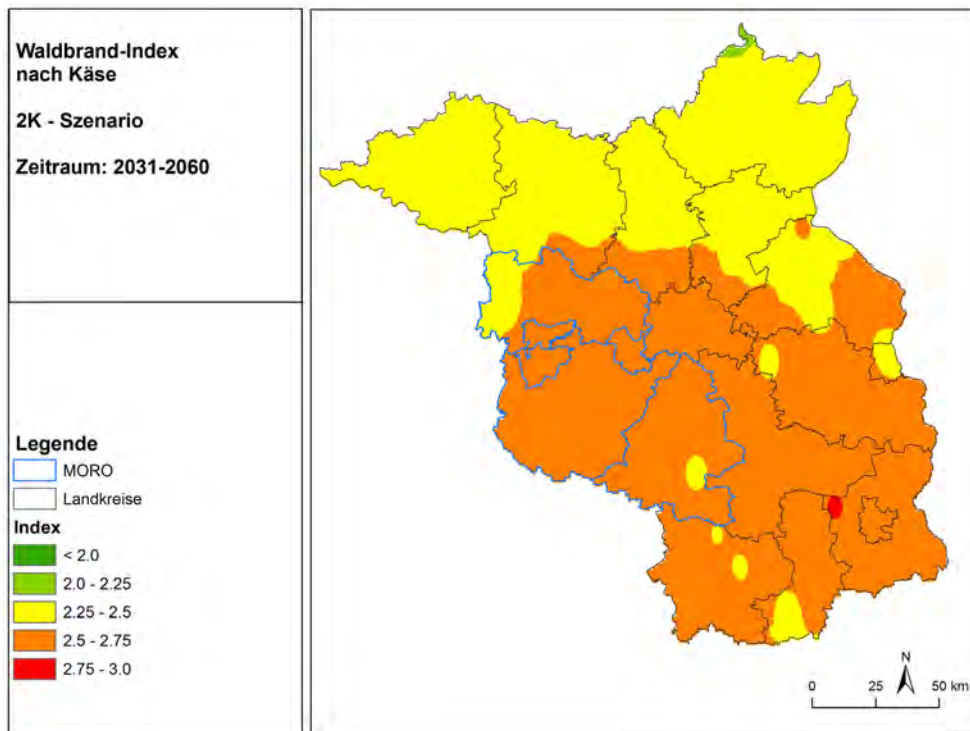
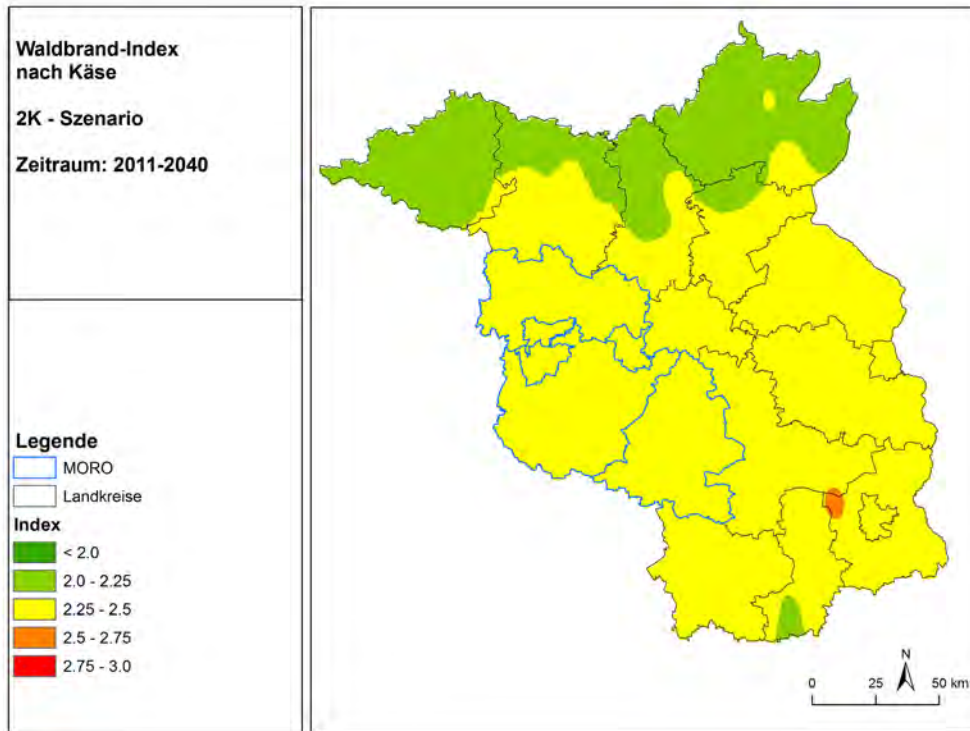
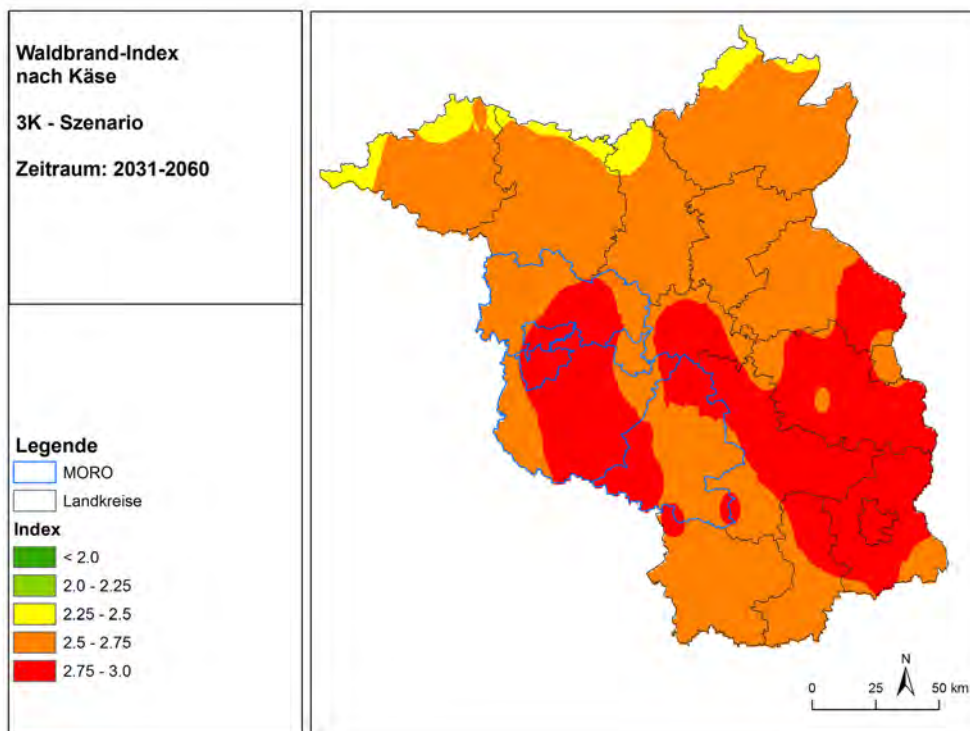
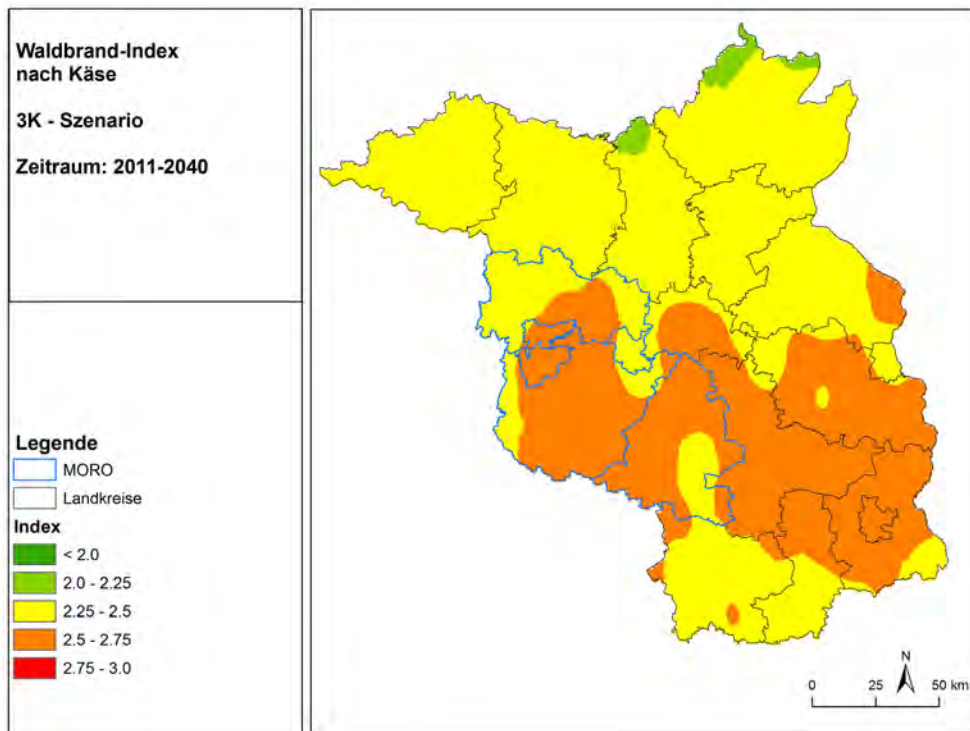


Abb. 4.8: Klimatischer Waldbrandindex für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)



**Abb. 4.9:** Klimatischer Waldbrandindex für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

Der Waldbrandindex zeigt nur eine potenzielle, klimatisch bedingte Gefährdung an, die durch ausreichende Vorsorgemaßnahmen und Waldumbau gemindert werden kann.

#### 4.4.3. Erosionsrisiko

Die Erosionsrisikoklassen weisen zwischen beiden Basiszeiträumen eine sehr große Übereinstimmung auf (Abb. 4.10). Aufgrund der vorherrschenden geringen Hangneigungen im MORO-Gebiet ist die Gefahr der Erosion, bedingt durch Wasser, größtenteils gering. Bis auf wenige kleinflächige Ausnahmen befinden sich die Flächen in den Erosionsrisikoklassen 0-3. Klimabedingte zukünftige Änderungen ergeben sich durch Änderungen im Sommerniederschlag. Dieser ist in den Klimaszenarien tendenziell rückläufig und zieht demzufolge eine Verringerung der Erosionsgefährdung nach sich (Abb. 4.11, Abb. 4.12). Das führt zum Beispiel im 3K-Szenario zur Abstufung der Erosionsrisikoklasse auf einem hohen Anteil der Fläche im MORO-Gebiet (Abb. 4.13 unten). Zu berücksichtigen ist aber, dass eine Zu- oder Abnahme von Extremereignissen wie Starkregen in den Klimaszenarien nicht abgebildet wird. Damit ist auch die Wirkung von Extremniederschlägen nach langen Trockenphasen auf die Erosionsgefährdung nicht abgebildet.

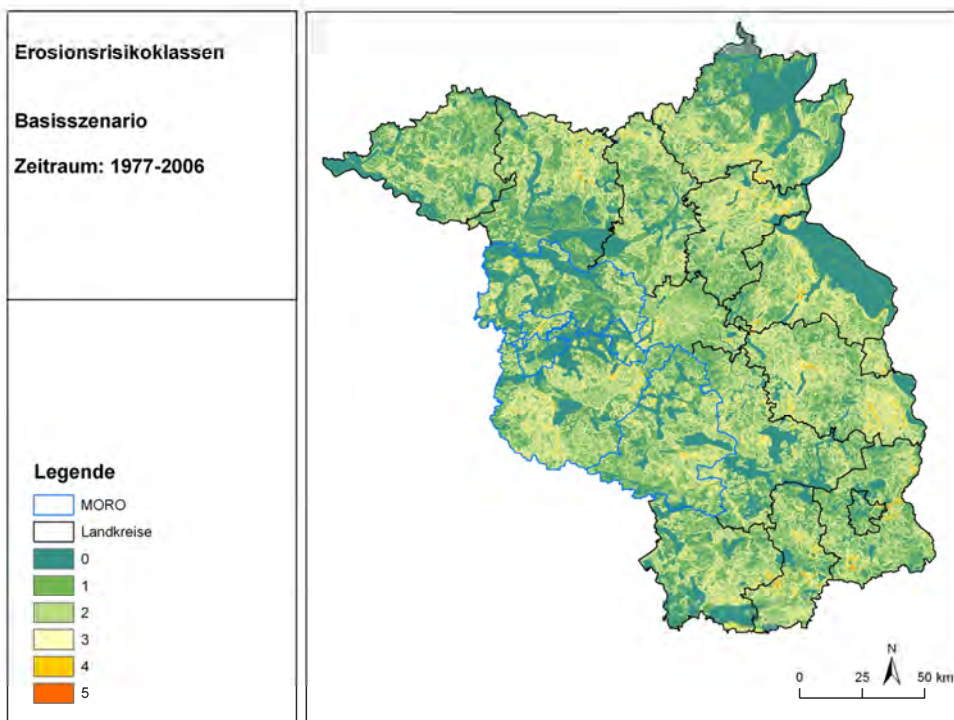
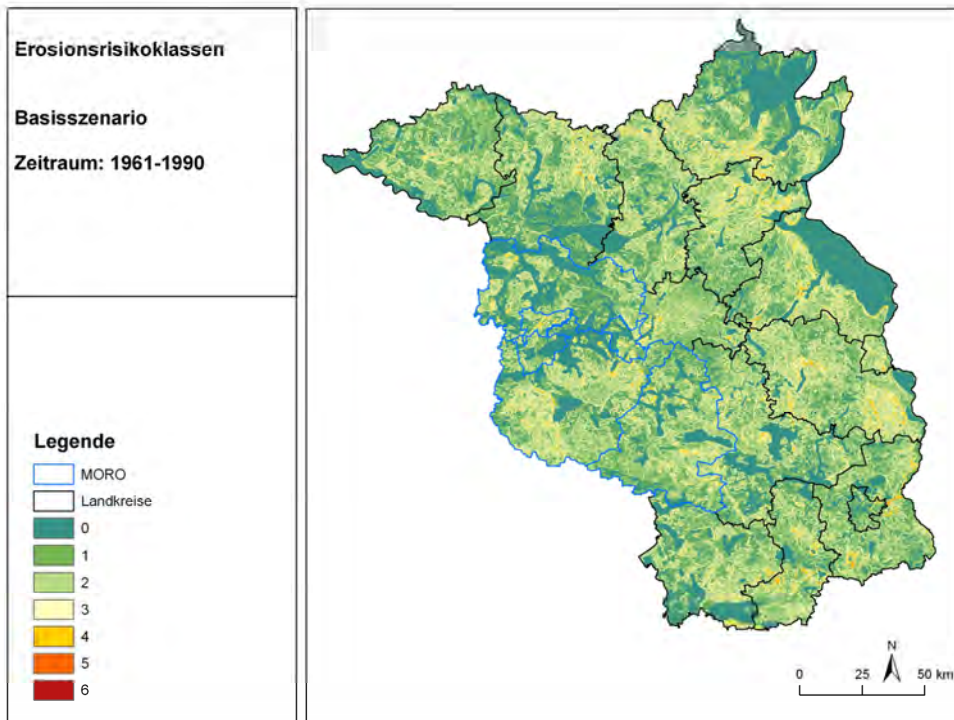


Abb. 4.10: Mittlere Erosionsrisikoklasse für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten)

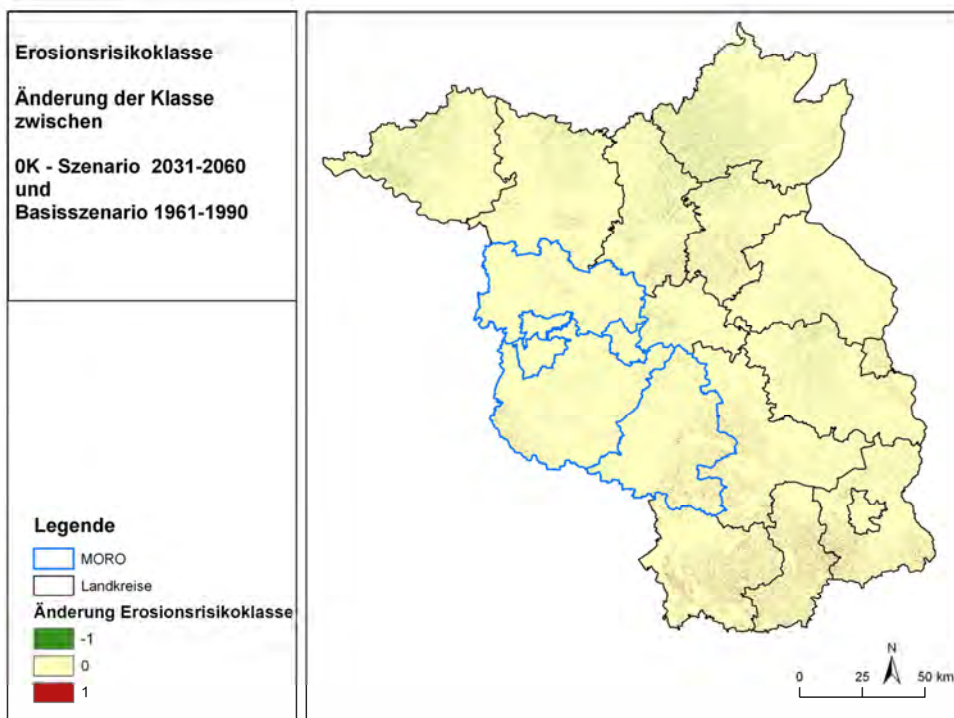
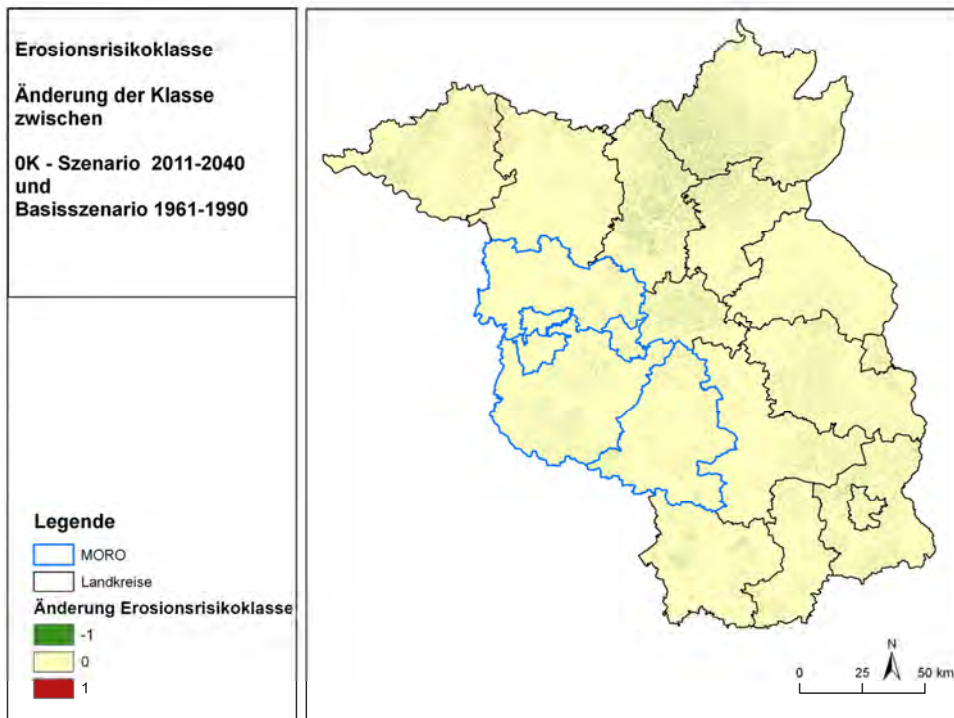


Abb. 4.11: Änderung der Erosionsrisikoklasse im Vergleich zu 1961-1990 für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

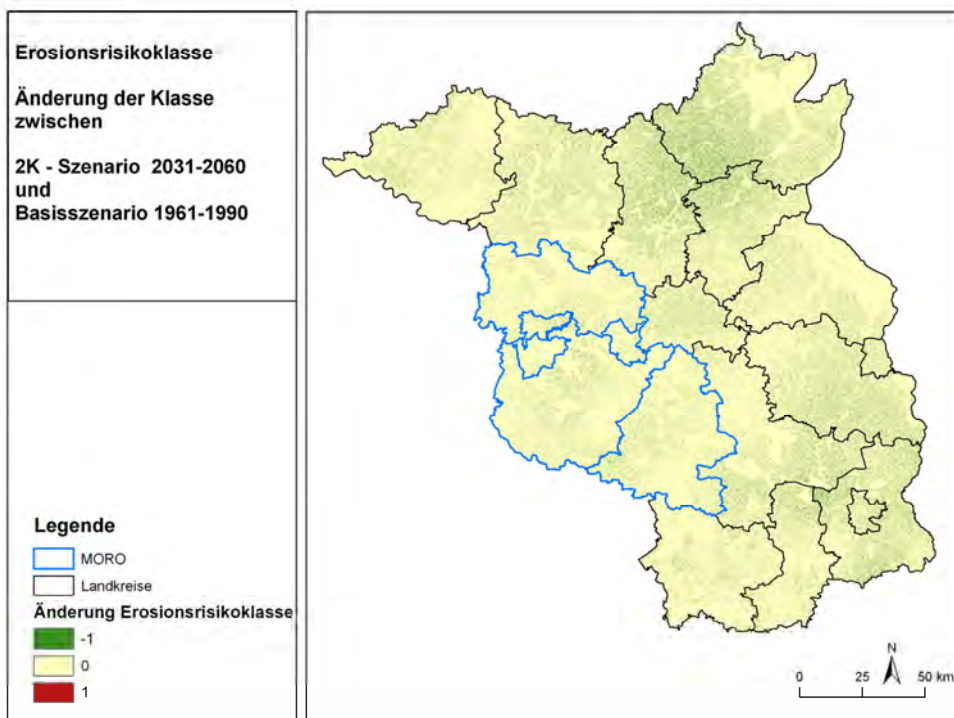
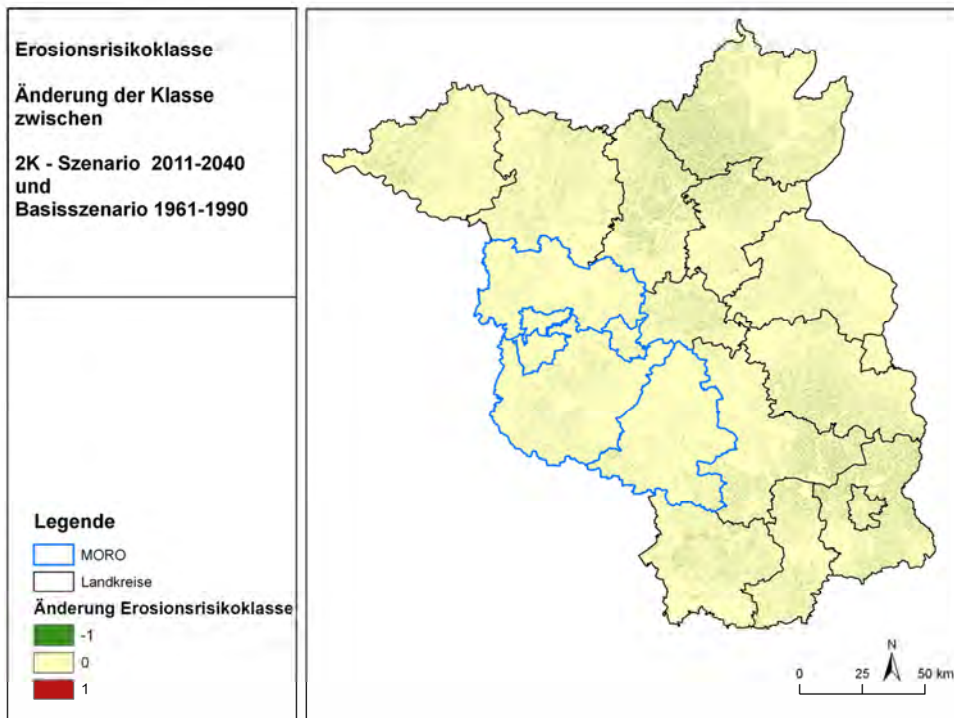


Abb. 4.12: Änderung der Erosionsrisikoklasse im Vergleich zu 1961-1990 für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

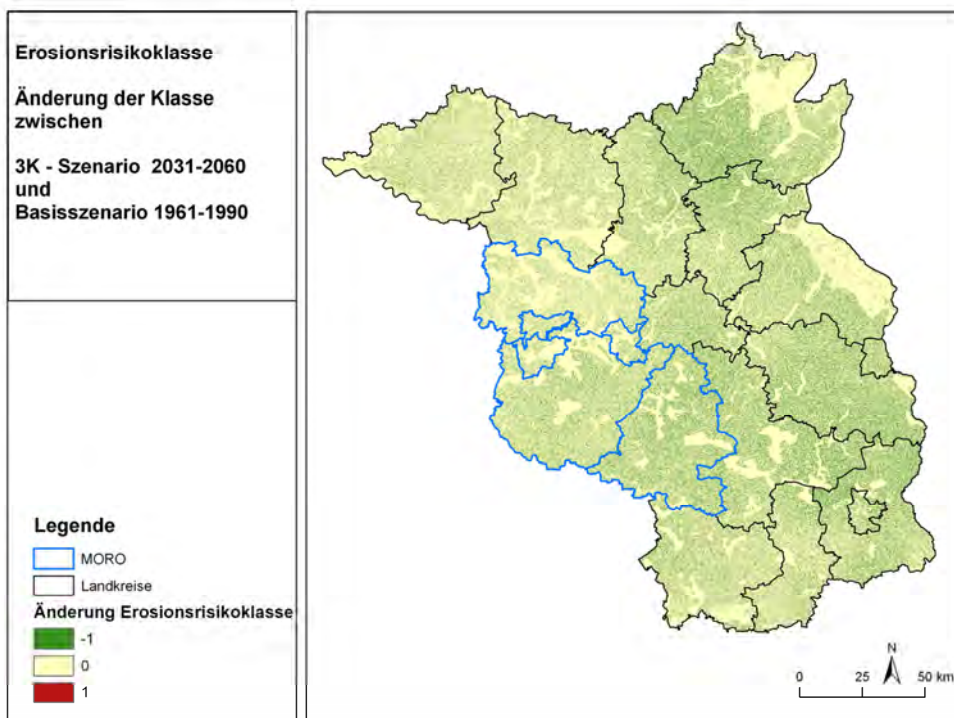
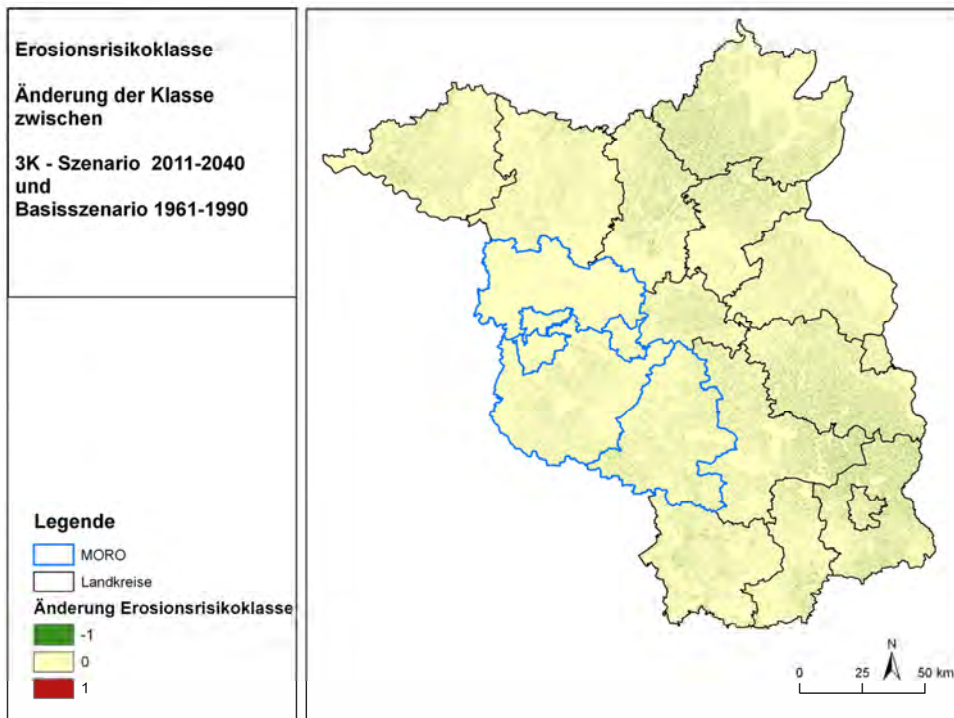


Abb. 4.13: Änderung der Erosionsrisikoklasse im Vergleich zu 1961-1990 für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

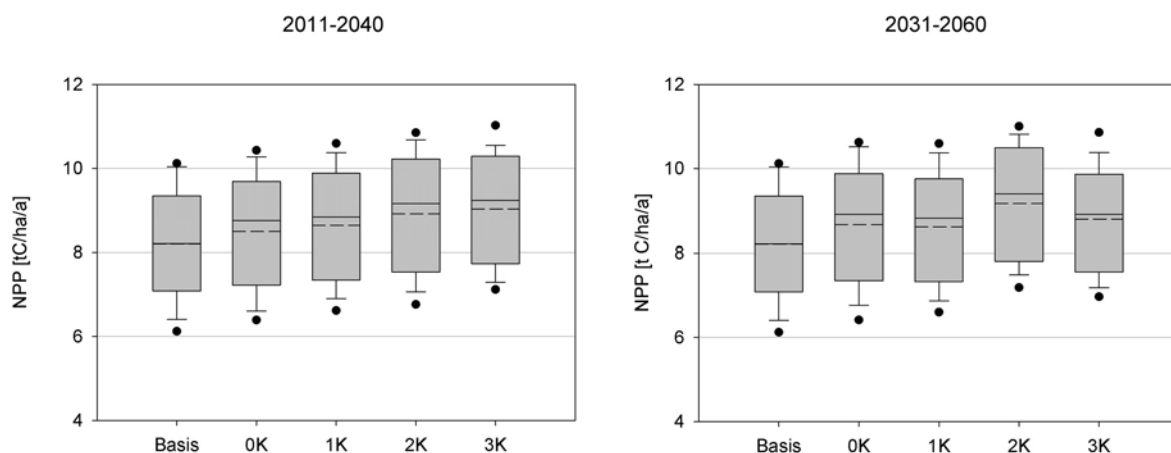
#### 4.5. 4C-Analysen für die ÖWK-Bestände

Im Folgenden werden die mit dem Modell 4C erzeugten Simulationsergebnisse für die jährliche Nettoprimärproduktion (NPP) [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>] ausgewertet. Die Ergebnisse wurden jeweils für den Simulationszeitraum gemittelt. Anschließend wurden die Ergebnisse aller ÖWK-Bestände eines forstlichen Wuchsbezirks gemittelt und in Karten dargestellt. In den Tabellen wurden Werte aller ÖWK-Flächen eines Landkreises gemittelt und zusammengefasst.

##### 4.5.1. Auswertung für alle ÖWK-Kiefernbestände

Für die 112 Kiefernreinbestände der ÖWK-Bestände erfolgte eine Mittelung über alle drei Landkreise.

Im Mittel über alle Kiefernreinbestände der ÖWK-Bestände zeigt sich, dass die Kiefer für alle Szenarien in beiden Szenarienperioden eine höhere Produktivität als im Basiszeitraum hat, in der zweiten Periode ist jedoch die Produktivität unter dem 3K-Szenario geringer als unter dem 2K-Szenario (Abb. 4.14).



**Abb. 4.14:** Mittelwert (gestrichelt), Median, 5. und 95. Perzentil (Punkte), sowie 10. und 90. Perzentil und Standardabweichung (Box) der NPP [t C ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>] für 117 Kiefernrein- und Mischbestände, dargestellt über alle drei Landkreise (PM, HVL, TF), den Basiszeitraum 1961-1990 und die beiden Szenarienzeiträume

##### 4.5.1.1 Simulation mit realen ÖWK-Beständen

Die Ergebnisse der Simulationen über 30 Jahre ohne Bewirtschaftung der Bestände für die 112 Kiefernflächen der ÖWK-Standorte werden sowohl tabellarisch für die Landkreise als auch in Kartenform dargestellt.

In den drei Landkreisen steigt unter allen Klimaszenarien und in allen Klimaszenarienperioden die NPP gegenüber den Basiszeiträumen an (Tab. 4.5, Abb. 4.15 bis Abb. 4.18). Dieser temperaturbedingte Effekt prägt sich unter dem 3K-Szenario in der zweiten Klimaszenarienperiode nicht mehr so stark aus, das

heißt, die relativen Änderungen der NPP gegenüber 1961-1990 (Tab. 4.6, grau unterlegt) sind in diesem Fall geringer als unter dem 2K-Szenario.

**Tab. 4.5: Jährliche NPP [ $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ] als dreißigjähriges Mittel über alle 112 Kiefern-Flächen, aufgeteilt nach Landkreisen**

	Basis		OK	2K	3K	OK	2K	3K
	1961-1990	1977-2006	2011-2040			2031-2060		
HVL	7.84	7.98	8.21	8.71	8.98	8.41	9.07	8.90
PM	8.11	8.25	8.42	8.78	8.92	8.55	8.99	8.59
TF	8.20	8.36	8.46	8.90	8.97	8.65	9.18	8.79

**Tab. 4.6: Relative Änderung [%] der jährlichen NPP über alle 112 Kiefern-Flächen in Relation zur NPP für 1977-2006**

	OK	2K	3K	OK	2K	3K
	2011-2040			2031-2060		
HVL	4.8	9.2	12.6	5.5	13.7	11.5
PM	3.8	6.5	8.2	3.7	9.0	4.2
TF	3.2	6.4	7.3	3.5	9.8	5.1

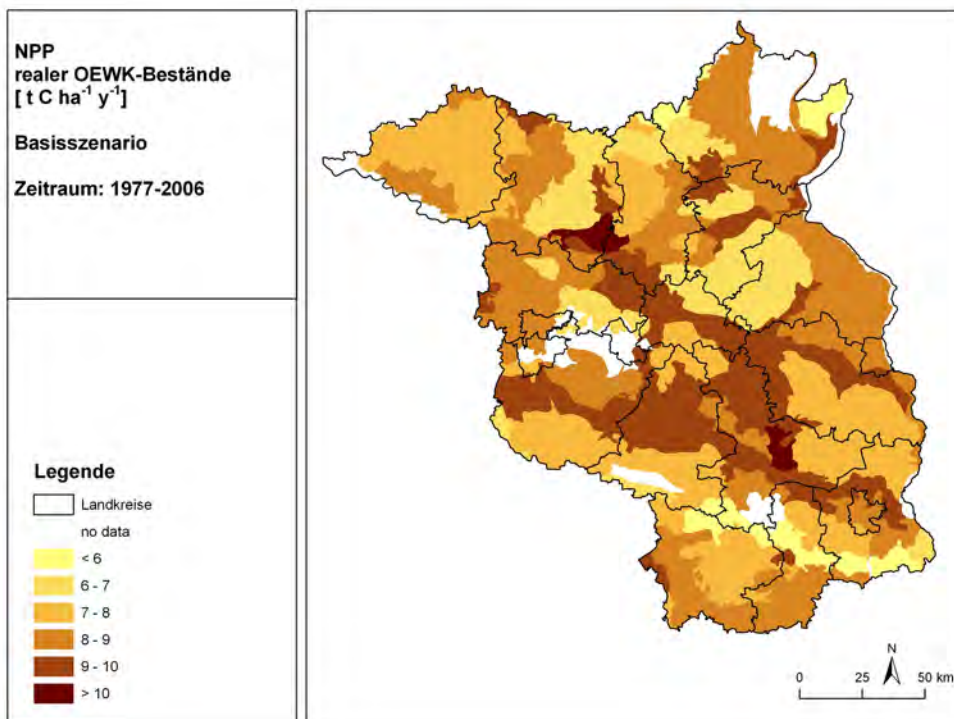
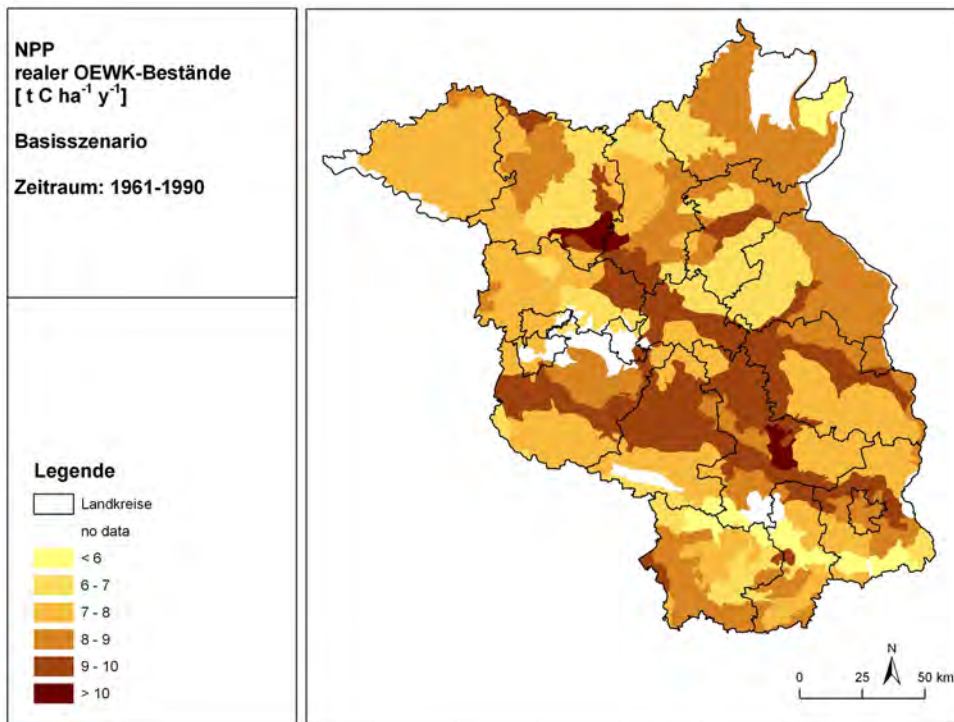


Abb. 4.15: Simulierte und für forstliche Wuchsbezirke gemittelte NPP, berechnet an den ÖWK-Flächen, für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten)

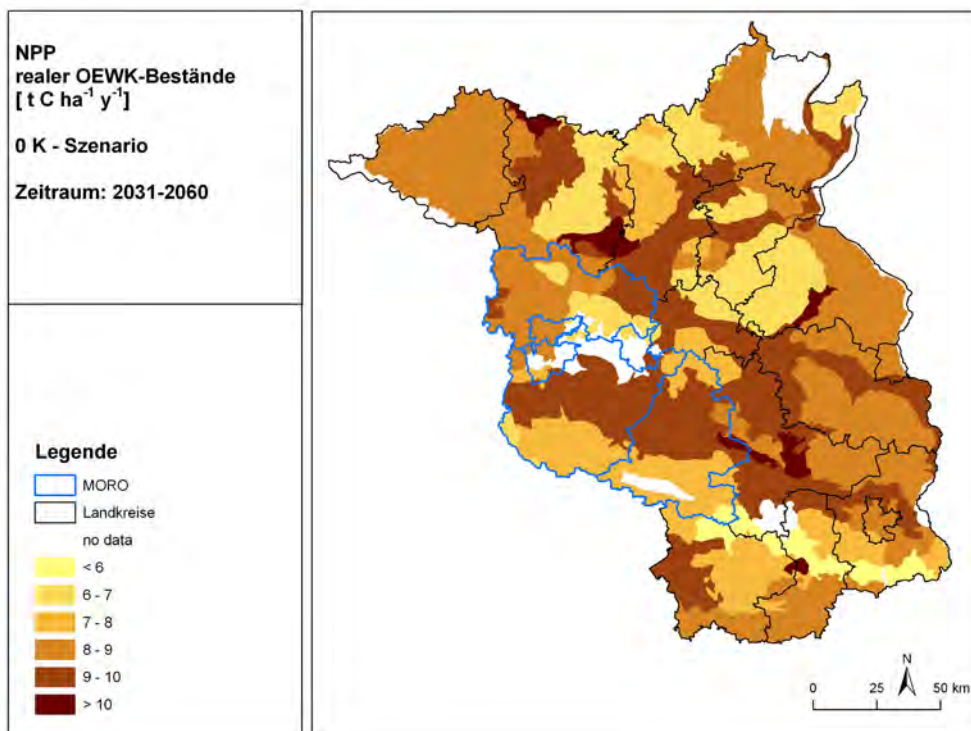
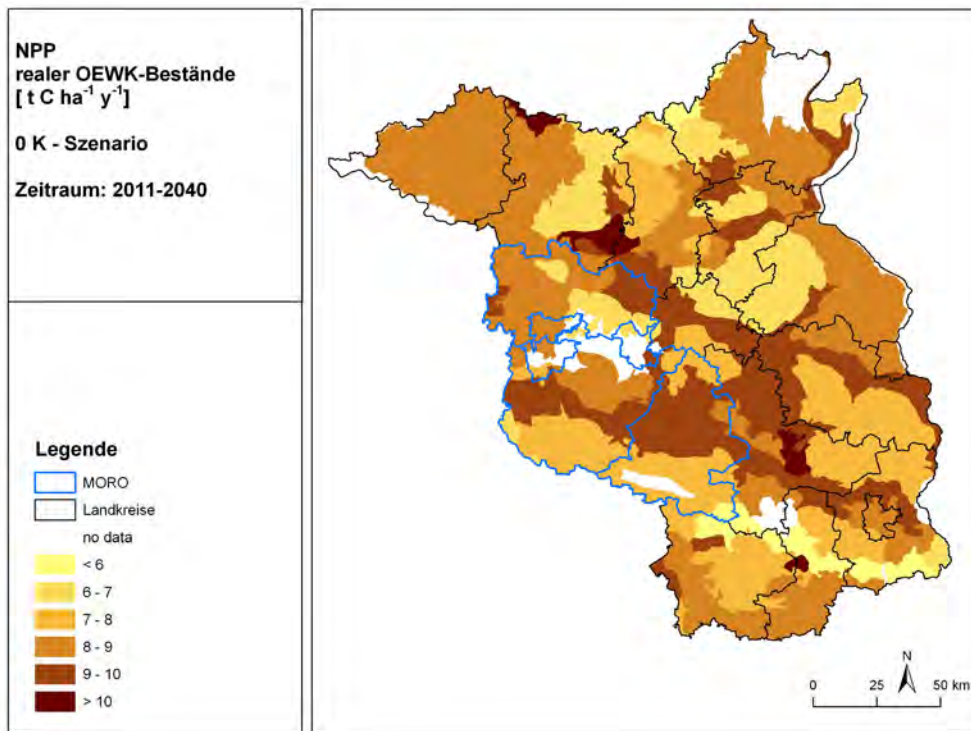


Abb. 4.16: Simulierte und für forstliche Wuchsbezirke gemittelte NPP, berechnet an den ÖWK-Flächen, für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

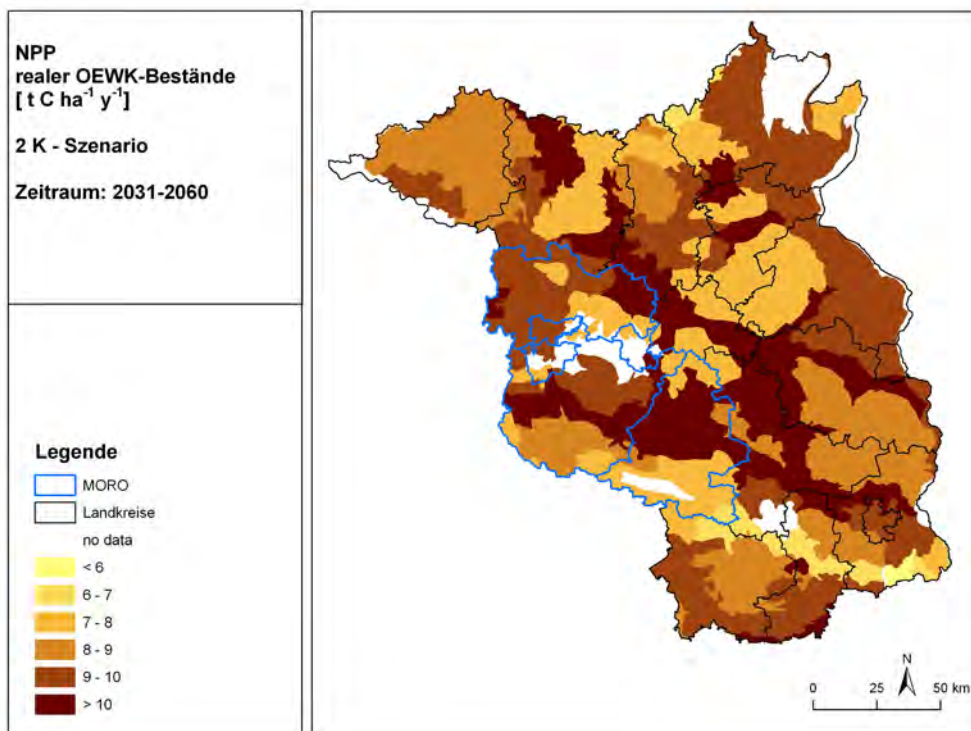
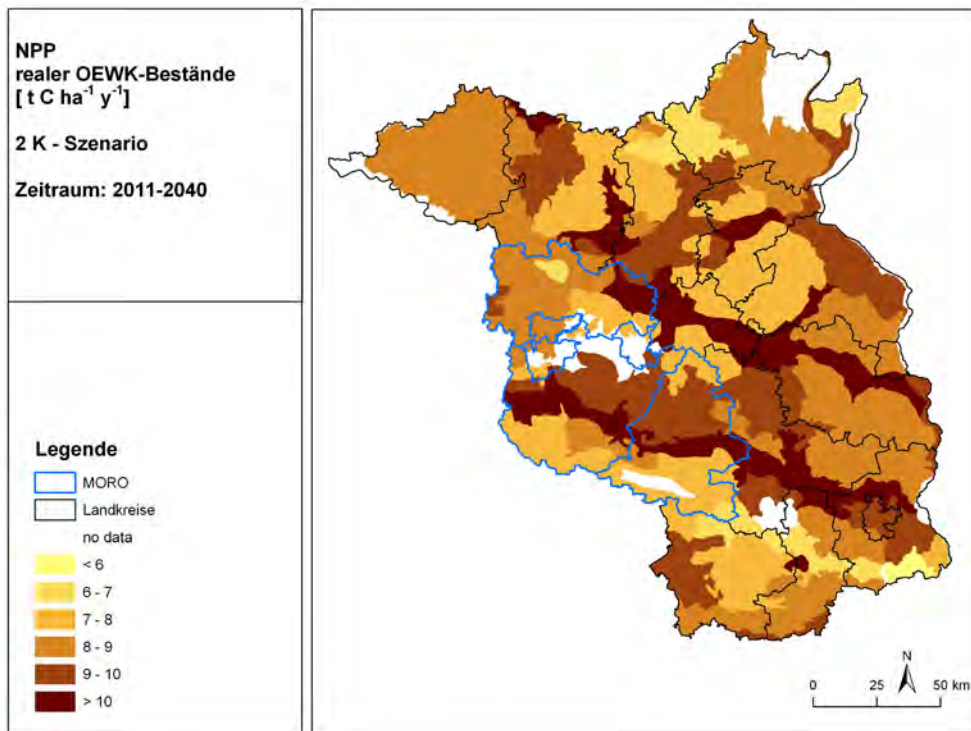
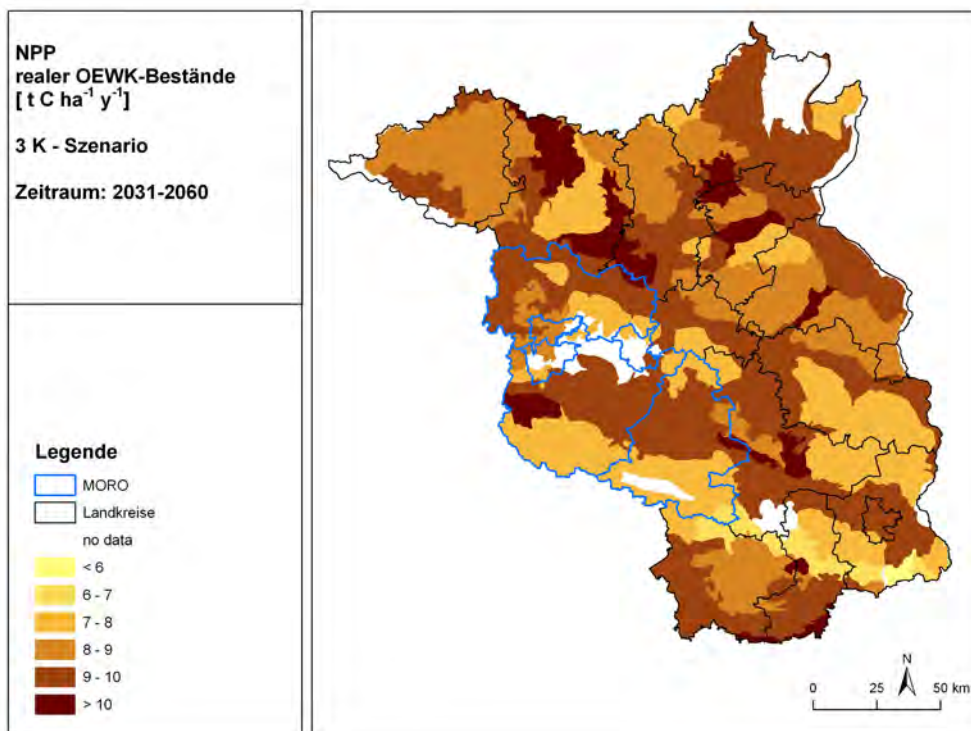
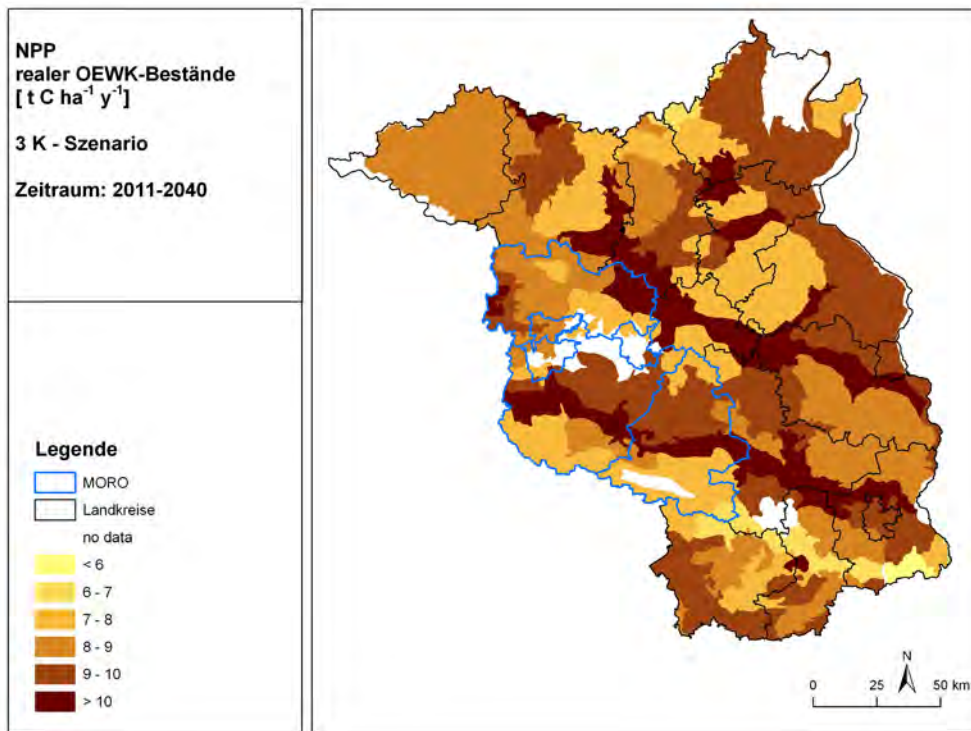


Abb. 4.17: Simulierte und für forstliche Wuchsbezirke gemittelte NPP, berechnet an den ÖWK-Flächen, für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)



**Abb. 4.18: Simulierte und für forstliche Wuchsbezirke gemittelte NPP, berechnet an den ÖWK-Flächen, für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)**

Die deutlichen Unterschiede in den Karten (Abb. 4.15 bis Abb. 4.18) für die NPP der verschiedenen Wuchsbezirke in den drei Landkreisen sind vor allem auf die standörtlichen Bedingungen der ÖWK-Standorte zurückzuführen. Die Aussagen

zu den Änderungen unter den Szenarien sind analog zu denen über die in den Tabellen sichtbaren Produktivitätsänderungen.

#### 4.5.1.2 Simulation mit hypothetischen Beständen (Kiefer, Buche, Eiche) unter Bewirtschaftung

Die hypothetischen 35-jährigen Kiefernbestände zeigen in der Simulation eine ähnliche Entwicklung der Produktivität wie die realen Kiefernbestände der ÖWK-Bestände. Die NPP ist in der zweiten Klimaszenarioperiode für das 2K-Szenario am höchsten und nimmt dann im Gegensatz zur ersten Periode für das 3K-Szenario wieder ab (Tab. 4.7).

**Tab. 4.7: Jährliche NPP [ $\text{t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ] als dreißigjähriges Mittel über 122 Kiefernbestände, aufgeteilt nach Landkreisen**

	Basis		OK	2K	3K	OK	2K	3K
	1961-1990	1977-2006	2011-2040			2031-2060		
HVL	8.06	8.32	8.46	8.95	9.23	8.68	9.32	9.31
PM	7.82	8.01	8.14	8.50	8.73	8.28	8.80	8.71
TF	8.02	8.23	8.31	8.72	8.85	8.49	9.07	8.96

Die räumlichen Darstellungen (Abb. 4.19 bis Abb. 4.22) zeigen ähnliche Muster wie die Abbildungen für die realen Kiefernbestände der ÖWK-Flächen.

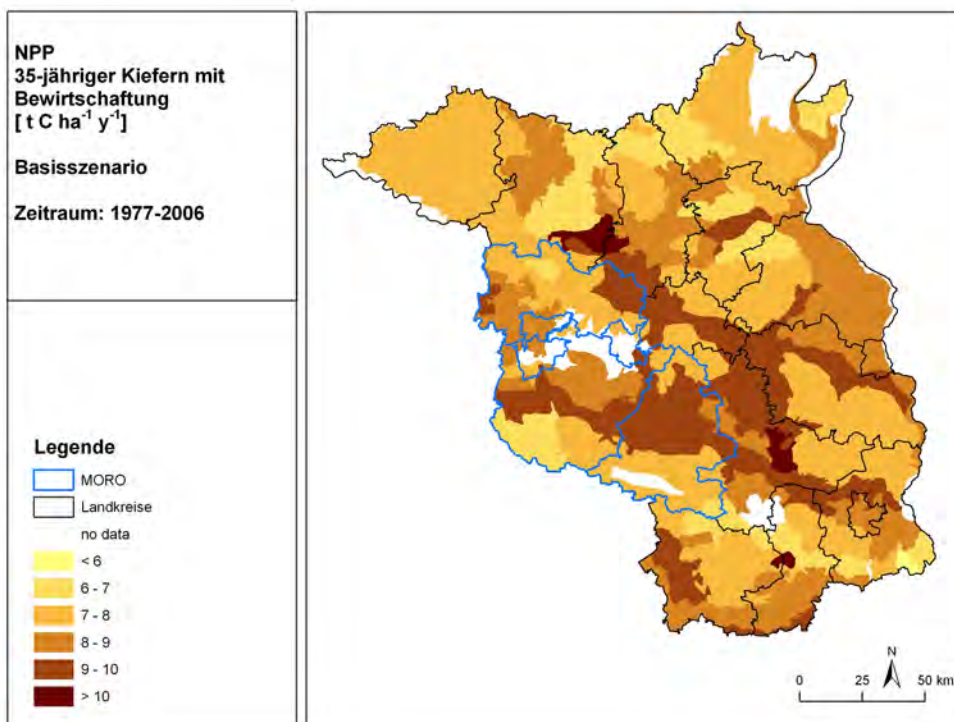
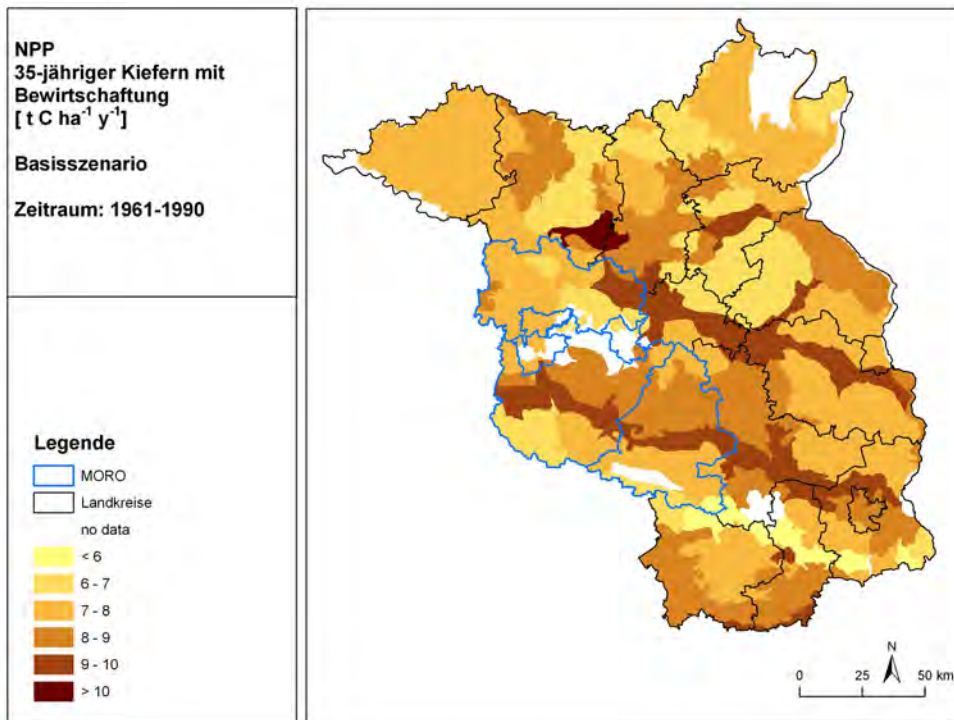


Abb. 4.19: NPP 35-jähriger Kiefernbestände, gemittelt für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten)

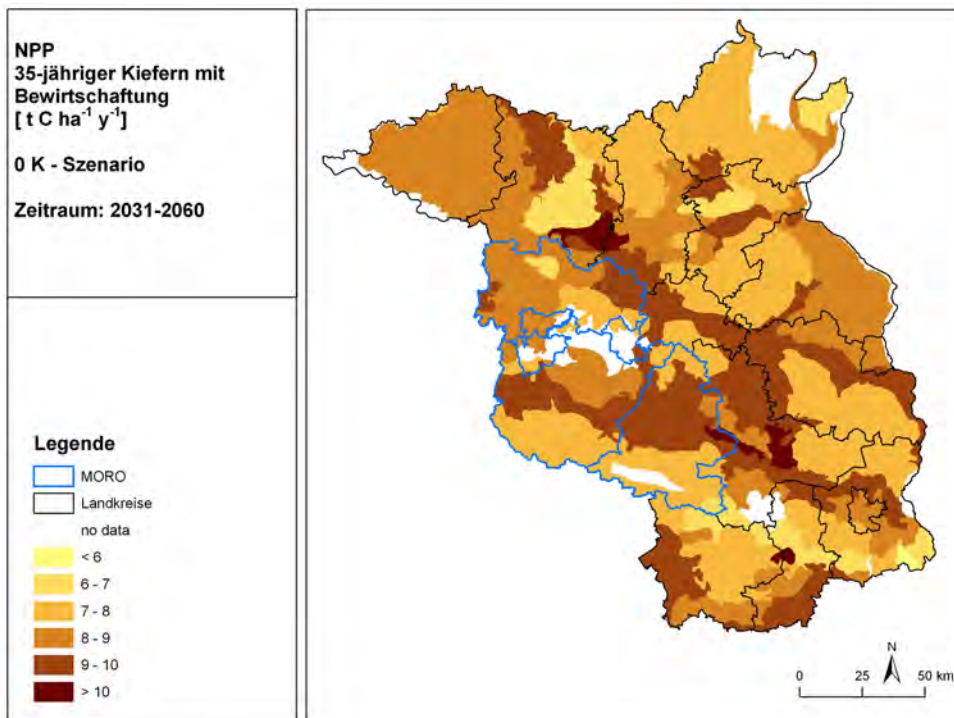
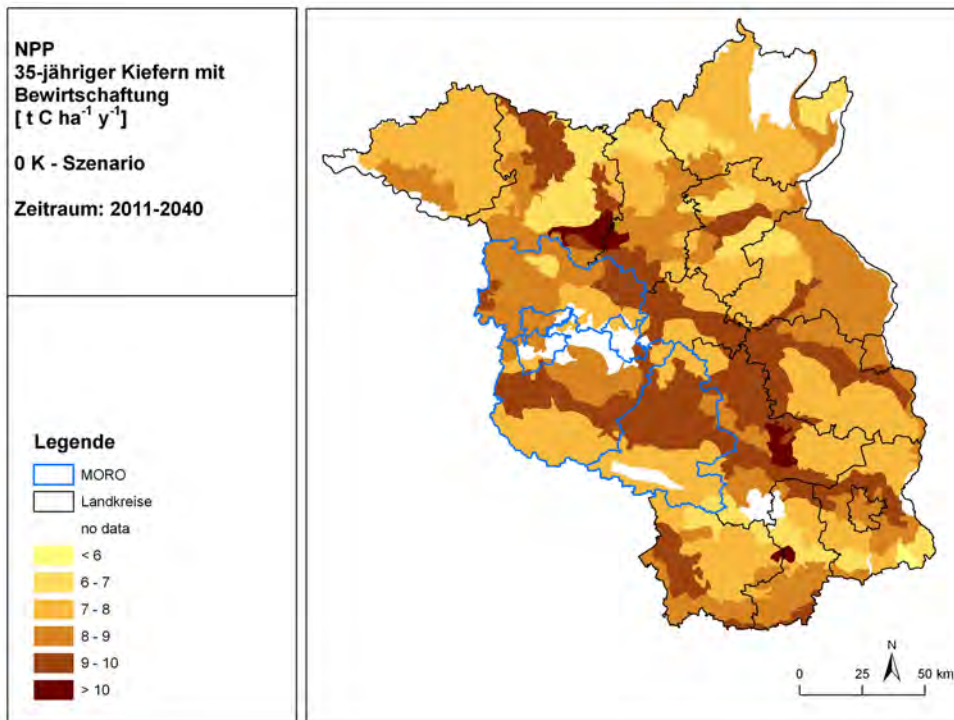


Abb. 4.20: NPP 35-jähriger Kiefernbestände, gemittelt für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

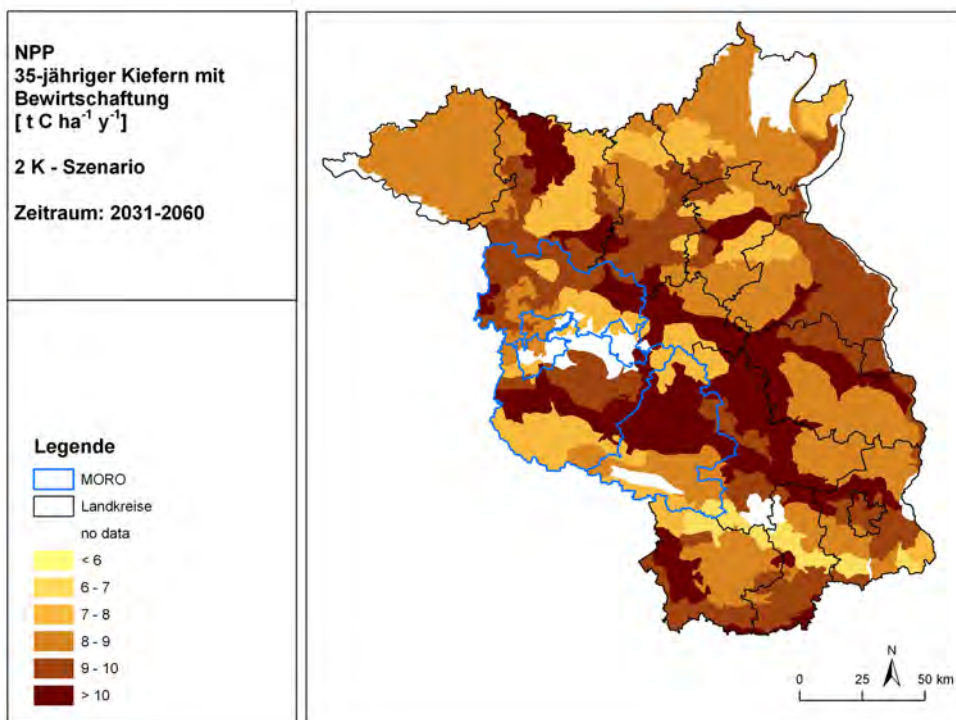
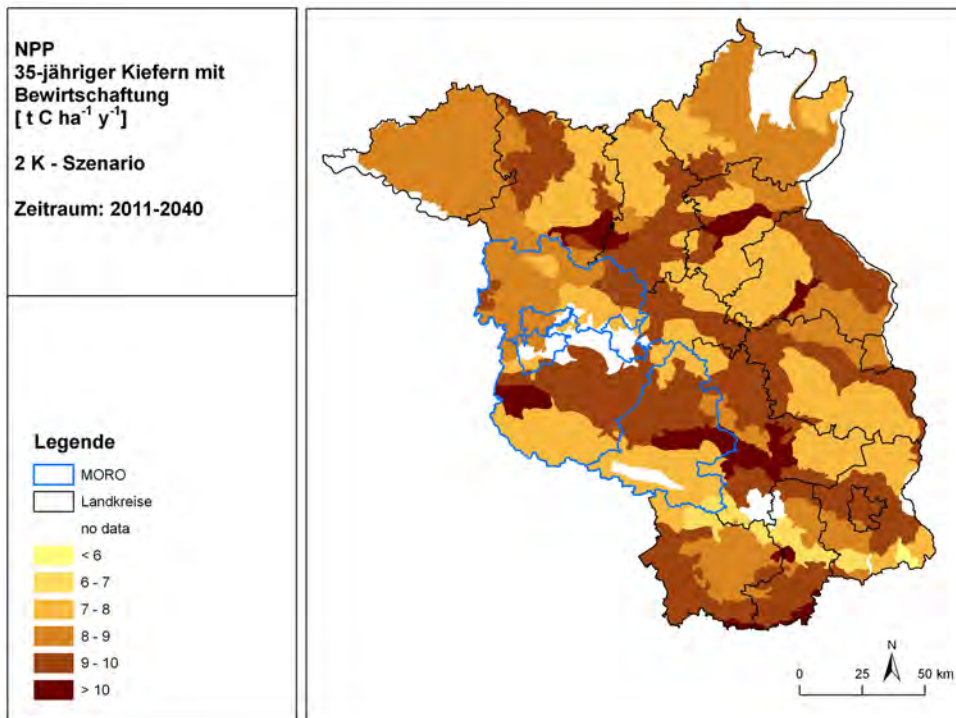


Abb. 4.21: NPP 35-jähriger Kiefernbestände, gemittelt für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

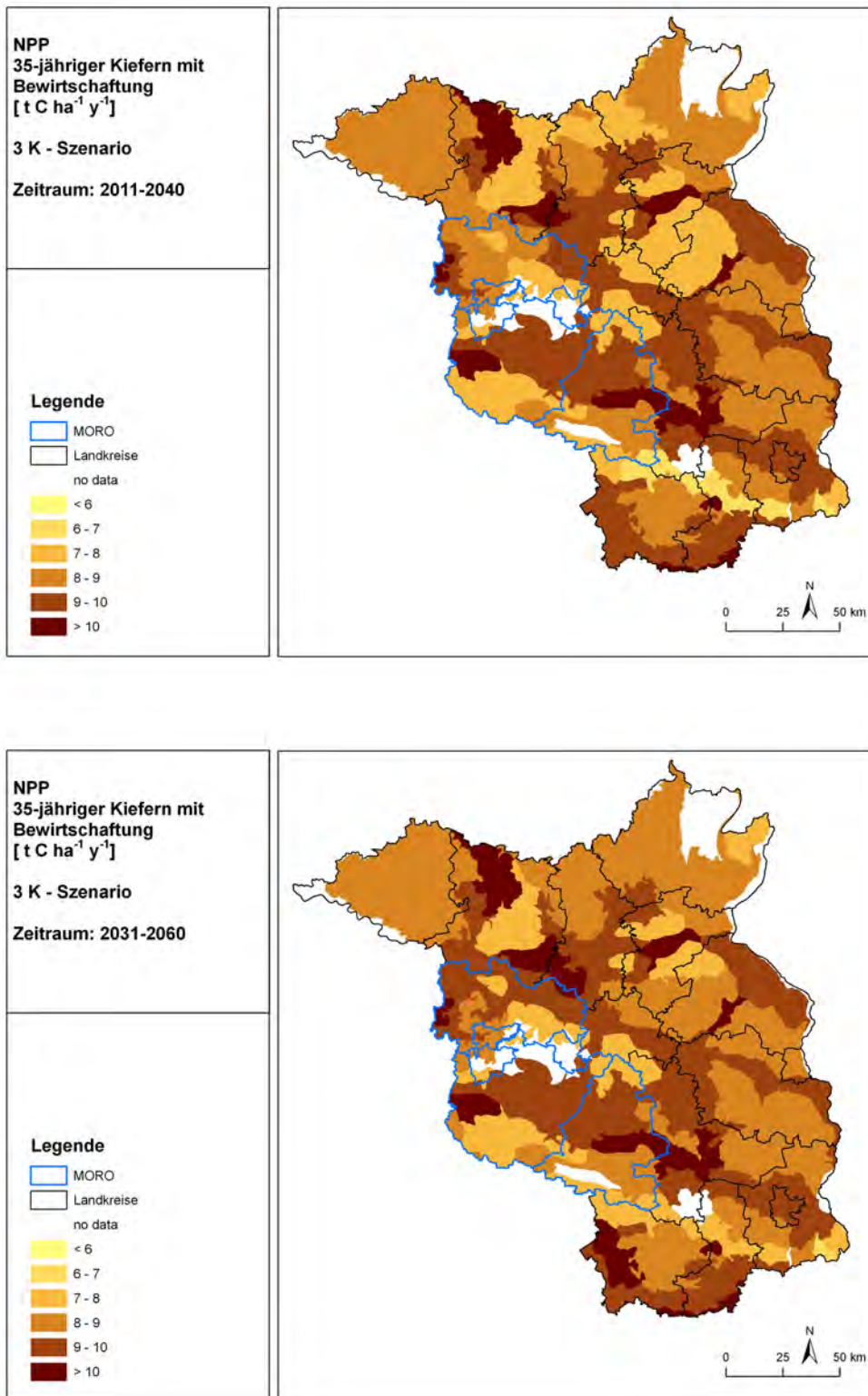


Abb. 4.22: NPP 35-jähriger Kiefernbestände, gemittelt für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

Die Produktivität der Eichenbestände ist unter den drei Szenarien und für beide Perioden höher als für beide Basiszeiträume, d.h. auch die Eiche profitiert in diesen Landkreisen von dem projizierten Temperaturanstieg (Tab. 4.8, bis Abb.

4.26). Der relative Zuwachs ist allerdings im zweiten Szenariozeitraum unter dem 3K-Szenario geringer als unter dem 2K-Szenario. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Trockenheit limitierend auf die Produktivität wirkt.

**Tab. 4.8: Jährliche NPP [ $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ] als dreißigjähriges Mittel über 122 Eichenbestände, aufgeteilt nach Landkreisen**

	Basis		OK	2K	3K	OK	2K	3K
	1961-1990	1977-2006	2011-2040			2031-2060		
HVL	7.40	7.80	7.98	8.46	8.86	8.21	8.83	8.85
PM	7.46	7.78	7.99	8.22	8.64	8.06	8.53	8.37
TF	7.66	7.96	8.15	8.43	8.62	8.24	8.69	8.47

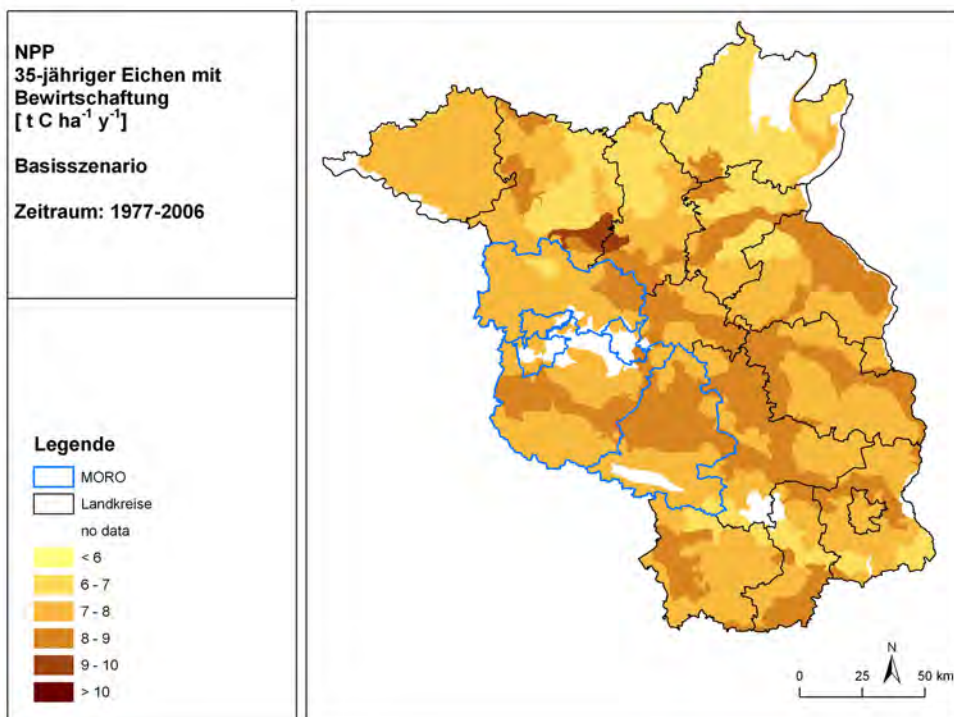
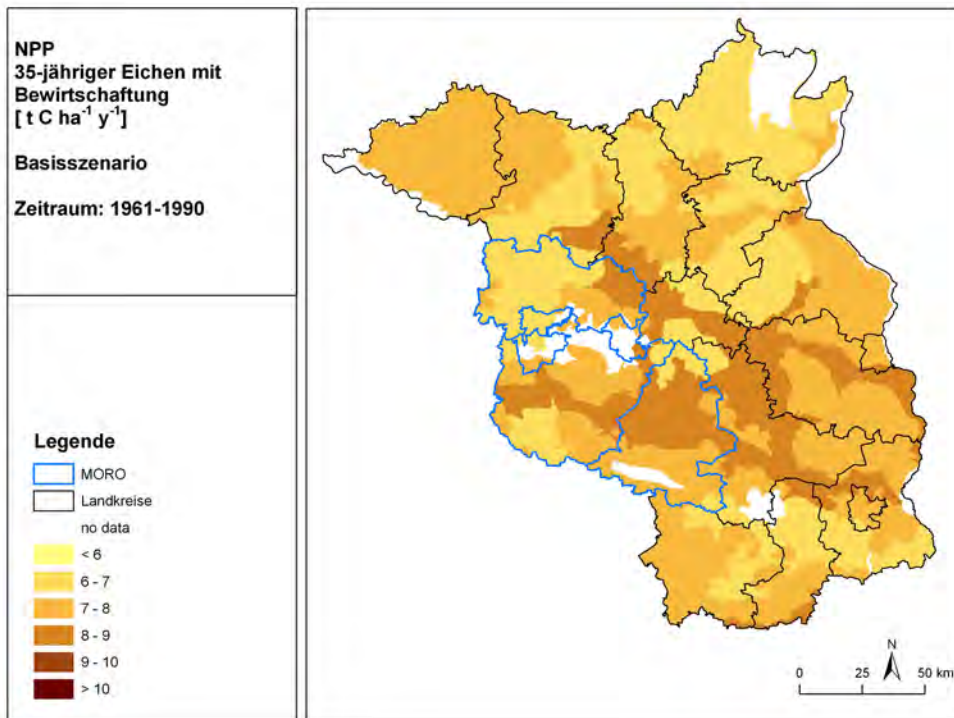


Abb. 4.23: NPP 35-jähriger Eichenbestände gemittelt für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten)

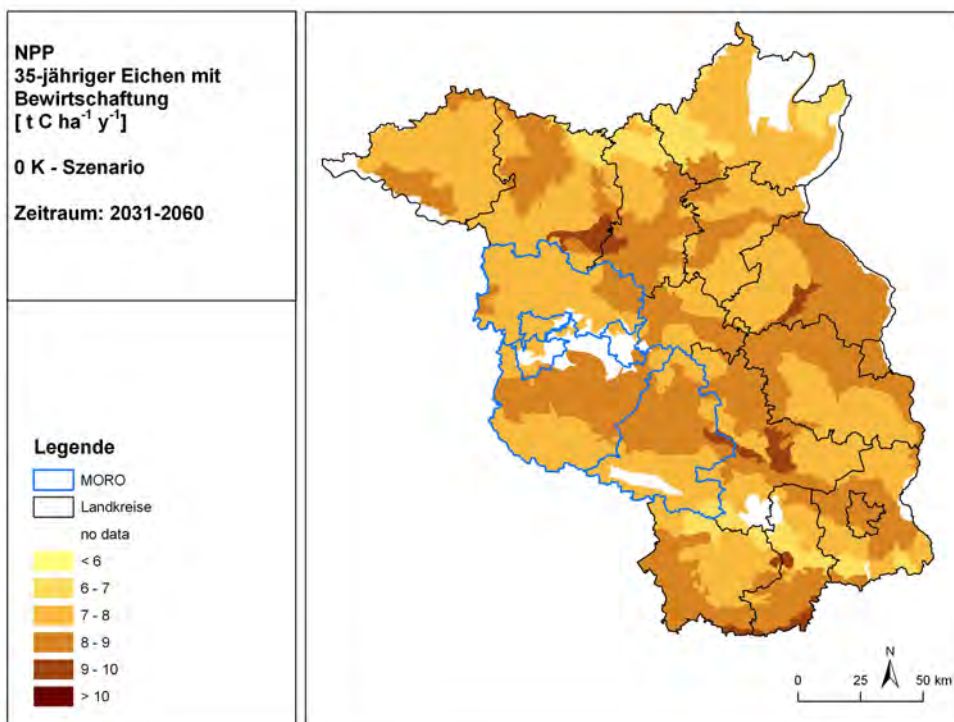
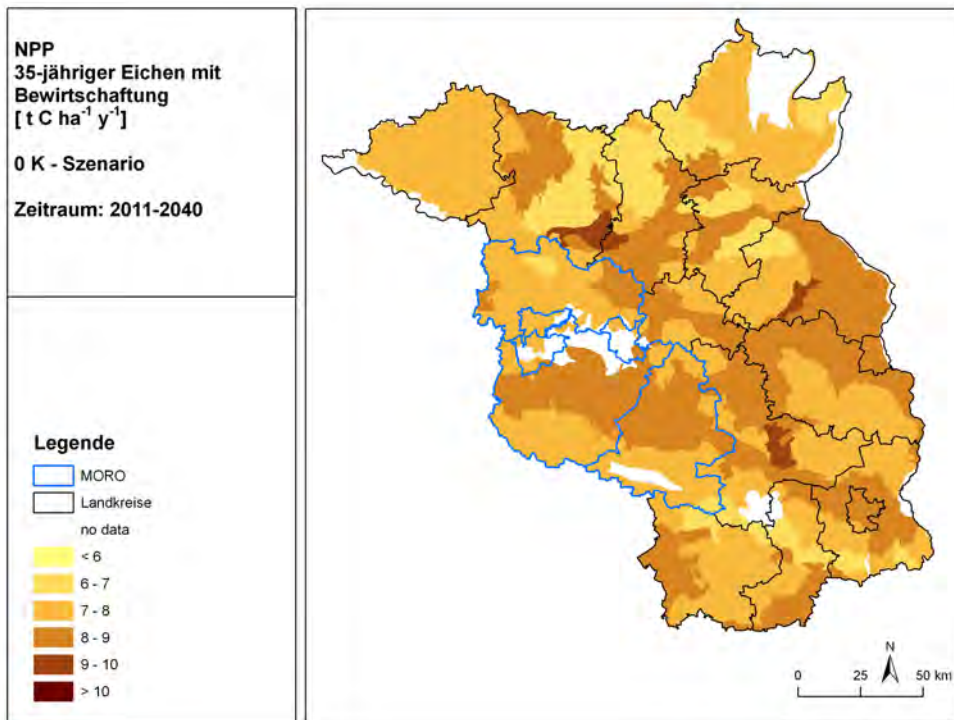


Abb. 4.24: NPP 35-jähriger Eichenbestände, gemittelt für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

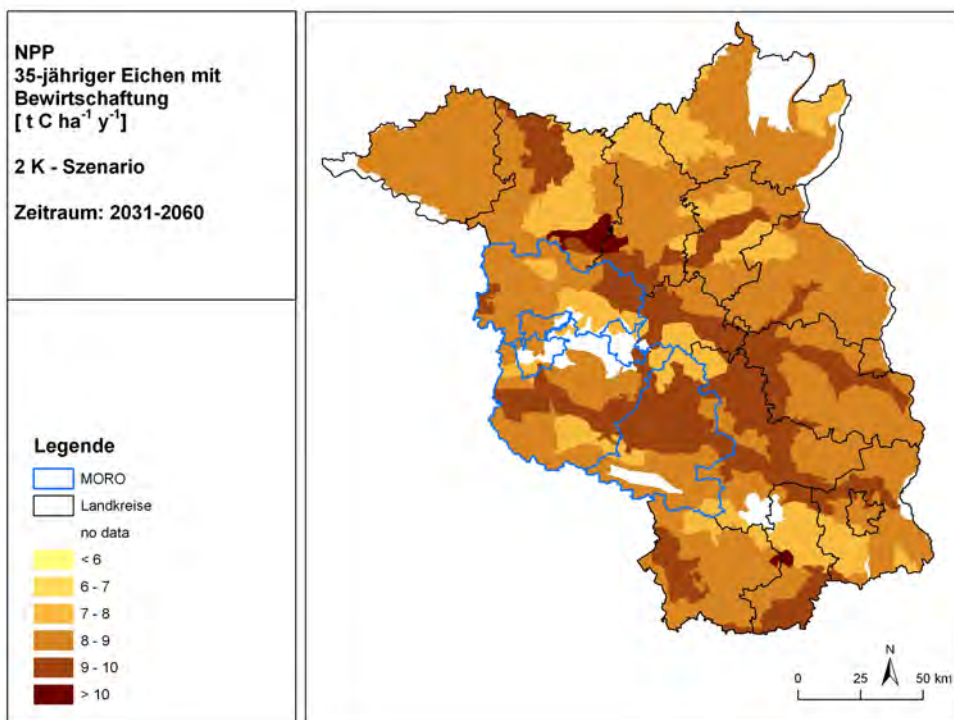
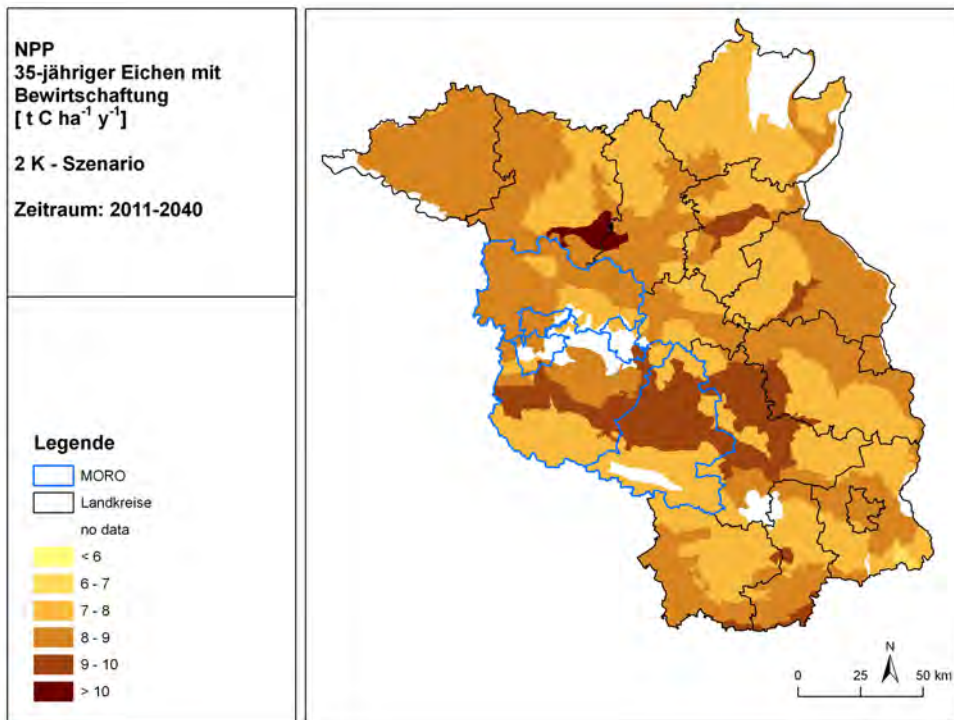


Abb. 4.25: NPP 35-jähriger Eichenbestände, gemittelt für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

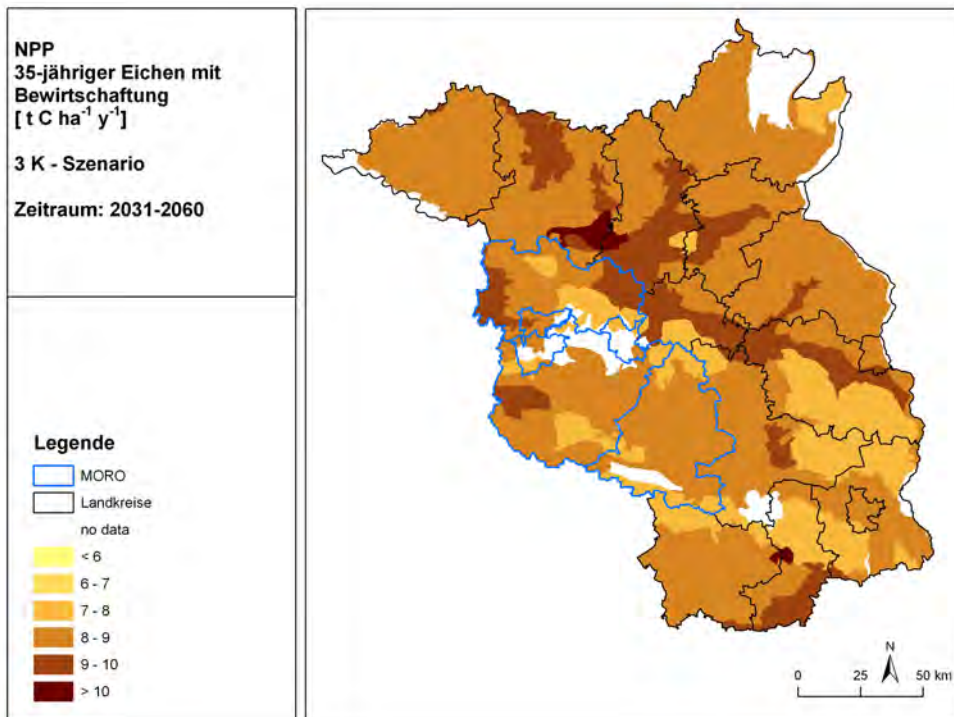
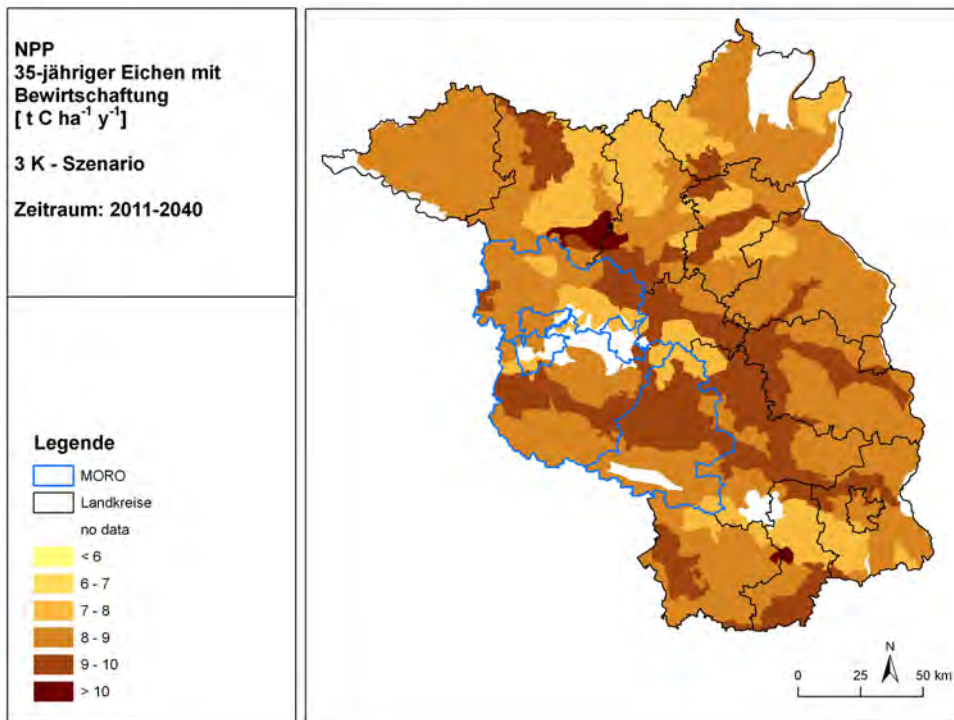


Abb. 4.26: NPP 35-jähriger Eichenbestände, gemittelt für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

Die Buchenbestände zeigen unter allen Szenarien und für beide Perioden die geringsten Zuwächse der NPP im Vergleich mit Kiefer und Eiche. Insbesondere für die zweite Periode und das 3K-Szenario ist die Produktivität geringer als für den Basiszeitraum 1977-2006 (Tab. 4.9).

**Tab. 4.9: Jährliche NPP [ $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ] als dreißigjähriges Mittel über 122 Buchenbestände, aufgeteilt nach Landkreisen**

	Basis		OK	2K	3K	OK	2K	3K
	1961-1990	1977-2006						
HVL	7.91	8.17	8.31	8.59	8.89	8.48	8.74	8.48
PM	8.00	8.16	8.34	8.41	8.64	8.33	8.47	8.15
TF	8.24	8.35	8.50	8.62	8.57	8.57	8.66	8.26

Die höchste Produktivität unter heutigen klimatischen Verhältnissen zeigen simulierte Buchenbestände im nördlichen Teil der beiden Landkreise Potsdam-Mittelmark und Teltow-Fläming. Ihre Produktivität nimmt unter dem OK- und 2K-Szenario zu, aber unter dem 3K-Szenario verschlechtern sich die klimatischen Bedingungen, so dass es auch in diesen Regionen zu einem Rückgang der Produktivität kommt (Abb. 4.27 bis Abb. 4.30).

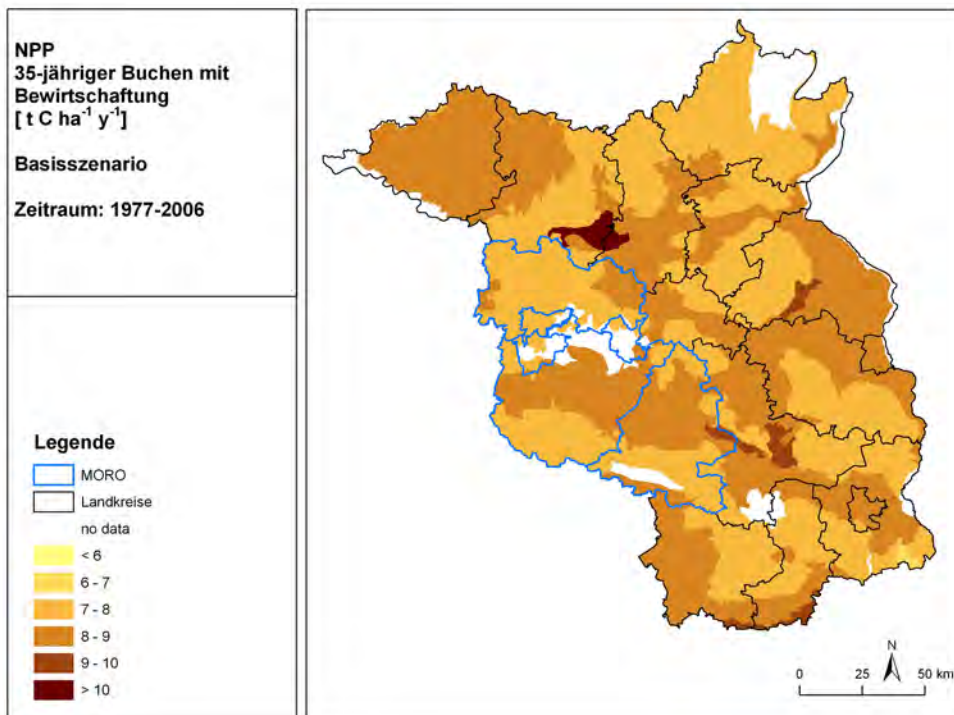
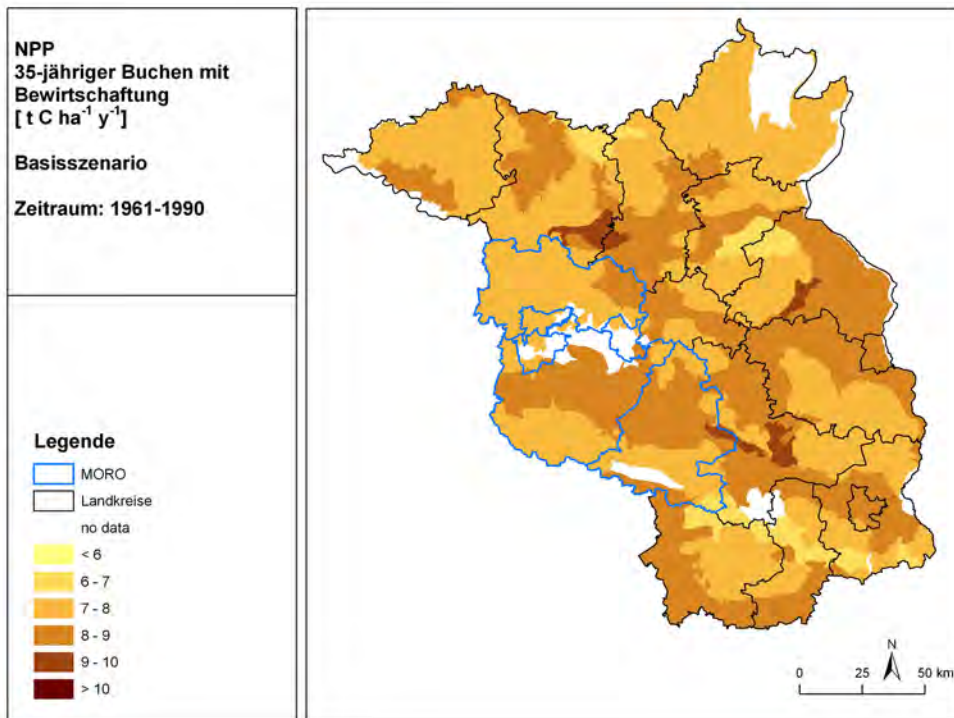


Abb. 4.27: NPP 35-jähriger Buchenbestände, gemittelt für 1961-1990 (oben) und 1977-2006 (unten)

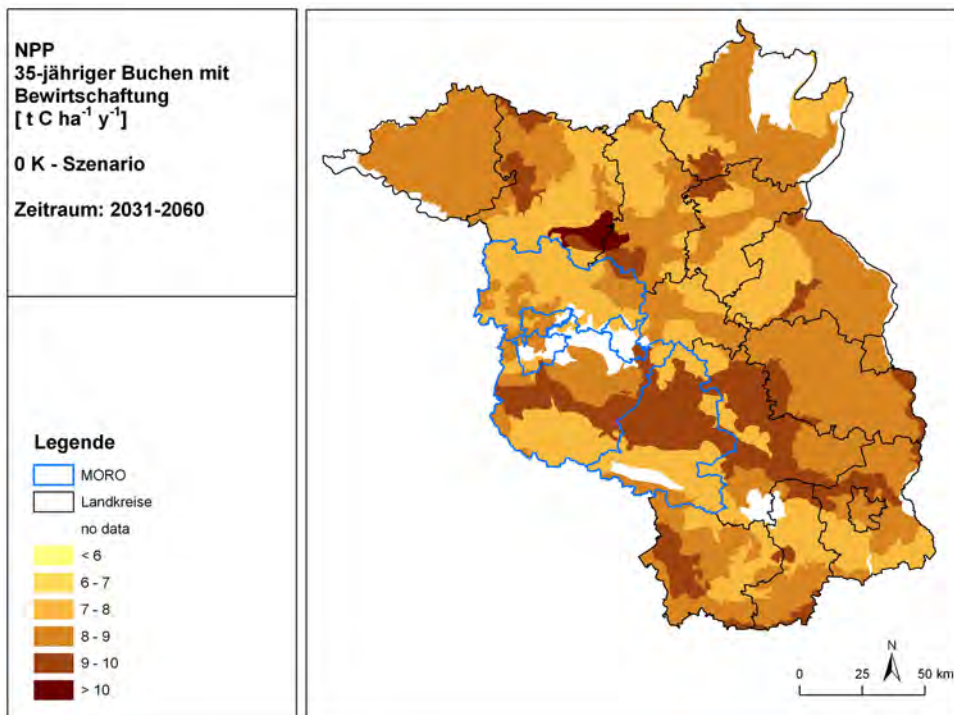
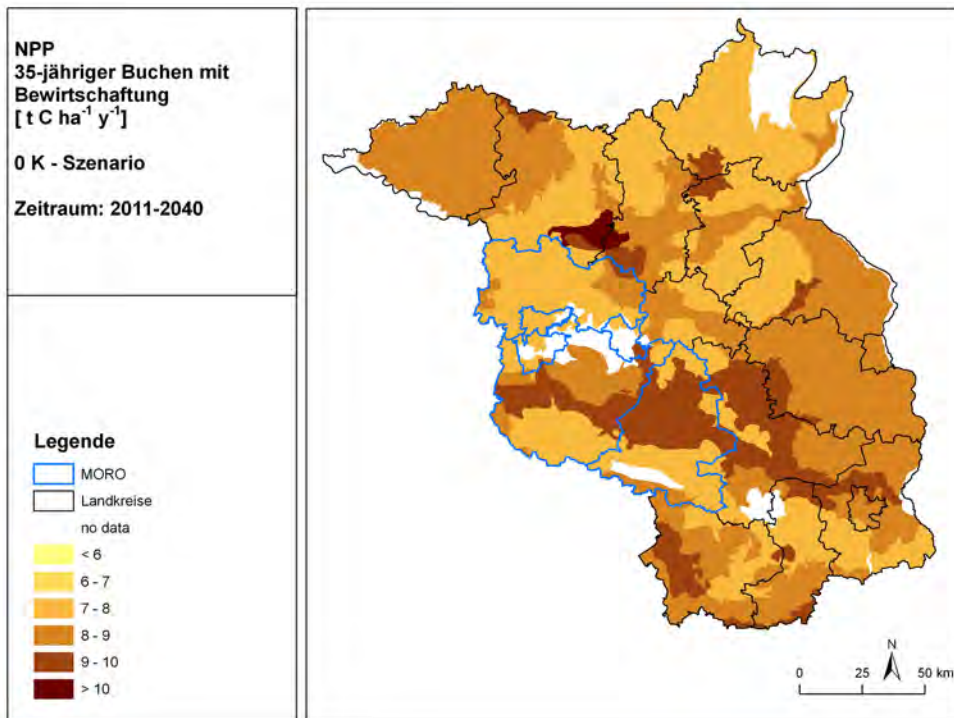


Abb. 4.28: NPP 35-jähriger Buchenbestände, gemittelt für OK, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

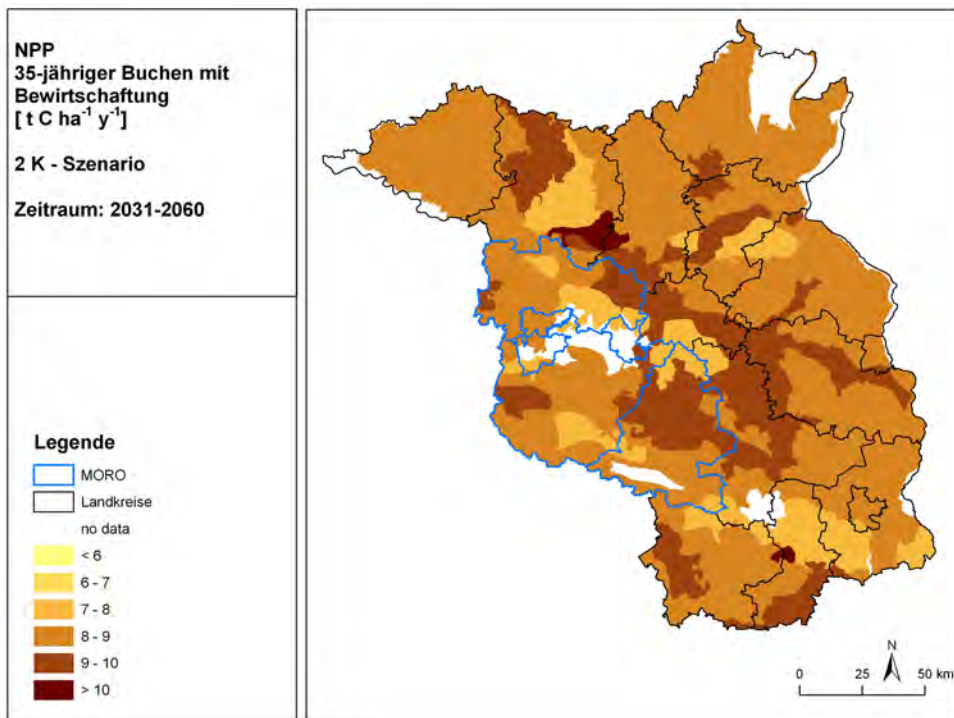
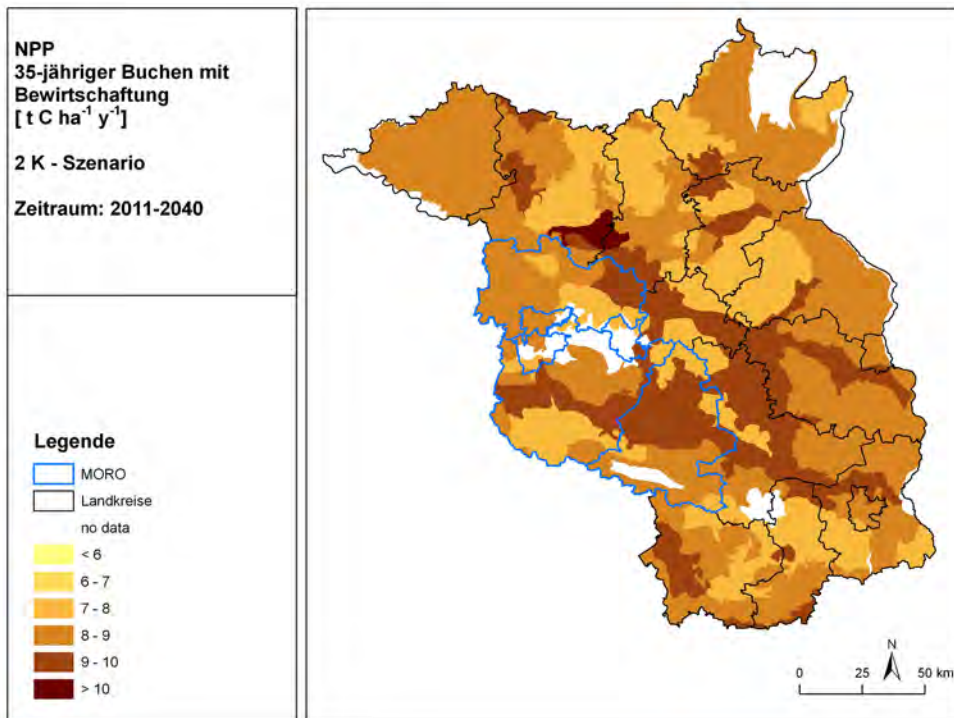


Abb. 4.29: NPP 35-jähriger Buchenbestände, gemittelt für 2K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

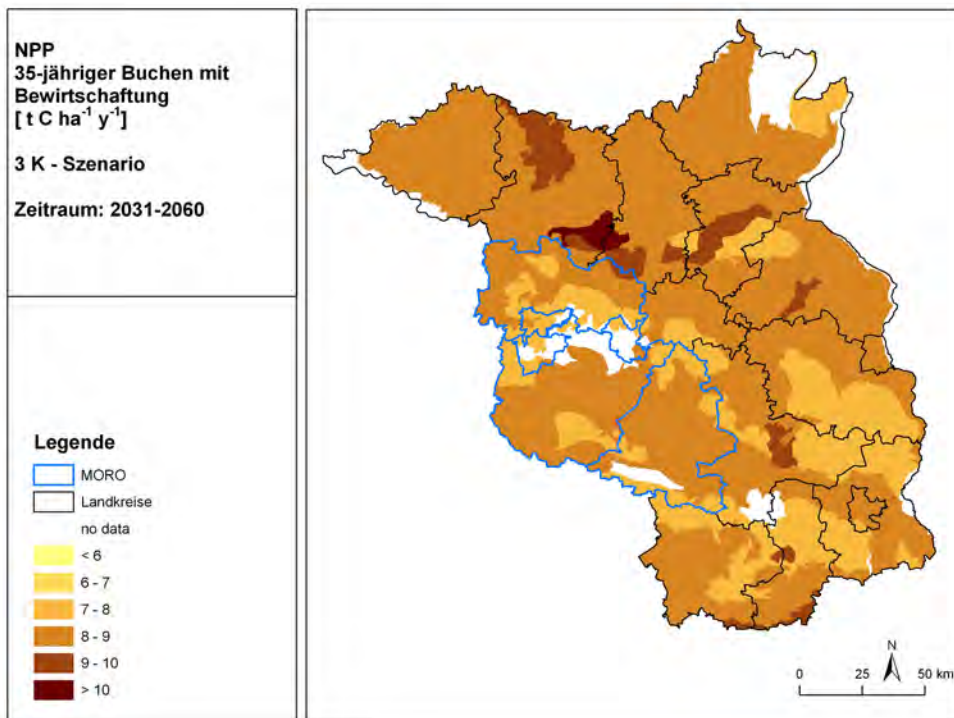
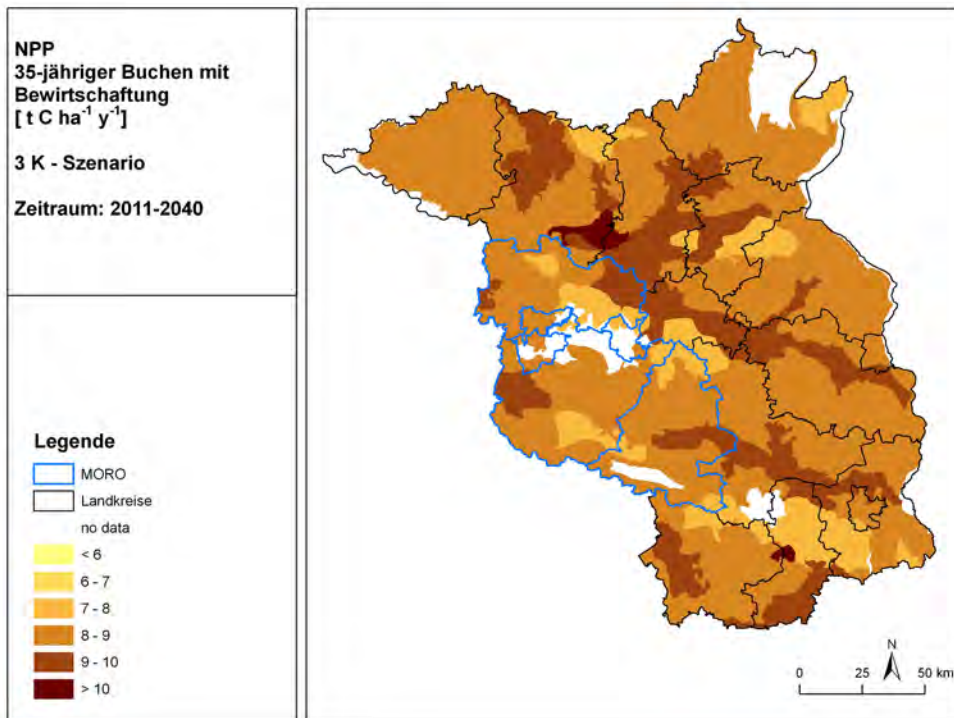
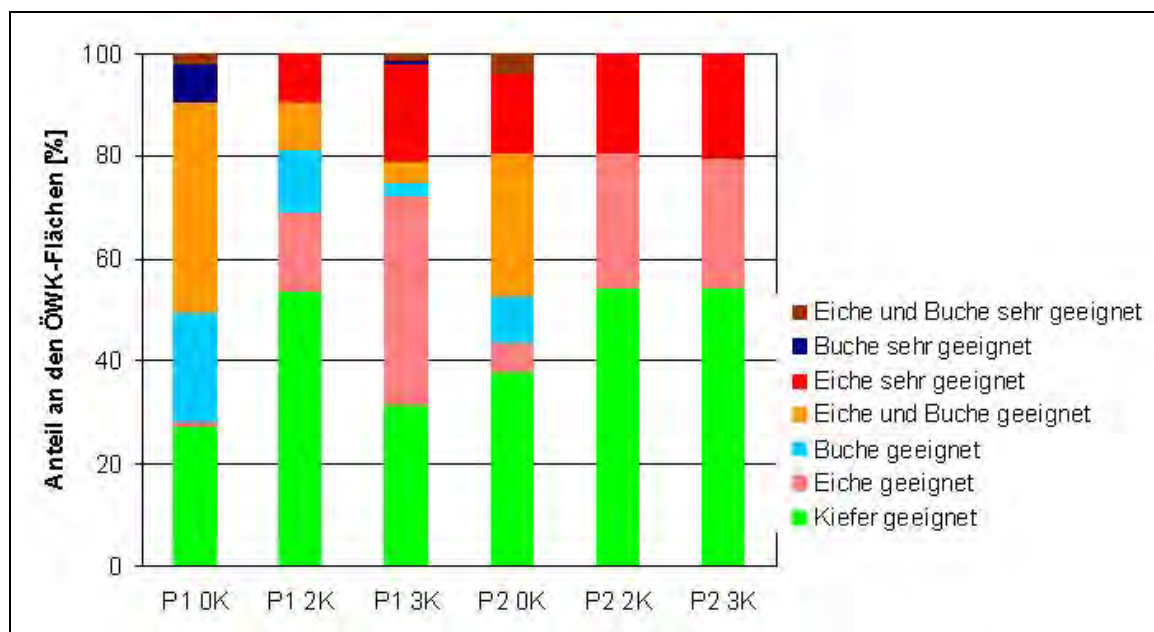


Abb. 4.30: NPP 35-jähriger Buchenbestände, gemittelt für 3K, 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

#### 4.5.2. Waldumbauindikator

Die Auswertung des in Kapitel 4.2.2.2 beschriebenen Waldumbauindikators zeigt, dass ein Viertel bis die Hälfte der ÖWK-Flächen für einen Waldumbau mit Buche oder Eiche nicht geeignet ist (Abb. 4.31). Mit zunehmender Erwärmung steigt der Anteil der Flächen, für die ein Umbau nicht empfohlen werden kann. Auch der Teil der Flächen, die für einen Umbau mit Buche geeignet sind, nimmt mit zunehmender Erwärmung ab. Dagegen gibt es für alle Szenarien und die beiden betrachteten Perioden einen beträchtlichen Flächenanteil, auf dem die Eiche für einen Umbau geeignet ist. In der letzten Periode des stärksten Erwärmungsszenarios ist die Hälfte der Flächen nicht für einen Waldumbau geeignet, während auf der anderen Hälfte ein Umbau mit Eiche möglich ist.



**Abb. 4.31: Waldumbauereignung, aufgeschlüsselt nach den Anteilen der ÖWK-Flächen, für Periode P1 (2011-2040) und Periode P2 (2031-2060)**

In den Karten (Abb. 4.32 bis Abb. 4.34) ist ebenfalls zu erkennen, wie die Anzahl der Flächen, die für einen Waldumbau, insbesondere mit Buche, geeignet sind, abnehmen.

Langfristig gesehen empfiehlt sich ein Umbau der Kiefernbestände hin zu reinen Buchenbeständen aufgrund der schlechteren Produktivität der Buche nicht. In einem Bericht des LFE zum Waldumbaupotenzial (LFE 2007) wird vor allem im Fläming ein Umbau zu Buchen-Nadelwäldern angestrebt. Während es unter dem OK-Szenario in den nächsten dreißig Jahren (1. Periode) noch viele Standorte gibt, an denen die Buche gute Bedingungen hat, ist in der 2. Periode (2031-2060) an mehreren Standorten die Eiche geeigneter (Abb. 4.32 bis Abb. 4.34). Unter fortschreitender Erwärmung ist der Anbau reiner Buchenbestände mit einem steigenden Risiko verbunden. Aus diesem Grund sollten die Ziele des Waldumbaus, wie sie in der zitierten Studie formuliert werden, unter Einbeziehung der möglichen Klimaänderungen noch einmal überarbeitet werden.

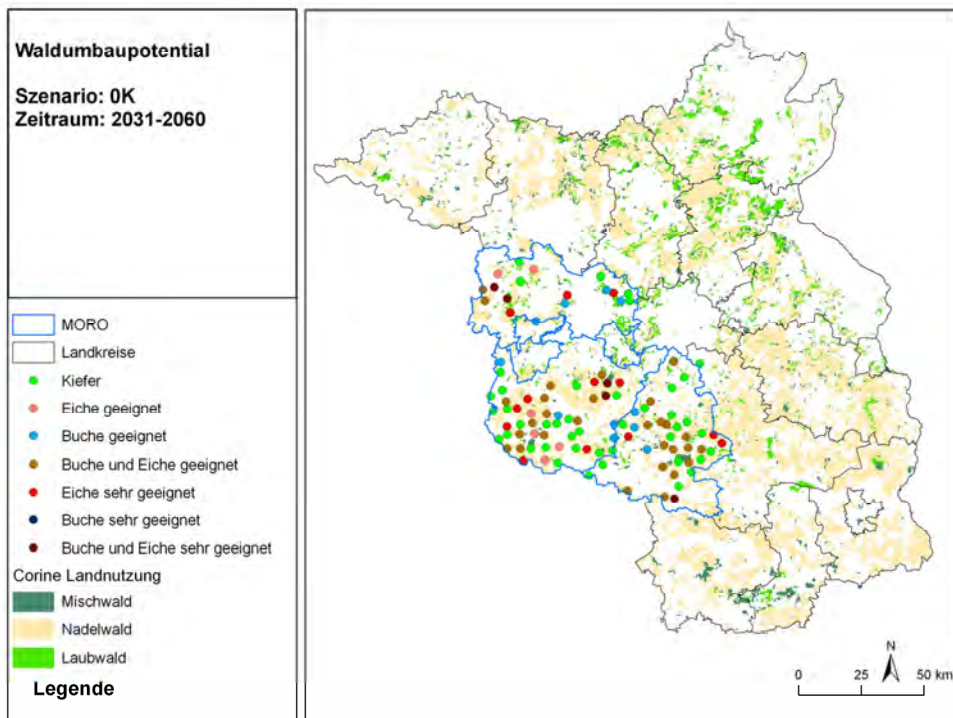
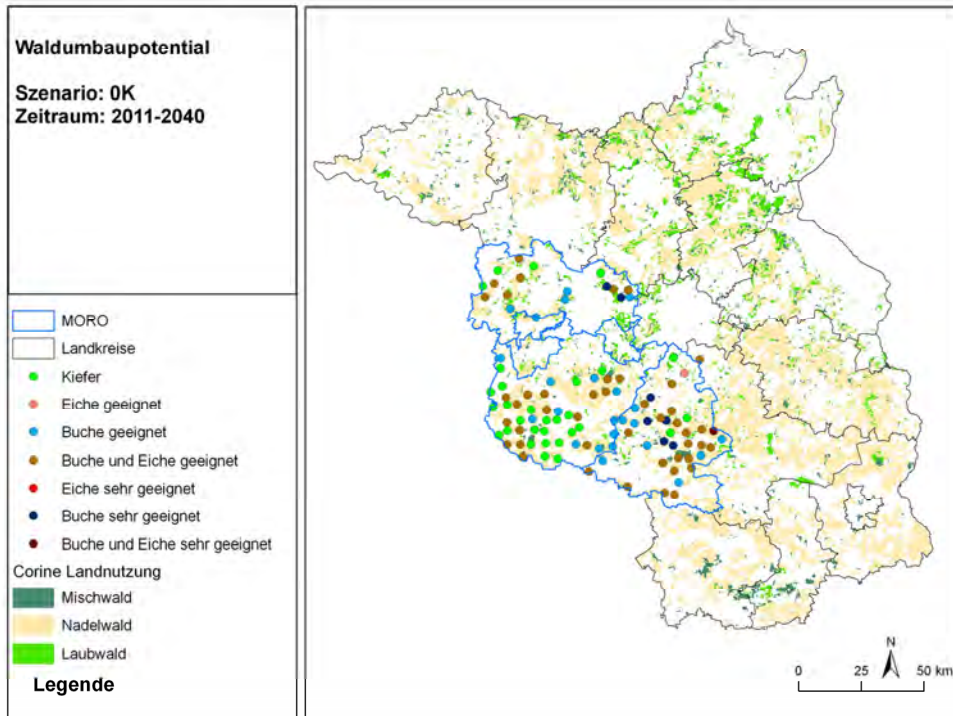


Abb. 4.32: Waldumbaueignung der ÖWK-Flächen in den untersuchten Landkreisen unter dem OK-Szenario für 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

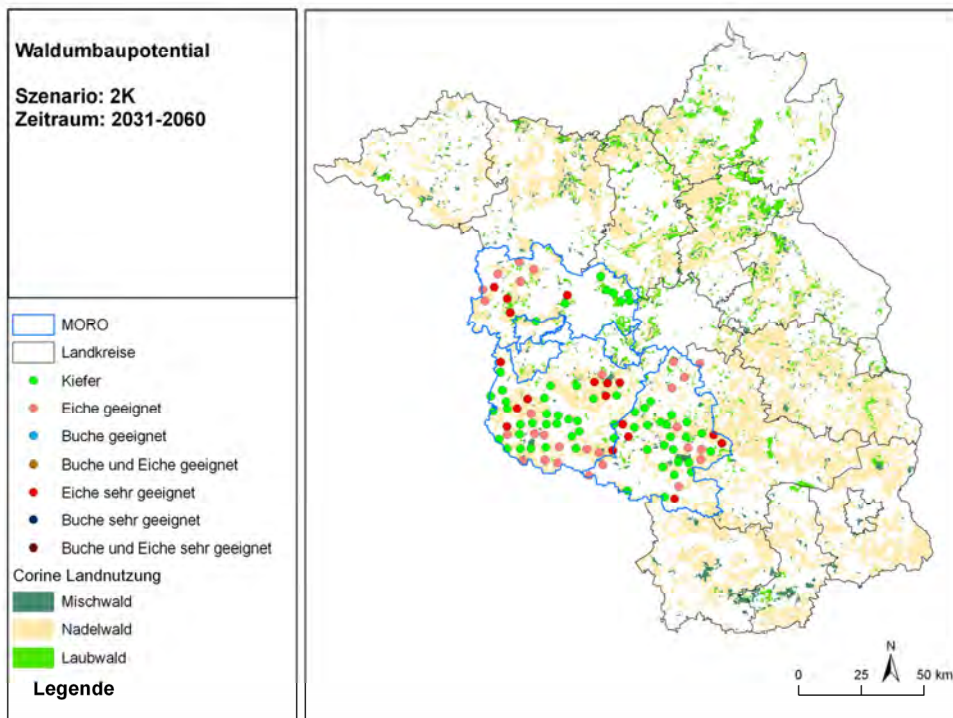
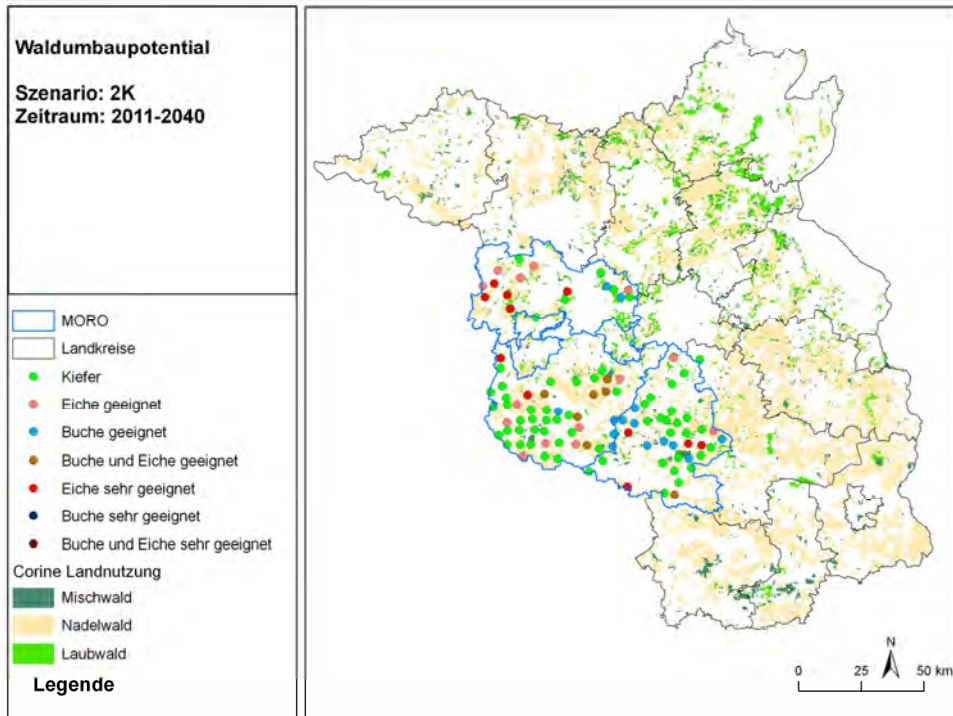


Abb. 4.33: Waldumbaueignung der ÖWK-Flächen in den untersuchten Landkreisen unter dem 2K-Szenario für 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

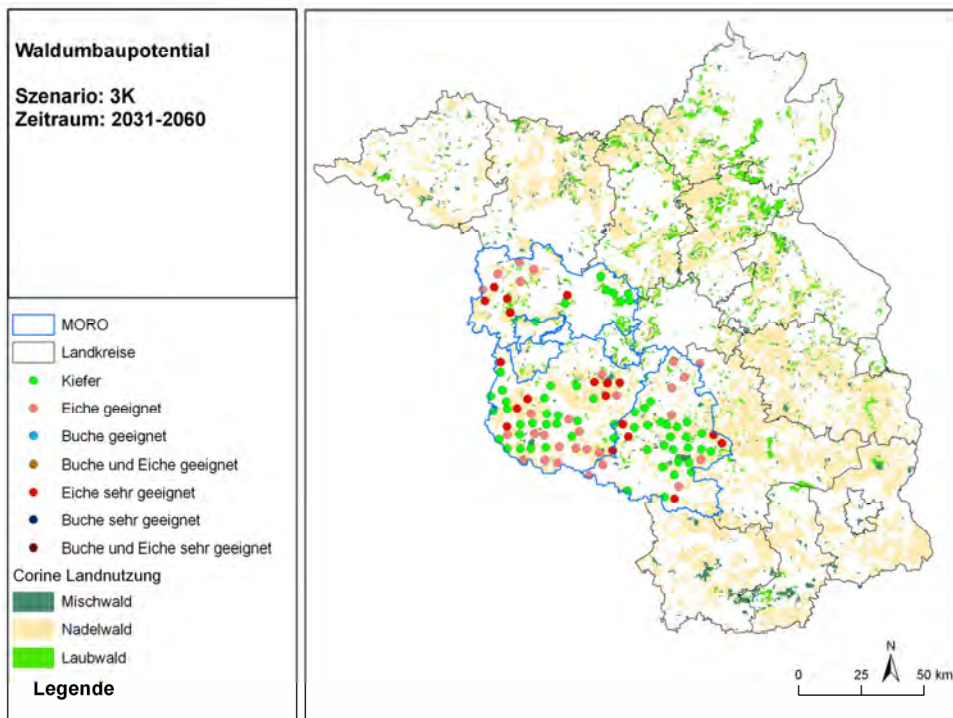
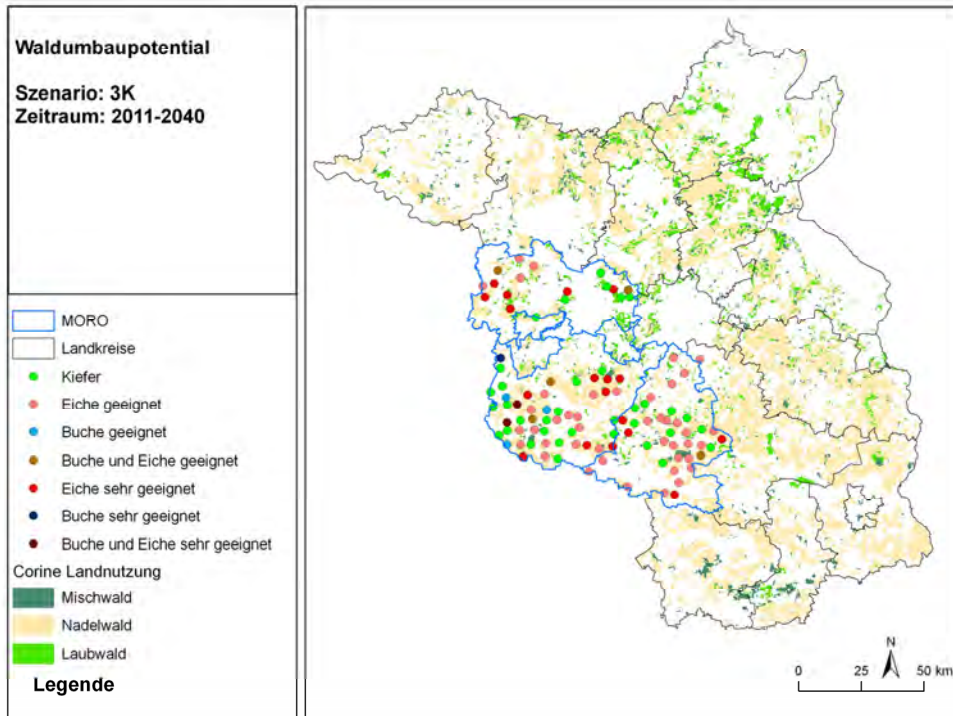


Abb. 4.34: Waldumbaueignung der ÖWK-Flächen in den untersuchten Landkreisen unter dem 3K-Szenario für 2011-2040 (oben) und 2031-2060 (unten)

#### 4.6. Holzertrag von Aspen-KUP auf Ackerflächen

In der Regel werden Kurzumtriebsplantagen (KUP) für 20 Jahre angelegt (vier Wachstumsperioden und vier Ernten). Aus diesem Grund wurde die Simulation mit 4C nur für 20 Jahre durchgeführt und ausgewertet. Als Baumart im Kurzumtrieb wurde die Aspe (*Populus tremula*) gewählt. Ergebnisse liegen für die Zeiträume 1987-2006 und 2041-2060 vor (Kollas et al. 2009).

Die Simulationen wurden wiederum mit den drei Klimaszenarien ausgeführt und die Ergebnisse für die angegebenen Zeiträume gemittelt. Die Auswertung wurde für alle Landwirtschaftsflächen, die in den Landkreisen verfügbar sind, vorgenommen. Daher sind die Mittelwerte pro Landkreis nur Orientierungswerte, da davon auszugehen ist, dass nur Flächen mit schlechterer Ackerzahl für Kurzumtriebsplantagen in Frage kommen (siehe Tab. 4.10). Unter dem 2K-Szenario liegen die Erträge im Mittel höher als für den Basiszeitraum 1977-2006, unter dem 3K-Szenario sind die Erträge im Mittel geringer als für den Basiszeitraum. Unabhängig von den Szenarien sind auf den Böden des Landkreises Havelland die höchsten Erträge möglich. Die KUP sind eine langfristige Alternative zur konventionellen Landwirtschaft, insbesondere auf leichteren Böden. Die preisliche Entwicklung von Hackschnitzel, einem Produkt aus der KUP, zeigt eine deutlich steigende Tendenz. Eine detailliertere Betrachtung, die auch das Untersuchungsgebiet einschließt, erfolgte im Rahmen einer Studie am PIK (Wechsung et al. 2009).

Tab. 4.10: Jährliche Erträge der Aspen-KUP (Mitt - Mittelwert, Min - minimaler Wert, Max - maximaler Wert, Sdev - Standardabweichung)

t DW ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Basis (1987-2006)				OK (2041-2060)				2K (2041-2060)				3K (2041-2060)			
	Mitt	Min	Max	Sdev	Mitt	Min	Max	Sdev	Mitt	Min	Max	Sdev	Mitt	Min	Max	Sdev
Potsdam	5.23	4.34	6.01	0.53	5.03	3.96	6.06	0.62	5.52	3.99	7.08	0.88	5.30	3.91	6.83	0.86
Brandenburg	5.87	3.96	7.00	0.82	5.42	3.71	6.39	0.80	6.01	3.74	7.24	1.03	5.41	3.40	6.50	0.88
HVL	6.05	4.42	8.02	0.88	5.84	4.25	8.01	0.86	6.43	4.42	9.00	1.05	5.91	4.06	8.16	0.97
PM	5.55	3.62	7.83	0.90	5.17	3.38	7.62	0.84	5.66	3.31	8.69	1.06	5.24	3.05	8.41	0.98
TF	5.77	3.85	7.83	0.75	5.44	3.64	7.62	0.69	5.96	3.67	8.69	0.85	5.59	3.42	8.41	0.84

DW - Trockenmasse

#### 4.7. Zusammenfassung

Aus der Analyse der Wirkungen der Klimaprojektionen für die betrachteten Szenarien und Zeiträume mit dem Waldwachstumsmodell 4C und mehreren Indikatoren ergeben sich folgende Kernaussagen:

- Unter den angenommenen Klimaprojektionen steigt die Dürregefährdung für die Vegetation, d.h. die Länge der Perioden ohne Niederschlag nimmt zu.
- Ein Anstieg der klimatisch bedingten Waldbrandgefahr ist zu erwarten.
- Die durch Niederschlag bedingte Erosionsgefährdung geht leicht zurück. Dabei wurde die Auswirkung von Extremniederschlägen nicht berücksichtigt.
- Steigende Temperaturen führen zu längeren Vegetationsperioden und damit zu höherer Produktivität der Kiefern- und Eichenbestände, der Produktivitätsgewinn geht aber mit dem 3K-Szenario und zur Mitte des Jahrhunderts wieder etwas zurück.
- Die Buche erzielt geringere Produktivitätssteigerungen als die Kiefer und die Eiche und man muss unter dem 3K-Szenario im Zeitraum 2031-2060 in den Kreisen Potsdam-Mittelmark und Teltow-Fläming mit einem Rückgang der Produktivität im Vergleich zum Zeitraum 1977-2006 rechnen.
- Für einen großen Teil der heutigen, untersuchten Kiefernflächen ist langfristig der Waldumbau mit Buche aufgrund der zunehmenden Trockenheit mit einem starken Risiko verbunden. Für ungefähr die Hälfte der betrachteten Flächen wird die Eiche empfohlen.
- Der Anbau von Kurzumtriebsplantagen auf schlechteren landwirtschaftlichen Flächen mit trockenheitstoleranten Baumarten (z.B. Zitterpappel) ist eine Alternative für die Landwirtschaft.

#### 4.8. Literatur

- AG\_Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.
- BGR (1998) Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:100.000.000 (BÜK 1000). Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Bugmann, H., R. Grote, P. Lasch, M. Lindner und F. Suckow (1997) A new forest gap model to study the effects of environmental change on forest structure and functioning. Impacts of Global Change of Tree Physiology and Forest Ecosystem. Proceedings of the International Conference on Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems, held 26-29 November 1996, Wageningen. G. M. J. Mohren, K. Kramer and S. Sabate. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher, pp 255-261.
- Flemming, G. (1994) Wald Wasser Klima - Einführung in die Forstmeteorologie. Berlin, Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- Käse, H. (1969) Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern Akademie Verlag. Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR, Akademie Verlag, Berlin.
- Kollas, C., P. Lasch, J. Rock und F. Suckow (2009) Bioenergy potential in Germany - assessing spatial patterns of biomass production with aspen short-rotation coppice. *Int. Agrophys.* 23(4): 343-352.
- Lasch, P., F. W. Badeck, F. Suckow, M. Lindner und P. Mohr (2005) Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). *For. Ecol. Manage.* 207(1-2): 59-74.
- LFE (2007) Waldumbaupotenzial im Land Brandenburg LFE Fachbereich Planung und Betriebswirtschaft. LFE. LFE Fachbereich Planung und Betriebswirtschaft.
- Meiwes, K.-J., F. W. Badeck, F. Beese, D. Berthold, P. Einert, H. Jochheim, R. Kallweit, A. Konopatzky, P. Lasch, H. Meesenburg, M. Puhmann, S. Raspe, H. Schulte-Bisping, C. Schulz und F. Suckow (2007) Kohlenstoffumsatz in Waldökosystemen und deren Böden. Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von Modellen. *AFZ / Der Wald*(20/2007): 1076-1078.
- Renard, K. G., G. R. Foster und G. A. Weesies (1997) Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), US Department of Agriculture.
- Rommelfanger, E. F. (2007) Darstellung ökologischer Indikatoren in fuzzy-gestützten Modellen - Qualitative und quantitative Prognose der Gefäßpflanzenatzen auf Grünlandstandorten. Fachbereich 09, Agrarwissenschaft-

- ten, Ökotrophie und Umweltmanagement. Gießen, Justus-Liebig Universität.
- Schaber, J., F.-W. Badeck und P. Lasch (1999) Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C). Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik. 11. Jahrestagung und Internationale biometrische Gesellschaft. Deutsche Region. Arbeitsgruppe Ökologie, Herbstkolloquium. D. R. Pelz, O. Rau and J. Saborowski. Freiburg, pp 212-217.
- Schwertmann, U., W. Vogl und M. Kainz (1990) Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Stuttgart, Ulmer.
- Wechsung, F., F. W. Gerstengarbe, P. Lasch und A. Lüttger, Eds. (2009) Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel. PIK-Report 112. Potsdam, PIK.
- Wolff, B. (2002) Processing forest inventory data to establish a nationwide database for the estimation of the impacts of climate change on German forest and forestry. Forstwiss. Centralblatt 121, Supplement 1: 18-27.

**Anhang Modellsteckbrief 4C****4C****FORESEE - FORESt Ecosystems in a Changing Environment****Modellbeschreibung:**

Das Modell 4C (FORESt Ecosystems in a changing Environment) ist ein physiologisch basiertes Waldwachstumsmodell, das die Etablierung, das Wachstum und die Mortalität von Baumkohorten beschreibt. Produktion und Wachstum werden für Gruppen von Bäumen gleicher Art, gleicher Dimension und gleichen Alters berechnet. Deren Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe beeinflusst ihr Wachstum, ihre Mortalität und die Verjüngung im Bestand. Der Wasser-, Stickstoff- und Kohlenstoffhaushalt wird in Abhängigkeit von Boden, Bestand und Wetter täglich bilanziert, wobei durch die Aufnahme von Wasser und Stickstoff aus dem Boden einerseits und die jährliche Zufuhr der Streu zum Bodenkompartment andererseits die Kopplung zwischen Pflanze und Boden hergestellt wird. Auf Bestandesebene können Verjüngungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen simuliert werden. Das Modell ist für die fünf wichtigsten europäischen Baumarten parametrisiert (Buche (*Fagus sylvatica* L.), Fichte (*Picea abies* L. Karst.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Eiche (*Quercus robur* L. und *Quercus petraea* Liebl.), Birke (*Betula pendula* Roth), sowie für Aspen (*Populus tremula* (L.), *P. tremuloides* (Michx.)), Aleppo-Kiefer (*Pinus halepensis* Mill.), Gelbkiefer (*Pinus ponderosa* Dougl.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*).

**Inputdaten:**

Tägliche meteorologische Parameter, Bodenbeschreibung (physikalische und chemische Parameter), Bestandesbeschreibung

**Ergebnisse:**

Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik (Pools and Flüsse) eines Waldbestandes einschließlich des Bodens, Wachstumsverhalten eines Waldbestandes (z. B. Zuwachs, Durchmesser, Höhe, Volumen)

**Auflösung:**

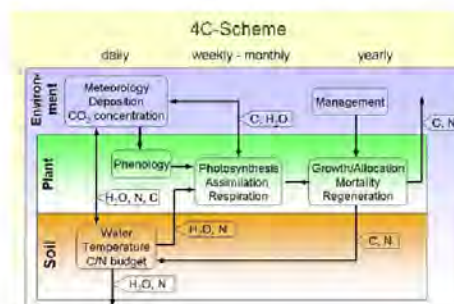
- zeitlicher Simulationsschritt: 1 Tag – 1 Jahr
- Simulationszeitraum: 1 – 200 Jahre
- räumlich: Waldbestand

**Operating system:**

Linux, Unix, Windows

**Modelllaufzeit:**

Abhängig von der Anzahl der Standorte, Realisierungen und Szenarienzeitraum

**Modellschema:****Entwickler:**

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung  
Telegrafenberg  
D-14472 Potsdam,

**Kontakt:**

Petra Lasch  
lasch@pik-potsdam.de  
Dr. Felicitas Suckow  
suckow@pik-potsdam.de

**Referenz:**

Lasch, P., F. W. Badeck, F. Suckow, M. Lindner und P. Mohr (2005) Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). For. Ecol. Manage. 207(1-2): 59-74.

**Website:**

<http://www.pik-potsdam.de/~lasch/4c.htm>

## 4C

**Rolle des Modells:**

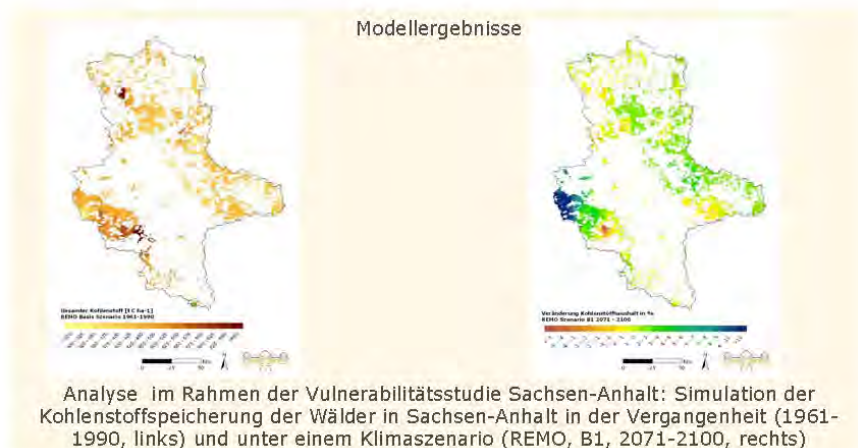
Zeitlich und räumlich hochaufgelöste Modellierung des Kohlenstoffs und Stickstoffs im Boden und im Bestand sowie des Waldwachstums unter globalem Wandel (Klima- und Landnutzungsänderungen)

**Modellinterface:** STAR, WETTREG, REMO

**Zeiträume:** Validierung: 1951 – 2008  
Projektionen: 2008-2100

**Zielgruppen:**

- Forschungs-  
institute
- Universitäten
- Beratung  
Forstwirtschaft

**Potenzielle Nutzer und Anwender**

**a) Forstverantwortliche:** Beratung und Unterstützung bei der Entwicklung von Anpassungsoptionen

**b) Forschung und Universitäten:** Untersuchung von Prozessen und Rückkopplungen in Waldökosystemen einschließlich Klimaänderungen und Landnutzungsänderungen

**Verfügbarkeit:**

Für den Programmcode und die Dokumentation:

[lasch@pik-potsdam.de](mailto:lasch@pik-potsdam.de), [suckow@pik-potsdam.de](mailto:suckow@pik-potsdam.de)

**Ressourcen zur Nutzung des Modells an bestimmten Standorten:**

In Abhängigkeit von der Erfahrung des Nutzers und der Komplexität der Modellanwendung 2-3 Monate.