

# **Vulnerabilitätsstudie 2009**

## **Band 1 - Bericht**



Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des  
Klimawandels in Sachsen-Anhalt



**SACHSEN-ANHALT**

Landesamt für Umweltschutz



# Vulnerabilitätsstudie 2009

Bericht (Band 1)

## Bericht zu den Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt

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

Berichte des  
Landesamtes für Umweltschutz  
Sachsen-Anhalt

2013 – Heft 3 (Band 1)

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

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







## Vorwort

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

Halle, 01.03.2013



Klaus Rehda  
Präsident





POTSDAM-INSTITUT FÜR  
KLIMAFOLGENFORSCHUNG

# Klimawandel in Sachsen-Anhalt

## Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels

Endbericht

Studie im Auftrag des MLU



SACHSEN-ANHALT  
Ministerium für  
Landwirtschaft und Umwelt

Begleitet durch das LAU

SACHSEN-ANHALT  
Landesamt für Umweltschutz

Projektleitung: J. Kropp

Koordination & Editor: O. Roithmeier

Autoren: Kropp J., Roithmeier O., Hattermann F., Rachimow C., Lüttger A.,  
Wechsung F., Lasch P., Christiansen E.S., 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.

---

Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK) wurde vom Ministerium für Landwirtschaft und Umweltschutz Sachsen-Anhalt (MLU) mit der Abschätzung der Verletzlichkeit ausgewählter Sektoren in Sachsen-Anhalt gegenüber den in Folge des Klimawandels projizierten Änderungen beauftragt.

Die wissenschaftlich-technischen Arbeiten im Rahmen dieses Projektes wurden am PIK von Oktober 2008 bis Oktober 2009 durchgeführt.



POTSDAM-INSTITUT FÜR  
KLIMAFOLGENFORSCHUNG



SACHSEN-ANHALT

Ministerium für  
Landwirtschaft und Umwelt



SACHSEN-ANHALT

Landesamt für Umweltschutz

Ansprechpartner:

Dr. Jürgen Kropp, Olivia Roithmeier

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

PF 60 12 03, D-14412 Potsdam

Tel.: +49-331-288-2526 oder -2474

Fax: +49-331-288-20709

E-mail: [kropp@pik-potsdam.de](mailto:kropp@pik-potsdam.de), [roithmeier@pik-potsdam.de](mailto:roithmeier@pik-potsdam.de)

Potsdam im November 2009

---

Dieser Bericht kann wie folgt zitiert werden:

Kropp J., Roithmeier O., Hattermann F., Rachimow C., Lüttger A., Wechsung F., Lasch P., Christiansen E.S., 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“. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK).

---

---

## Vorwort

Der fortschreitende Klimawandel macht global aber auch regional ein verstärktes politisches Handeln erforderlich. Dazu gehören weitere, verstärkte Anstrengungen zur Reduktion von Treibhausgasen. Gleichzeitig ist es jedoch notwendig, zivilisatorische Systeme an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels anzupassen und in eine nachhaltige Zukunft zu führen. Um ihre Entscheidungen abzusichern, fragen Entscheidungsträger daher zunehmend kleinräumigere Klimaänderungsszenarien und Klimawirkungsanalysen nach.

Die vorliegende Studie verbreitert die Wissensbasis für eine spezifische Auswahl von Sektoren in Sachsen-Anhalt. Dabei berücksichtigt sie insgesamt drei Antriebsszenarien, welche für drei unterschiedliche Klimamodelltypen die Basis für regionale Klimasimulationen bilden. Die daraus abgeleiteten Zukunftsprojektionen spannen den Möglichkeitsraum der Klimaentwicklung für die nächsten 100 Jahre in Sachsen-Anhalt auf. Die Bandbreite dieser Zukünfte liegt in verschiedenen Unsicherheiten begründet: Zum einen bilden Modelle immer nur eine vereinfachte Realität ab, zum anderen kann niemand exakte Vorhersagen über die ökonomische, technologische oder demographische Entwicklung der Menschheit für die nächsten hundert Jahre treffen. Daher müssen im Vorfeld plausible Annahmen über diese Entwicklungen getroffen werden, welche dann in die Simulationen einfließen. Die hier erfolgten sektoralen Untersuchungen für Sachsen-Anhalt bilden dennoch eine wertvolle Grundlage für eine Zukunftsplanung, da der aufgespannte Möglichkeitsraum einen Rahmen für ein fundiertes Entscheidungshandeln setzen kann.

Nicht alle zu Beginn der Studie definierten Fragen konnten abschließend beantwortet werden. Zum einen lag dies an bisher nicht ausreichend zur Verfügung stehendem Datenmaterial, zum anderen an einem bisher unzureichenden Wissenstand in der Forschung, welcher in der Kürze der Zeit, die für die Studie zur Verfügung stand, nicht erweitert werden konnte. Somit konnten weiterführende Aussagen für einzelne Bereiche nicht erzielt werden.

Zusammenfassend lässt sich auch für das Land Sachsen-Anhalt festhalten, dass der Klimawandel den Handlungsspielraum - regional differenziert - für einzelne Sektoren, wie z.B. für den Wassersektor, weiter einschränken wird. Ein intelligentes Management wird die daraus resultierenden Konsequenzen jedoch abmildern können. Daher muß eine in die Zukunft gerichtete Anpassung an die Folgen des Klimawandels, die Etablierung solcher Strategien zum Ziel haben. Zukunftsfähigkeit braucht politische Visionen, für die die Forschung die Basis liefern kann. Detailliertere Untersuchungen und konkrete Wege zur Umsetzung erfordern jedoch oft eine enge Kooperation mit Entscheidungsträgern und/oder Fachbehörden. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen der vorliegenden Studie eng und in kooperativer Weise mit dem projektbegleitenden Arbeitskreis des Landes Sachsen-Anhalt zusammengearbeitet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Textboxverzeichnis.....</b>	<b>XX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>XXI</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Rahmenbedingungen und Vorgehensweise der Studie "Klimawandel in Sachsen-Anhalt" .....	2
1.2. Zum Begriff der Vulnerabilität .....	5
1.3. Das Bundesland Sachsen-Anhalt .....	7
1.4. Literatur .....	8
<b>2. Klima und Klimawandel.....</b>	<b>11</b>
2.1. Das Klima wandelt sich .....	11
2.2. Wie kommen wir zu Zukunftsprojektionen? .....	16
2.3. Verwendete Klimadaten der Studie .....	20
2.3.1. Das regionale Klimamodell WETTREG .....	23
2.3.2. Das regionale Klimamodell REMO.....	25
2.3.3. Betrachtete Klimavariablen .....	26
2.4. Die mittleren klimatischen Verhältnisse in Sachsen-Anhalt im Basiszeitraum.....	28
2.4.1. Temperatur .....	28
2.4.2. Niederschlag.....	28
2.4.3. Klimatische Wasserbilanz.....	29
2.5. Die projizierte Veränderung der Klimakenn-größen nach den Modellen WETTREG und REMO .....	30
2.5.1. Temperaturanomalien nach den Modellen WETTREG und REMO.....	31
2.5.2. Niederschlagsanomalien nach den Modellen WETTREG und REMO .....	32
2.5.3. Klimaveränderungen nach den Modellen WETTREG und REMO .....	33
2.5.3.1. Temperaturveränderungen .....	35
2.5.3.2. Niederschlagsveränderungen .....	37
2.5.3.3. Veränderungen der Klimatischen Wasserbilanz .....	39
2.5.3.4. Jahresverlauf ausgewählter Klimavariablen .....	41
2.5.4. Die projizierte Veränderung der Klimakenntage nach den Modellen WETTREG und REMO.....	44

<b>2.6. Vergleich der Klimamodelle WETTREG, REMO und STAR.....</b>	<b>46</b>
<b>2.7. Die Rolle von extremen Ereignissen im Rahmen der Klimawirkungsanalysen in Sachsen-Anhalt .....</b>	<b>48</b>
<b>2.8. Literatur .....</b>	<b>50</b>
<b>3. Analyse ausgewählter Sektoren .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1. Wasser .....</b>	<b>53</b>
3.1.1. Einleitung.....	53
3.1.2. Natürliches Wasserdargebot.....	54
3.1.3. Daten und Methoden.....	58
3.1.3.1. Das ökohydrologische Modell SWIM .....	58
3.1.3.2. Datengrundlage .....	60
3.1.3.3. Modellierungsstrategie .....	62
3.1.4. Ergebnisse .....	64
3.1.4.1. Kalibrierung und Parametrisierung für den Referenzzeitraum .....	64
3.1.4.2. Klimafolgen für den Wasserhaushalt (WETTREG-Klimaszenarien) ..	66
3.1.4.3. Klimafolgen für den Wasserhaushalt (REMO-Klimaszenarien) .....	75
3.1.4.4. Vergleich mit den Ergebnissen aus anderen Studien und Projektionen .....	82
3.1.4.5. Klimafolgen für die Entwicklung von Hochwassern.....	83
3.1.4.6. Projektionen für die Weser .....	88
3.1.4.7. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf .....	88
3.1.5. Zusammenfassung .....	90
3.1.6. Anpassungsoptionen .....	94
3.1.7. Literatur.....	97
<b>3.2. Boden .....</b>	<b>99</b>
3.2.1. Wechselwirkungen von Böden und Klima .....	101
3.2.1.1. Sektorübergreifende Relevanz des Bodens .....	101
3.2.1.2. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenfunktionen und Bodenorganismen .....	101
3.2.1.3. Mögliche Veränderungen des Kohlenstoffhaushaltes von Böden unter Klimawandel .....	103
3.2.2. Abschätzung der potenziellen Bodenerosionsgefährdung durch den Klimawandel.....	104
3.2.2.1. Methodik zur Abschätzung potentieller Gefährdung durch Wassererosion .....	106
3.2.2.2. Methodik zur Abschätzung potentieller Gefährdung durch Winderosion .....	107
3.2.2.3. Ergebnisse der Analyse der räumlichen Wassererosionsgefährdung .....	109
3.2.2.4. Ergebnisse der Winderosionsgefährdung .....	114
3.2.3. Zusammenfassung und Diskussion.....	119
3.2.3.1. Zusammenfassung .....	119
3.2.3.2. Diskussion .....	120
3.2.3.3. Einordnung der Ergebnisse .....	121

3.2.4. Anpassungsoptionen .....	122
3.2.5. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf .....	124
3.2.6. Literatur .....	127
<b>3.3. Landwirtschaft .....</b>	<b>132</b>
3.3.1. Fragestellung .....	132
3.3.2. Ertragsentwicklung und Projektion .....	133
3.3.3. Ertragsdifferenzierung nach Boden-Klima-Räumen und Vulnerabilität gegenüber Klimawandel .....	135
3.3.4. Konzeption für eine modellgestützte Projektion von Klimaerträgen .....	138
3.3.4.1. Vorteile und Grenzen des gewählten Modellkonzepts .....	142
3.3.5. Datengrundlage .....	143
3.3.5.1. Modellbildung .....	143
3.3.5.2. Simulation .....	143
3.3.6. Räumlicher Bezug von Modellparametrisierung, Simulation, Validierung und Projektion .....	143
3.3.7. Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> -Düngungseffektes .....	144
3.3.8. Ergebnisse .....	146
3.3.8.1. Ertragsrelevantes Klimaänderungssignal .....	146
3.3.8.2. Klimafolgen ohne Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> -Düngungseffektes ....	152
3.3.9. Klimafolgen unter Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> -Düngungseffektes .....	154
3.3.10. Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse .....	155
3.3.11. Exkurs Tierproduktion .....	155
3.3.12. Literatur .....	157
<b>3.4. Forstwirtschaft .....</b>	<b>158</b>
3.4.1. Forst und Forstwirtschaft in Sachsen-Anhalt .....	159
3.4.2. Analyse der Produktivität, des Stoffhaushalts und der Waldbrandgefährdung der Wälder .....	159
3.4.2.1. Das Waldwachstumsmodell 4C .....	159
3.4.2.2. Datengrundlage .....	162
3.4.2.3. Das Simulations- und Auswertungskonzept .....	166
3.4.2.4. Modellvorbereitung .....	169
3.4.2.5. Ergebnisse der Level II-Flächen .....	170
3.4.2.6. Ergebnisse der Produktivität der ÖWK-Flächen .....	174
3.4.2.7. Ergebnisse der Analyse des Kohlenstoffhaushalts .....	200
3.4.2.8. Ergebnisse der Analyse des Wasserhaushalts .....	207
3.4.2.9. Analyse der klimatischen Waldbrandgefahr .....	215
3.4.3. Windwurfgefährdung der Wälder .....	219
3.4.3.1. Einleitung .....	219
3.4.3.2. Daten und Methodik .....	221
3.4.3.3. Ergebnisse und Diskussion .....	222
3.4.3.4. Schlussfolgerungen .....	236
3.4.4. Anpassungsoptionen .....	236
3.4.5. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf .....	238
3.4.6. Literatur .....	241



<b>3.5. Naturschutz</b>	<b>248</b>
3.5.1. Einleitung	248
3.5.2. Methodik	250
3.5.2.1. Berechnung der Klimatischen Wasserbilanz	250
3.5.2.2. Klassifizierung der Lebensräume	250
3.5.2.3. Abschätzung der Sensitivität der FFH-Lebensraumtypen	255
3.5.3. Ergebnisse	256
3.5.3.1. Veränderung der klimatischen Wasserbilanz	256
3.5.3.2. Potenzielle Gefährdung der FFH-Schutzgebiete aufgrund einer Veränderung der Klimatischen Wasserbilanz	258
3.5.3.3. Abschätzung der Sensitivität der FFH-Lebensraumtypen	264
3.5.4. Zusammenfassung und Diskussion	269
3.5.5. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf	271
3.5.6. Anpassungsoptionen	272
3.5.7. Literatur	275
<b>3.6. Phänologie</b>	<b>277</b>
3.6.1. Methodik der phänologischen Analyse	279
3.6.1.1. Stationsbasierte Auswertung	279
3.6.1.2. Naturraumbasierte Auswertung	281
3.6.2. Bereits beobachtete phänologische Entwicklungen	282
3.6.2.1. Stationsbasierte Auswertung	282
3.6.2.2. Naturraumbasierte Auswertung	285
3.6.3. Diskussion der phänologischen Veränderungen	286
3.6.4. Mögliche zukünftige phänologische Entwicklungen, Konsequenzen und Handlungsempfehlungen	287
3.6.5. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf	289
3.6.6. Literatur	290
<b>3.7. Weinbau</b>	<b>293</b>
3.7.1. Einleitung	293
3.7.2. Datengrundlage und Methodik	294
3.7.2.1. Der Huglin-Index	296
3.7.2.2. Das Phänologiemodell	297
3.7.2.3. Eingangsgrößen	297
3.7.2.4. Phänologische Phasen	297
3.7.2.5. Weinbaulich relevante Klimagrößen	298
3.7.3. Ergebnisse	301
3.7.3.1. Entwicklung des Huglin-Index	301
3.7.3.2. Auswirkungen auf die Rebphänologie	302
3.7.3.3. Änderungen weinbaulich relevanter Klimagrößen	303
3.7.4. Zusammenfassung	306
3.7.5. Anpassungsoptionen	306
3.7.6. Kenntnislücken und Handlungsbedarf	306
3.7.7. Literatur	308
<b>4. Synthese der Ergebnisse</b>	<b>309</b>

<b>Anhang.....</b>	<b>313</b>
<b>Anhang zu Kapitel 1.1: Einleitung.....</b>	<b>314</b>
Beteiligte der Vulnerabilitätsstudie Sachsen-Anhalt .....	314
Verwendete Datensätze .....	316
<b>Anhang zu Kapitel 2.5: Klima und Klimawandel.....</b>	<b>319</b>
Ergebnisse ausgewählter Klimavariablen nach dem Modell WETTREG .....	319
Ergebnisse ausgewählter Klimavariablen nach dem Modell REMO .....	333
Veränderung ausgewählter Klimavariablen nach dem Modell WETTREG .....	347
Veränderung ausgewählter Klimavariablen nach dem Modell REMO.....	354
Jahresverlauf ausgewählter Klimavariablen nach den Modellen REMO und WETTREG .....	361
Entwicklung der Klimakenntage nach dem Modell WETTREG .....	366
Entwicklung der Klimakenntage nach dem Modell REMO.....	374
<b>Anhang zu Kapitel 3.1: Wasser .....</b>	<b>382</b>
Änderung der Grundwasserneubildung .....	382
Änderung der Verdunstung .....	385
<b>Anhang zu Kapitel 3.2. Boden.....</b>	<b>389</b>
Gegenwärtige Erosionsgefährdung durch Wasser und Wind .....	389
Jahresmittelwerte erosionswirksamer Klimavariablen.....	391
Tage mit Starkniederschlag im Winter und Sommer .....	394
Veränderung der Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Winter und Sommer	400
<b>Anhang zu Kapitel 3.4: Forstwirtschaft.....</b>	<b>404</b>
Entwicklung des Kohlenstoffhaushalts unter Szenario A2.....	404
Entwicklung des Kohlenstoffhaushalt unter Szenario B1 .....	406
Entwicklung des Wasserhaushalts und der Versickerung unter Szenario A2 .....	408
Entwicklung des Wasserhaushalt und der Versickerung unter Szenario B1 .....	410
Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz unter Szenario A2 .....	412
Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz unter Szenario B1 .....	414
Entwicklung der Waldbrandgefahr unter Szenario A2 .....	416
Entwicklung des Waldbrandgefahr unter Szenario B1.....	418
Waldwuchsgebiete und Waldwuchsbezirke in Sachsen-Anhalt .....	420
<b>Anhang zu Kapitel 3.5. Naturschutz .....</b>	<b>421</b>
Liste der FFH-Lebensraumtypen .....	421
Entwicklung der jährlichen Klimatischen Wasserbilanz .....	423
Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz im Winter .....	427
Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz im Sommer .....	431
Weiterführende Informationen zum Projekt „Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel - Risiken und Handlungs-optionen“ .....	435
<b>Anhang zu Kapitel 3.6: Phänologie .....</b>	<b>436</b>
Datenliste der Stationen.....	436
Zuordnung der Stationen des Naturraums Flusstäler und Niederungslandschaften	439
Veränderung der Phänologische Jahreszeiten der ausgewählten Stationen .....	440

Trend der Veränderung der Phänologischen Jahreszeiten der ausgewählten Stationen .....	442
Veränderung der Phänologische Jahreszeiten der Naturräume.....	446
Veränderung des Eintrittstermins der ausgewählten Phänologischen Phasen in Sachsen-Anhalt.....	448

# Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1.1.1: Hierarchischer Aufbau der Vulnerabilitätsstudie (Sensitivitätsstudie) Sachsen-Anhalt</i> .....	4
<i>Abb. 1.2.1: Vereinfachte und modifizierte Darstellung der bestimmenden Komponenten für eine Vulnerabilitätsanalyse</i> .....	7
<i>Abb. 1.3.1: Physische Geografie (links) und naturräumliche Gliederung (rechts) Sachsen-Anhalts</i> .....	8
<i>Abb. 2.1.1: Darstellung der Auswirkungen des Klimawandels</i> .....	12
<i>Abb. 2.1.2: Veränderung der globalen Mitteltemperatur im Zeitraum 1856-2005</i> .....	13
<i>Abb. 2.1.3: Atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration und globale Mitteltemperatur der letzten 400.000 Jahre (nach Petit et al. 1999)</i> .....	14
<i>Abb. 2.1.4: Vergleich aktueller Kohlenstoffdioxid(CO<sub>2</sub>)-Emissionen (schwarze Punkte) mit sechs IPCC-Szenarien (farbige Linien) und geschätzte Emissionen für das Jahr 2009 (rot) (Le Quéré et al. 2009) (1Petagramm (Pg)= 10<sup>9</sup> Tonnen)</i> .....	15
<i>Abb. 2.2.1: Globale Änderung der Oberflächentemperatur für die Antriebsszenarien B1 und A2 (IPCC 2007c)</i> 18	
<i>Abb. 2.2.2: Vergleich von Stabilisierungsszenarien, die das 2°C-Ziel (450 ppm) erreichen könnten (Meinshausen et al. 2009)</i> .....	18
<i>Abb. 2.3.1: Die Stationen des Modells WETTREG der Studie</i> .....	24
<i>Abb. 2.3.2: Die Gittermittelpunkte des Modells REMO der Studie</i> .....	25
<i>Abb. 2.4.1: Jahresmittel der Lufttemperatur im Basiszeitraum 1961-1990</i> .....	28
<i>Abb. 2.4.2: Durchschnittliche Jahresniederschlagssumme im Basiszeitraum 1961-1990</i> .....	29
<i>Abb. 2.4.3: Durchschnittliche jährliche klimatische Wasserbilanz (KWB) im Zeitraum 1961-1990, basierend auf Berechnungen des DWD</i> .....	30
<i>Abb. 2.5.1: Temperaturanomalie als Vergleich der Jahresmitteltemperaturen</i> .....	31
<i>Abb. 2.5.2: Temperaturanomalie als Vergleich der Jahresmitteltemperaturen</i> .....	32
<i>Abb. 2.5.3: Niederschlagsanomalie als Vergleich der Jahresniederschlagssummen</i> .....	33
<i>Abb. 2.5.4: Niederschlagsanomalie als Vergleich der Jahresniederschlagssummen</i> .....	33
<i>Abb. 2.5.5: Veränderung der Jahresmitteltemperatur [°C] in Sachsen-Anhalt</i> .....	36
<i>Abb. 2.5.6: Veränderung der Jahresniederschlagssumme [mm] in Sachsen-Anhalt</i> .....	38
<i>Abb. 2.5.7: Veränderung der Klimatischen Wasserbilanz [mm] in Sachsen-Anhalt</i> .....	40
<i>Abb. 2.5.8: Jahresverlauf der Klimavariablen Temperatur (Minimum, Mittel, Maximum), Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz</i> .....	43
<i>Abb. 2.5.9: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Anzahl an Eistagen (links) und Frosttagen (rechts) in Sachsen-Anhalt</i> .....	45
<i>Abb. 2.5.10: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Anzahl an Sommertagen (links) und Hitzetagen (rechts) in Sachsen-Anhalt</i> .....	45
<i>Abb. 2.5.11: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Anzahl an tropischen Nächten in Sachsen-Anhalt</i> .....	46
<i>Abb. 2.6.1: Vergleich der Jahresmitteltemperatur</i> .....	47
<i>Abb. 2.6.2: Vergleich der Jahresniederschläge</i> .....	47
<i>Abb. 2.7.1: Häufigkeitsverteilungen der mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten (links) und Tagesniederschläge (rechts) im Zeitraum 1961-1990 an der Station Brocken</i> .....	49
<i>Abb. 3.1.1: Mittlere jährliche Niederschläge 1961–1990</i> .....	55
<i>Abb. 3.1.2: Simulierte mittlere jährliche aktuelle Verdunstung 1961-1990</i> .....	56
<i>Abb. 3.1.3: Simulierte mittlere jährliche Grundwasserneubildung 1961-1990</i> .....	56
<i>Abb. 3.1.4: Signifikanz für eine Zunahme von Trockenperioden im Sommerhalbjahr (Krysanova et al. 2008)</i> ..	57
<i>Abb. 3.1.5: Signifikanz für eine Zunahme von Starkniederschlagsereignissen im Winterhalbjahr (Krysanova et al. 2008)</i> .....	58
<i>Abb. 3.1.6: Verwendete räumliche Informationen für die hydrologischen Simulationen</i> .....	61

<i>Abb. 3.1.7: Korrektur der REMO-Daten einer ausgewählten Rasterzelle in Sachsen-Anhalt</i> .....	63
<i>Abb. 3.1.8: Beobachteter Niedrigwasserabfluss am Saalepegel Calbe, um den Einfluss von anthropogenen Zuleitungen bereinigter Niedrigwasserabfluss und Schneetage im Saalegebiet ((Wechsung et al. 2009) in Bearbeitung) (NQ - Niedrigwasser).</i> .....	64
<i>Abb. 3.1.9: Simulierter und beobachteter Abfluss am Pegel Neu Darchau (Elbe) 1961–1990</i> .....	65
<i>Abb. 3.1.10: Simulierter und beobachteter Abfluss am Pegel Calbe (Saale) 1961–1990</i> .....	66
<i>Abb. 3.1.11: Simulierter und beobachteter Abfluss am Pegel Hadmersleben (Bode) 1981–1990</i> .....	66
<i>Abb. 3.1.12: Abflussentwicklung der Saale</i> .....	67
<i>Abb. 3.1.13: Abflussentwicklung der Saale</i> .....	68
<i>Abb. 3.1.14: Abflussentwicklung der Bode</i> .....	69
<i>Abb. 3.1.15: Abflussentwicklung der Bode</i> .....	70
<i>Abb. 3.1.16: Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 1, Szenario A1B</i> .....	71
<i>Abb. 3.1.17: Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 2, Szenario A1B</i> .....	72
<i>Abb. 3.1.18: Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 3, Szenario A1B</i> .....	72
<i>Abb. 3.1.19: Änderung in der Grundwasserneubildung (GWNB), Szenarioperiode 1, Szenario A1B</i> .....	73
<i>Abb. 3.1.20: Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 2, Szenario A1B</i> .....	74
<i>Abb. 3.1.21: Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 3, Szenario A1B</i> .....	74
<i>Abb. 3.1.22: Anzahl der Tage mit weniger Abfluss als durchschnittlich 20 m<sup>3</sup> pro Sekunde für die drei Zeitscheiben und drei WETTREG-Szenarien</i> .....	75
<i>Abb. 3.1.23: Änderung der Abflüsse unter REMO-Klima für die Elbe am Pegel Neu Darchau (links) und für die Saale am Pegel Calbe (rechts) unter den Klimaszenarien A2, A1B, und B1</i> .....	76
<i>Abb. 3.1.24: Änderung der Abflüsse unter REMO-Klima für die Bode am Pegel Hadmersleben unter den Klimaszenarien A2, A1B, und B1</i> .....	77
<i>Abb. 3.1.25: Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 1, Szenario A1B</i> .....	78
<i>Abb. 3.1.26: Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 2, Szenario A1B</i> .....	79
<i>Abb. 3.1.27: Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 3, Szenario A1B</i> .....	79
<i>Abb. 3.1.28: Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 1, Szenario A1B</i> .....	80
<i>Abb. 3.1.29: Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 2, Szenario A1B</i> .....	80
<i>Abb. 3.1.30: Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 3, Szenario A1B</i> .....	81
<i>Abb. 3.1.31: Änderung der Niederschläge, simuliert durch das regionale Klimamodell REMO</i> .....	81
<i>Abb. 3.1.32: Änderung der mittleren Abflussbildung in der Elbe unter STAR-Szenariobedingungen (A1B) für den Zeitraum 2046–2055 (Hattermann et al. 2008)</i> .....	82
<i>Abb. 3.1.33: Mögliche Entwicklung der Hochwässer für bestimmte Wiederkehrintervalle unter WETTREG-Klimaszenarien</i> .....	84
<i>Abb. 3.1.34: Mögliche Entwicklung der Hochwasser für bestimmte Wiederkehrintervalle unter REMO-Klima (links Szenario A1B, rechts Szenario A2)</i> .....	85
<i>Abb. 3.1.35: Mögliche Entwicklung der Hochwasser für bestimmte Wiederkehrintervalle unter REMO-Klima (B1) in der Elbe, Bode und Saale</i> .....	86
<i>Abb. 3.1.36: Mögliche Entwicklung des jahreszeitlichen Auftretens der Hochwasser</i> .....	87
<i>Abb. 3.1.37: Änderung der mittleren Abflussbildung in der Weser unter STAR-Szenariobedingungen (A1B) für den Zeitraum 2046–2055 (Huang et al. 2009)</i> .....	88
<i>Abb. 3.1.38: Änderung der Abflüsse unter REMO-Klima (A1B) für die Elbe am Pegel Neu Darchau unter Berücksichtigung einer intensivierten Landwirtschaft</i> .....	89
<i>Abb. 3.1.39: Schematische Darstellung der Änderung des natürlichen Abflussregimes unter Temperaturanstieg in Mitteleuropa</i> .....	91
<i>Abb. 3.2.1: Bodenregionen in Sachsen-Anhalt (Kainz 1999)</i> .....	106
<i>Abb. 3.2.2: Ackerflächen und WETTREG-Stationen in Sachsen-Anhalt</i> .....	108
<i>Abb. 3.2.3: Tage mit Starkniederschlag im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A2, A1B, B1) in der Vergangenheit (a) und der Zukunft (b-d)</i> .....	111

Abb. 3.2.4: Tage mit Starkniederschlag im Jahr (Modell REMO, Szenario A2, A1B, B1) .....	112
Abb. 3.2.5: Relativer Index der potentiellen Gefährdung der Ackerflächen in Sachsen-Anhalt gegenüber Winderosion im Dezember-Januar, Mai-Juli und September-Oktober (Zeitraum 1961-1990, Modell WETTREG) .....	114
Abb. 3.2.6: Relativer Index der potentiellen Gefährdung der Ackerflächen in Sachsen-Anhalt gegenüber Winderosion im Dezember-Januar (in den Zeiträumen 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 nach dem Modell WETTREG unter Szenarien A2, A1B und B1) .....	116
Abb. 3.2.7: Relativer Index der potentiellen Gefährdung der Ackerflächen in Sachsen-Anhalt gegenüber Winderosion im Mai-Juli (in den Zeiträumen 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 nach dem Modell WETTREG unter Szenarien A2, A1B und B1) .....	117
Abb. 3.2.8: Relativer Index der potentiellen Gefährdung der Ackerflächen in Sachsen-Anhalt gegenüber Winderosion im September-Oktober (in den Zeiträumen 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 nach dem Modell WETTREG unter Szenarien A2, A1B und B1) .....	118
Abb. 3.3.1: Verlaufslinien und gleitende 7-Jahresmittel (links arithmetisch, rechts harmonisch) des Ertrages (links) und der Ertragsänderungsrate (rechts, Jahresertrag/Vorjahresertrag) von Winterweizen (a, b), Silomais (c, d) und Winterraps (e, f) in Sachsen-Anhalt .....	134
Abb. 3.3.2: Gliederung Sachsen-Anhalts in Boden-Klima-Räume .....	135
Abb. 3.4.1: Karte der betrachteten Flächen der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK-Flächen) in Sachsen-Anhalt .....	163
Abb. 3.4.2: Vergleich der gemessen und simulierten Bestandswerte Brusthöhendurchmesser (BHD) und Oberhöhe (HO) für den Bestand Klötze für den Zeitraum 1997 – 2006 .....	170
Abb. 3.4.3: Vergleich der gemessen und simulierten Bestandswerte Brusthöhendurchmesser (BHD) und Oberhöhe (HO) für den Bestand Nedlitz für den Zeitraum 1997-2006 .....	170
Abb. 3.4.4: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände im Wuchsgebiet Westprignitz- Altmärkisches Altmoränenland nach dem Modell WETTREG .....	174
Abb. 3.4.5: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände im Wuchsgebiet Westprignitz- Altmärkisches Altmoränenland nach dem Modell WETTREG .....	175
Abb. 3.4.6: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) der Kiefernbestände im Wuchsgebiet Westprignitz- Altmärkisches Altmoränenland nach dem Modell REMO .....	176
Abb. 3.4.7: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände im Wuchsgebiet Westprignitz- Altmärkisches Altmoränenland nach dem Modell REMO .....	176
Abb. 3.4.8: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände im Wuchsgebiet mittleres nordostdeutsches Altmoränenland nach dem Modell WETTREG (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt) .....	177
Abb. 3.4.9: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände im Wuchsgebiet mittleres nordostdeutsches Altmoränenland nach dem Modell WETTREG .....	178
Abb. 3.4.10: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände im Wuchsgebiet mittleres nordostdeutsches Altmoränenland nach dem Modell REMO (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt) .....	179
Abb. 3.4.11: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände im Wuchsgebiet mittleres nordostdeutsches Altmoränenland nach dem Modell REMO (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt) .....	179
Abb. 3.4.12: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Düben- Niederlausitzer Altmoränenland und der Harzregion nach dem Modell WETTREG (SN Sachsen, ST Sachsen-Anhalt) .....	180
Abb. 3.4.13: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Düben- Niederlausitzer Altmoränenland und der Harzregion nach dem Modell WETTREG (SN Sachsen, ST Sachsen-Anhalt) .....	181
Abb. 3.4.14: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Düben- Niederlausitzer Altmoränenland und der Harzregion nach dem Modell REMO (SN Sachsen, ST Sachsen-Anhalt) .....	182





Abb. 3.4.15: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Düben-Niederlausitzer Altmoränenland und der Harzregion nach dem Modell REMO (NI Niedersachsen, SN Sachsen, ST Sachsen-Anhalt).....	182
Abb. 3.4.16: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Hoher Fläming und Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland nach dem Modell WETTREG (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt).....	183
Abb. 3.4.17: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Hoher Fläming und Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland nach dem Modell WETTREG (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt).....	184
Abb. 3.4.18: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Hoher Fläming und Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland nach dem Modell REMO (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt).....	185
Abb. 3.4.19: Änderung des Stammholzzuwachses der Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Hoher Fläming und Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland nach dem Modell REMO (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt).....	185
Abb. 3.4.20: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Fichtenbestände im Wuchsgebiet Harz nach dem Modell WETTREG.....	186
Abb. 3.4.21: Änderung des relativen Stammholzzuwachse der Fichtenbestände im Wuchsgebiet Harz nach dem Modell WETTREG.....	187
Abb. 3.4.22: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Fichtenbestände im Wuchsgebiet Harz nach dem Modell REMO.....	188
Abb. 3.4.23: Änderung des relativen Stammholzzuwachse der Fichtenbestände im Wuchsgebiet Harz nach dem Modell REMO.....	188
Abb. 3.4.24: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Fichtenbestände in den Wuchsgebieten Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland und Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland nach dem Modell WETTREG (NI Niedersachsen, ST Sachsen-Anhalt, TH Thüringen) .....	189
Abb. 3.4.25 Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Fichtenbestände in den Wuchsgebieten Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland und Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland nach dem Modell WETTREG (NI Niedersachsen, ST Sachsen-Anhalt, TH Thüringen) .....	190
Abb. 3.4.26: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Fichtenbestände in den Wuchsgebieten Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland und Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland nach dem Modell REMO (NI Niedersachsen, ST Sachsen-Anhalt).....	191
Abb. 3.4.27: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Fichtenbestände in den Wuchsgebieten Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland und Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland, Modell REMO; Simulation unter den Szenarien A1B, A2, B1, Mittelwerte für alle Bestände eines Wuchsbezirkes (NI Niedersachsen, ST Sachsen-Anhalt) .....	191
Abb. 3.4.28: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die einzelnen Buchenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell WETTREG.....	192
Abb. 3.4.29: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der einzelnen Buchenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell WETTREG.....	193
Abb. 3.4.30: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die einzelnen Buchenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell REMO .....	194
Abb. 3.4.31: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der einzelnen Buchenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell REMO .....	194
Abb. 3.4.32: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die einzelnen Eichenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell WETTREG.....	196
Abb. 3.4.33: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der einzelnen Eichenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell WETTREG.....	196

Abb. 3.4.34: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die einzelnen Eichenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell REMO .....	197
Abb. 3.4.35: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der einzelnen Eichenbestände (Bestandes ID s. Tabelle 3.4.3) nach dem Modell REMO .....	198
Abb. 3.4.36: Gesamt-Kohlenstoffspeicherung [t C/ha] nach dem Modell WETTREG .....	202
Abb. 3.4.37: Gesamt-Kohlenstoffspeicherung [t C/ha] nach dem Modell WETTREG .....	203
Abb. 3.4.38: Gesamt-Kohlenstoffspeicherung [t C/ha] nach dem Modell REMO .....	205
Abb. 3.4.39: Gesamt-Kohlenstoffspeicherung [t C/ha] nach dem Modell REMO .....	206
Abb. 3.4.40: Klimatische Wasserbilanz [mm] nach dem Modell WETTREG .....	208
Abb. 3.4.41: Versickerung [mm] nach dem Modell WETTREG .....	210
Abb. 3.4.42: Klimatische Wasserbilanz [mm] nach dem Modell REMO .....	212
Abb. 3.4.43: Versickerung [mm] nach dem Modell REMO .....	214
Abb. 3.4.44: Klimatische Waldbrandgefahr nach dem Modell WETTREG .....	216
Abb. 3.4.45: Klimatische Waldbrandgefahr nach dem Modell REMO .....	218
Abb. 3.4.46: Monatlicher Mittel- und Spitzenwert der Windgeschwindigkeit in Magdeburg von Januar 1991 bis Juli 2009 .....	219
Abb. 3.4.47: Wichtige Einflussfaktoren auf die Windwurfgefährdung von Wäldern .....	221
Abb. 3.4.48: Waldverbreitung und Flächenanteile der Hauptbaumarten in Sachsen-Anhalt .....	223
Abb. 3.4.49: Verteilung der Substrateigenschaften der Waldböden .....	225
Abb. 3.4.50: Hydrologische Eigenschaften des Waldbodens .....	226
Abb. 3.4.51: Verteilung der pH-Werte der Waldböden .....	227
Abb. 3.4.52: Höhenlage der Waldflächen .....	228
Abb. 3.4.53: Hangabschattung gegenüber Westwind (a) und Exposition der Waldflächen (b) .....	229
Abb. 3.4.54: Hangneigung und Wölbung des Waldbodens .....	230
Abb. 3.4.55: Potentielle Sensitivität der Wälder in Sachsen-Anhalt gegenüber Sturmschäden .....	231
Abb. 3.4.56: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen im Tagesmittel und gemittelt über Sachsen-Anhalt und über 30 Jahre eine Windgeschwindigkeit von $\geq 4$ Bft auftritt .....	233
Abb. 3.4.57: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen im Tagesmittel und gemittelt über Sachsen-Anhalt für einen Zeitraum von 30 Jahren eine Windgeschwindigkeit von $\geq 6$ Bft auftritt .....	233
Abb. 3.5.1: Meldeanteil der NATURA 2000-Gebiete der Bundesländer im Jahr 2008 .....	249
Abb. 3.5.2: FFH-Schutzgebiete (grün) in Sachsen-Anhalt .....	252
Abb. 3.5.3: FFH-Schutzgebiete mit den Lebensraumklassen Gewässer (links) und Feuchtwiesen (rechts) .....	253
Abb. 3.5.4: FFH-Schutzgebiete mit den Lebensraumklassen Moor- und Auenwälder (links) sowie Gras- und Grünland (rechts) .....	253
Abb. 3.5.5: FFH-Schutzgebiete mit den Lebensraumklassen Wälder (links, ausgenommen Auen- und Moorwälder) und sowie Moore (rechts) .....	254
Abb. 3.5.6: FFH-Schutzgebiete mit den Lebensraumklassen Heiden (links) sowie Felsen und Schutthalden (rechts) .....	254
Abb. 3.5.7: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) im Jahr und FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (Modell WETTREG, Szenarien A2, A1B, B1) .....	259
Abb. 3.5.8: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) im Jahr und FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (Modell REMO, Szenarien A2, A1B, B1) .....	260
Abb. 3.5.9: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationsperiode (April-September) und FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (Modell WETTREG, Szenarien A2, A1B, B1) .....	261
Abb. 3.5.10: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationsperiode (April-September) und FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (Modell REMO, Szenarien A2, A1B, B1) .....	262
Abb. 3.5.11: Anteile der Kälte- und Feuchtezeiger nach (Ellenberg 1992) der lebensraum-charakteristischen Pflanzenarten .....	265



Abb. 3.5.12: FFH-Schutzgebiete „Drömling“ und „Grabensystem Drömling“ mit analysierter WETTREG-Station und REMO-Gittermittelpunkt (links) sowie Lage der FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (rechts).....	267
Abb. 3.5.13: Entwicklung der Tagesmitteltemperatur [°C] in den FFH-Schutzgebieten „Drömling“ und Grabensystem Drömling.....	268
Abb. 3.5.14: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationsperiode (April-September) in den FFH-Schutzgebieten „Drömling“ und Grabensystem Drömling.....	268
Abb. 3.6.1: Phänologische Uhr am Beispiel der Station Jerichow.....	278
Abb. 3.6.2: Phänologische Uhren von sieben ausgewählten Phänologischen Stationen.....	284
Abb. 3.6.3: Phänologische Uhren der vier untersuchten Naturräume Sachsen-Anhalts.....	286
Abb. 3.7.1: Weinbauflächen in Sachsen-Anhalt.....	293
Abb. 3.7.2: Haupt- und Niederschlagsstationen in Sachsen-Anhalt mit dem in Abb. 3.7.1 genutzten Ausschnitt.....	294
Abb. 3.7.3: Entwicklung des Huglin-Index am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für die Szenarien mit einer Erwärmung um 1,0K (o. li.), 1,5K (u. li.) bzw. 2,0K (o. re.) und für das Szenario A1B (u. re.)..	301
Abb. 3.7.4: Entwicklung des zeitlichen Ablaufes der phänologischen Phasen.....	302
Abb. 3.7.5: Entwicklung der Länge der jährlichen Vegetationsperiode.....	303
Abb. 3.7.6: Entwicklung der Häufigkeit des Auftretens von Schadfrösten am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für das Szenario A1B. ....	304
Abb. 3.7.7: Entwicklung der Häufigkeit des Auftretens von Spätfrösten am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für das Szenario A1B. ....	304
Abb. 3.7.8: Thermische Wachstumsbedingungen der Phasen Austrieb-Blüte und Blüte-Reife.....	305
Abb. 3.7.9: Thermische Bedingungen während der Reifephase.....	305
Abb. 4.1: Räumliche Synthese der Auswirkungen der zu erwartenden klimatischen Veränderungen auf die betrachteten Sektoren Sachsen-Anhalts, differenziert nach drei Großregionen sowie den Flüssen Bode, Elbe und Saale.....	310
Anhang Abb. 2.5.1: Mittlere Temperatur im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A2).....	319
Anhang Abb. 2.5.2: Mittlere Temperatur im Winter (Modell WETTREG, Szenario A2).....	320
Anhang Abb. 2.5.3: Mittlere Temperatur im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A2).....	320
Anhang Abb. 2.5.4: Mittlerer Niederschlag im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A2).....	321
Anhang Abb. 2.5.5: Mittlerer Niederschlag im Winter (Modell WETTREG, Szenario A2).....	321
Anhang Abb. 2.5.6: Mittlerer Niederschlag im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A2).....	322
Anhang Abb. 2.5.7: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A2).....	322
Anhang Abb. 2.5.8: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell WETTREG, Szenario A2).....	323
Anhang Abb. 2.5.9: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A2).....	323
Anhang Abb. 2.5.10: Mittlere Temperatur im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A1B).....	324
Anhang Abb. 2.5.11: Mittlere Temperatur im Winter (Modell WETTREG, Szenario A1B).....	324
Anhang Abb. 2.5.12: Mittlere Temperatur im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A1B).....	325
Anhang Abb. 2.5.13: Mittlerer Niederschlag im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A1B).....	325
Anhang Abb. 2.5.14: Mittlerer Niederschlag im Winter (Modell WETTREG, Szenario A1B).....	326
Anhang Abb. 2.5.15: Mittlerer Niederschlag im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A1B).....	326
Anhang Abb. 2.5.16: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A1B).....	327
Anhang Abb. 2.5.17: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell WETTREG, Szenario A1B).....	327
Anhang Abb. 2.5.18: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A1B).....	328
Anhang Abb. 2.5.19: Mittlere Temperatur im Jahr (Modell WETTREG, Szenario B1).....	328
Anhang Abb. 2.5.20: Mittlere Temperatur im Winter (Modell WETTREG, Szenario B1).....	329
Anhang Abb. 2.5.21: Mittlere Temperatur im Sommer (Modell WETTREG, Szenario B1).....	329
Anhang Abb. 2.5.22: Mittlerer Niederschlag im Jahr (Modell WETTREG, Szenario B1).....	330
Anhang Abb. 2.5.23: Mittlerer Niederschlag im Winter (Modell WETTREG, Szenario B1).....	330

Anhang Abb. 2.5.24: Mittlerer Niederschlag im Sommer (Modell WETTREG, Szenario B1) .....	331
Anhang Abb. 2.5.25: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell WETTREG, Szenario B1) .....	331
Anhang Abb. 2.5.26: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell WETTREG, Szenario B1) .....	332
Anhang Abb. 2.5.27: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell WETTREG, Szenario B1) .....	332
Anhang Abb. 2.5.28: Mittlere Temperatur im Jahr (Modell REMO, Szenario A2) .....	333
Anhang Abb. 2.5.29: Mittlere Temperatur im Winter (Modell REMO, Szenario A2) .....	334
Anhang Abb. 2.5.30: Mittlere Temperatur im Sommer (Modell REMO, Szenario A2) .....	334
Anhang Abb. 2.5.31: Mittlerer Niederschlag im Jahr (Modell REMO, Szenario A2) .....	335
Anhang Abb. 2.5.32: Mittlerer Niederschlag im Winter (Modell REMO, Szenario A2) .....	335
Anhang Abb. 2.5.33: Mittlerer Niederschlag im Sommer (Modell REMO, Szenario A2) .....	336
Anhang Abb. 2.5.34: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell REMO, Szenario A2) .....	336
Anhang Abb. 2.5.35: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell REMO, Szenario A2) .....	337
Anhang Abb. 2.5.36: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell REMO, Szenario A2) .....	337
Anhang Abb. 2.5.37: Mittlere Temperatur im Jahr (Modell REMO, Szenario A1B) .....	338
Anhang Abb. 2.5.38: Mittlere Temperatur im Winter (Modell REMO, Szenario A1B) .....	338
Anhang Abb. 2.5.39: Mittlere Temperatur im Sommer (Modell REMO, Szenario A1B) .....	339
Anhang Abb. 2.5.40: Mittlerer Niederschlag im Jahr (Modell REMO, Szenario A1B) .....	339
Anhang Abb. 2.5.41: Mittlerer Niederschlag im Winter (Modell REMO, Szenario A1B) .....	340
Anhang Abb. 2.5.42: Mittlerer Niederschlag im Sommer (Modell REMO, Szenario A1B) .....	340
Anhang Abb. 2.5.43: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell REMO, Szenario A1B) .....	341
Anhang Abb. 2.5.44: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell REMO, Szenario A1B) .....	341
Anhang Abb. 2.5.45: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell REMO, Szenario A1B) .....	342
Anhang Abb. 2.5.46: Mittlere Temperatur im Jahr (Modell REMO, Szenario B1) .....	342
Anhang Abb. 2.5.47: Mittlere Temperatur im Winter (Modell REMO, Szenario B1) .....	343
Anhang Abb. 2.5.48: Mittlere Temperatur im Sommer (Modell REMO, Szenario B1) .....	343
Anhang Abb. 2.5.49: Mittlerer Niederschlag im Jahr (Modell REMO, Szenario B1) .....	344
Anhang Abb. 2.5.50: Mittlerer Niederschlag im Winter (Modell REMO, Szenario B1) .....	344
Anhang Abb. 2.5.51: Mittlerer Niederschlag im Sommer (Modell REMO, Szenario B1) .....	345
Anhang Abb. 2.5.52: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell REMO, Szenario B1) .....	345
Anhang Abb. 2.5.53: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell REMO, Szenario B1) .....	346
Anhang Abb. 2.5.54: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell REMO, Szenario B1) .....	346
Anhang Abb. 2.5.55: Veränderung der mittleren Temperatur im Winter (Modell WETTREG) .....	348
Anhang Abb. 2.5.56: Veränderung der mittleren Temperatur im Sommer (Modell WETTREG) .....	349
Anhang Abb. 2.5.57: Veränderung des mittleren Niederschlags im Winter (Modell WETTREG) .....	350
Anhang Abb. 2.5.58: Veränderung des mittleren Niederschlags im Sommer (Modell WETTREG) .....	351
Anhang Abb. 2.5.59: Veränderung der mittleren Klimatischen Wasserbilanz im Winter (Modell WETTREG) .....	352
Anhang Abb. 2.5.60: Veränderung der mittleren Klimatischen Wasserbilanz im Sommer (Modell WETTREG) .....	353
Anhang Abb. 2.5.61: Veränderung der mittleren Temperatur im Winter (Modell REMO) .....	355
Anhang Abb. 2.5.62: Veränderung der mittleren Temperatur im Sommer (Modell REMO) .....	356
Anhang Abb. 2.5.63: Veränderung des mittleren Niederschlags im Winter (Modell REMO) .....	357
Anhang Abb. 2.5.64: Veränderung des mittleren Niederschlags im Sommer (Modell REMO) .....	358
Anhang Abb. 2.5.65: Veränderung der mittleren Klimatischen Wasserbilanz im Winter (Modell REMO) .....	359
Anhang Abb. 2.5.66: Veränderung der mittleren Klimatischen Wasserbilanz im Sommer (Modell REMO) .....	360
Anhang Abb. 2.5.67: Jahresverlauf ausgewählter Klimavariablen in Sachsen-Anhalt (Modell WETTREG, Szenario A2) .....	362
Anhang Abb. 2.5.68: Jahresverlauf ausgewählter Klimavariablen in Sachsen-Anhalt (Modell WETTREG, Szenario B1) .....	363
Anhang Abb. 2.5.69: Jahresverlauf ausgewählter Klimavariablen in Sachsen-Anhalt (Modell REMO, Szenario A2) .....	364

<i>Anhang Abb. 2.5.70: Jahresverlauf ausgewählter Klimavariablen in Sachsen-Anhalt (Modell REMO, Szenario B1)</i> .....	365
<i>Anhang Abb. 2.5.71: Mittlere Anzahl an Eistagen pro Jahr (WETTREG, Szenario A2)</i> .....	366
<i>Anhang Abb. 2.5.72: Mittlere Anzahl an Frosttagen pro Jahr (WETTREG, Szenario A2)</i> .....	366
<i>Anhang Abb. 2.5.73: Mittlere Anzahl an Sommertagen pro Jahr (WETTREG, Szenario A2)</i> .....	367
<i>Anhang Abb. 2.5.74: Mittlere Anzahl an Heißen Tagen pro Jahr (WETTREG, Szenario A2)</i> .....	367
<i>Anhang Abb. 2.5.75: Mittlere Anzahl an Tropischen Nächten pro Jahr (WETTREG, Szenario A2)</i> .....	368
<i>Anhang Abb. 2.5.76: Mittlere Anzahl an Eistagen pro Jahr (WETTREG, Szenario A1B)</i> .....	368
<i>Anhang Abb. 2.5.77: Mittlere Anzahl an Frosttagen pro Jahr (WETTREG, Szenario A1B)</i> .....	369
<i>Anhang Abb. 2.5.78: Mittlere Anzahl an Sommertagen pro Jahr (WETTREG, Szenario A1B)</i> .....	369
<i>Anhang Abb. 2.5.79: Mittlere Anzahl an Heißen Tagen pro Jahr (WETTREG, Szenario A1B)</i> .....	370
<i>Anhang Abb. 2.5.80: Mittlere Anzahl an Tropischen Nächten pro Jahr (WETTREG, Szenario A1B)</i> .....	370
<i>Anhang Abb. 2.5.81: Mittlere Anzahl an Eistagen pro Jahr (WETTREG, Szenario B1)</i> .....	371
<i>Anhang Abb. 2.5.82: Mittlere Anzahl an Frosttagen pro Jahr (WETTREG, Szenario B1)</i> .....	371
<i>Anhang Abb. 2.5.83: Mittlere Anzahl an Sommertagen pro Jahr (WETTREG, Szenario B1)</i> .....	372
<i>Anhang Abb. 2.5.84: Mittlere Anzahl an Hitzetagen pro Jahr (WETTREG, Szenario B1)</i> .....	372
<i>Anhang Abb. 2.5.85: Mittlere Anzahl an Tropischen Nächten pro Jahr (WETTREG, Szenario B1)</i> .....	373
<i>Anhang Abb. 2.5.86: Mittlere Anzahl an Eistagen pro Jahr (REMO, Szenario A2)</i> .....	374
<i>Anhang Abb. 2.5.87: Mittlere Anzahl an Frosttagen pro Jahr (REMO, Szenario A2)</i> .....	374
<i>Anhang Abb. 2.5.88: Mittlere Anzahl an Sommertagen pro Jahr (REMO, Szenario A2)</i> .....	375
<i>Anhang Abb. 2.5.89: Mittlere Anzahl an Heißen Tagen pro Jahr (REMO, Szenario A2)</i> .....	375
<i>Anhang Abb. 2.5.90: Mittlere Anzahl an Tropischen Nächten pro Jahr (REMO, Szenario A2)</i> .....	376
<i>Anhang Abb. 2.5.91: Mittlere Anzahl an Eistagen pro Jahr (REMO, Szenario A1B)</i> .....	376
<i>Anhang Abb. 2.5.92: Mittlere Anzahl an Frosttagen pro Jahr (REMO, Szenario A1B)</i> .....	377
<i>Anhang Abb. 2.5.93: Mittlere Anzahl an Sommertagen pro Jahr (REMO, Szenario A1B)</i> .....	377
<i>Anhang Abb. 2.5.94: Mittlere Anzahl an Heißen Tagen pro Jahr (REMO, Szenario A1B)</i> .....	378
<i>Anhang Abb. 2.5.95: Mittlere Anzahl an Tropischen Nächten pro Jahr (REMO, Szenario A1B)</i> .....	378
<i>Anhang Abb. 2.5.96: Mittlere Anzahl an Eistagen pro Jahr (REMO, Szenario B1)</i> .....	379
<i>Anhang Abb. 2.5.97: Mittlere Anzahl an Frosttagen pro Jahr (REMO, Szenario B1)</i> .....	379
<i>Anhang Abb. 2.5.98: Mittlere Anzahl an Sommertagen pro Jahr (REMO, Szenario B1)</i> .....	380
<i>Anhang Abb. 2.5.99: Mittlere Anzahl an Heißen Tagen pro Jahr (REMO, Szenario B1)</i> .....	380
<i>Anhang Abb. 2.5.100: Mittlere Anzahl an Tropischen Nächten pro Jahr (REMO, Szenario B1)</i> .....	381
<i>Anhang Abb. 3.1.1: Änderung in der Grundwasserneubildung (DIFF GWR), Periode 1, Szenario A2</i> .....	382
<i>Anhang Abb. 3.1.2: Änderung in der Grundwasserneubildung (DIFF GWR), Periode 2, Szenario A2</i> .....	382
<i>Anhang Abb. 3.1.3: Änderung in der Grundwasserneubildung (DIFF GWR), Periode 3, Szenario A2</i> .....	383
<i>Anhang Abb. 3.1.4: Änderung in der Grundwasserneubildung (DIFF GWR), Periode 1, Szenario B1</i> .....	383
<i>Anhang Abb. 3.1.5: Änderung in der Grundwasserneubildung (DIFF GWR), Periode 2, Szenario B1</i> .....	384
<i>Anhang Abb. 3.1.6: Änderung in der Grundwasserneubildung (DIFF GWR), Periode 3, Szenario B1</i> .....	384
<i>Anhang Abb. 3.1.7: Änderung in der Verdunstung (DIFF EVA), Periode 1, Szenario A2</i> .....	385
<i>Anhang Abb. 3.1.8: Änderung in der Verdunstung (DIFF EVA), Periode 2, Szenario A2</i> .....	385
<i>Anhang Abb. 3.1.9: Änderung in der Verdunstung (DIFF EVA), Periode 3, Szenario A2</i> .....	386
<i>Anhang Abb. 3.1.10: Änderung in der Verdunstung (DIFF EVA), Periode 1, Szenario B1</i> .....	386
<i>Anhang Abb. 3.1.11: Änderung in der Verdunstung (DIFF EVA), Periode 2, Szenario B1</i> .....	387
<i>Anhang Abb. 3.1.12: Änderung in der Verdunstung (DIFF EVA), Periode 3, Szenario B1</i> .....	387
<i>Anhang Abb. 3.1.13: Abflussspenden und Veränderung im Elbegebiet mit STAR-Klima</i> .....	388
<i>Anhang Abb. 3.2.1: Gegenwärtige potentielle Erosionsgefährdung der Böden durch Wasser</i> .....	389
<i>Anhang Abb. 3.2.2: Gegenwärtige potentielle Erosionsgefährdung der Mineralböden durch Wind</i> .....	390
<i>Anhang Abb. 3.2.3: Potentielle Winderosionsgefährdung der Bodenarten (A-Horizont) der Ackerflächen (Landnutzungs-kategorie AA nach CIR2005) in Sachsen-Anhalt</i> .....	390

Anhang Abb. 3.2.4: Tage mit mittleren Windgeschwindigkeiten $\geq 5,5$ m/s im Jahr (Modell WETTREG).....	391
Anhang Abb. 3.2.5: Trockene Tage im Jahr (Modell WETTREG).....	392
Anhang Abb. 3.2.6: Tage mit negativer KWB Tage im Jahr (Modell WETTREG) .....	393
Anhang Abb. 3.2.7: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Winter (Modell WETTREG, Szenario A2).....	394
Anhang Abb. 3.2.8: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Winter (Modell WETTREG, Szenario A1B) ...	394
Anhang Abb. 3.2.9: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Winter (Modell WETTREG, Szenario B1).....	395
Anhang Abb. 3.2.10: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Winter (Modell REMO, Szenario A2).....	395
Anhang Abb. 3.2.11: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Winter (Modell REMO, Szenario A1B) .....	396
Anhang Abb. 3.2.12: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Winter (Modell REMO, Szenario B1).....	396
Anhang Abb. 3.2.13: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A2)..	397
Anhang Abb. 3.2.14: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A1B) 397	
Anhang Abb. 3.2.15: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Sommer (Modell WETTREG, Szenario B1)..	398
Anhang Abb. 3.2.16: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Sommer (Modell REMO, Szenario A2) .....	398
Anhang Abb. 3.2.17: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A1B) 399	
Anhang Abb. 3.2.18: Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Sommer (Modell WETTREG, Szenario B1)..	399
Anhang Abb. 3.2.19: Veränderung der Anzahl an Tage mit Starkniederschlag im Winter (Modell WETTREG) 400	
Anhang Abb. 3.2.20: Veränderung der Anzahl an Tage mit Starkniederschlag im Winter (Modell REMO).....	401
Anhang Abb. 3.2.21: Veränderung der Anzahl an Tage mit Starkniederschlag im Sommer (Modell WETTREG)	
.....	402
Anhang Abb. 3.2.22: Veränderung der Anzahl an Tage mit Starkniederschlag im Sommer (Modell REMO)....	403
Anhang Abb. 3.4.1: Gesamter Kohlenstoff-Speicher und Veränderung des Kohlenstoffhaushaltes (Modell WETTREG, Szenario A2).....	404
Anhang Abb. 3.4.2: Gesamter Kohlenstoff-Speicher und Veränderung des Kohlenstoffhaushaltes (Modell REMO, Szenario A2). .....	405
Anhang Abb. 3.4.3: Gesamter Kohlenstoff-Speicher und Veränderung des Kohlenstoffhaushaltes (Modell WETTREG, Szenario B1).....	406
Anhang Abb. 3.4.4: Gesamter Kohlenstoff-Speicher und Veränderung des Kohlenstoffhaushaltes (Modell REMO, Szenario B1). .....	407
Anhang Abb. 3.4.5: Versickerung [mm] und prozentuale Veränderung (Modell WETTREG, Szenario A2).....	408
Anhang Abb. 3.4.6: Versickerung [mm] und prozentuale Veränderung (Modell REMO, Szenario A2).....	409
Anhang Abb. 3.4.7: Versickerung [mm] und prozentuale Veränderung (Modell WETTREG, Szenario B1).....	410
Anhang Abb. 3.4.8: Versickerung [mm] und prozentuale Veränderung (Modell REMO, Szenario B1).....	411
Anhang Abb. 3.4.9: Klimatische Wasserbilanz [mm] und zukünftige Veränderung (Modell WETTREG, Szenario A2). .....	412
Anhang Abb. 3.4.10: Klimatische Wasserbilanz [mm] und zukünftige Veränderung (Modell REMO, Szenario A2). .....	413
Anhang Abb. 3.4.11: Klimatische Wasserbilanz [mm] und zukünftige Veränderung (Modell WETTREG, Szenario B1). .....	414
Anhang Abb. 3.4.12: Klimatische Wasserbilanz [mm] und zukünftige Veränderung (Modell REMO, Szenario B1). .....	415
Anhang Abb. 3.4.13: Waldbrandgefahr Index nach Käse und zukünftige Veränderung (Modell WETTREG, Szenario A2). .....	416
Anhang Abb. 3.4.14: Waldbrandgefahr Index nach Käse und zukünftige Veränderung (Modell REMO, Szenario A2). .....	417
Anhang Abb. 3.4.15: Waldbrandgefahr Index nach Käse und zukünftige Veränderung (Modell WETTREG, Szenario B1). .....	418
Anhang Abb. 3.4.16: Waldbrandgefahr Index nach Käse und zukünftige Veränderung (Modell REMO, Szenario B1). .....	419
Anhang Abb. 3.4.17: Forstwuchsgebiete und Forstwuchsbezirke in Sachsen-Anhalt.....	420



Anhang Abb. 3.5.1: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A2) .....	423
Anhang Abb. 3.5.2: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A1B) .....	424
Anhang Abb. 3.5.3: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell WETTREG, Szenario B1) .....	424
Anhang Abb. 3.5.4: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell REMO, Szenario A2) .....	425
Anhang Abb. 3.5.5: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell REMO, Szenario A1B) .....	425
Anhang Abb. 3.5.6: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Jahr (Modell REMO, Szenario B1) .....	426
Anhang Abb. 3.5.7: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell WETTREG, Szenario A2) .....	427
Anhang Abb. 3.5.8: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell WETTREG, Szenario A1B) .....	428
Anhang Abb. 3.5.9: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell WETTREG, Szenario B1) .....	428
Anhang Abb. 3.5.10: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell REMO, Szenario A2) .....	429
Anhang Abb. 3.5.11: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell REMO, Szenario A1B) .....	429
Anhang Abb. 3.5.12: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Winter (Modell REMO, Szenario B1) .....	430
Anhang Abb. 3.5.13: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A2) .....	431
Anhang Abb. 3.5.14: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell WETTREG, Szenario A1B) .....	432
Anhang Abb. 3.5.15: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell WETTREG, Szenario B1) .....	432
Anhang Abb. 3.5.16: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell REMO, Szenario A2) .....	433
Anhang Abb. 3.5.17: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell REMO, Szenario A1B) .....	433
Anhang Abb. 3.5.18: Mittlere Klimatische Wasserbilanz im Sommer (Modell REMO, Szenario B1) .....	434
Anhang Abb. 3.6.1: Veränderung des Eintrittstermins der Phänologischen Phasen (Tage) an der Station Haldensleben. ....	442
Anhang Abb. 3.6.2: Veränderung des Eintrittstermins der Phänologischen Phasen (Tage) an der Station Jerichow.....	442
Anhang Abb. 3.6.3: Veränderung des Eintrittstermins der Phänologischen Phasen (Tage) an der Station Riestedt. ....	443
Anhang Abb. 3.6.4: Veränderung des Eintrittstermins der Phänologischen Phasen (Tage) an der Station Börnecke. ....	443
Anhang Abb. 3.6.5: Veränderung des Eintrittstermins der Phänologischen Phasen (Tage) an der Station Cröchern-Blätz. ....	444
Anhang Abb. 3.6.6: Veränderung des Eintrittstermins der Phänologischen Phasen (Tage) an der Station Heuckwalde-Giebelroth.....	444
Anhang Abb. 3.6.7: Veränderung des Eintrittstermins der Phänologischen Phasen (Tage) an der Station Zeit. .....	445
Anhang Abb. 3.6.8: Veränderung des Eintrittstermins der Phänologischen Phasen (Tag im Jahr) aller Stationen in Sachsen-Anhalt. ....	448
Anhang Abb. 3.6.9: Mittlere Veränderung des Eintrittstermins der Phänologischen Phasen (Tag im Jahr) aller Stationen in Sachsen-Anhalt. ....	449

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1.1: Wesentliche Eckpunkte der Studie .....	2
Tab. 2.3.1: Überblick über die in der Sachsen-Anhalt-Studie verwendeten Regionalen Klimamodelle .....	20
Tab. 2.3.2: Betrachtete meteorologische und hydrologische Zeiträume .....	27
Tab. 2.3.3: Definitionen ausgewählter Klimakenngrößen .....	27
Tab. 2.3.4: Definitionen der Klimakennstage in der Sachsen-Anhalt-Studie .....	27
Tab. 2.5.1: Klimatische Durchschnittswerte für das Land Sachsen-Anhalt nach WETTREG .....	34
Tab. 2.5.2: Klimatische Durchschnittswerte für das Land Sachsen-Anhalt nach REMO .....	34
Tab. 2.6.1: Durchschnittliche Abweichung der Modellergebnisse von REMO und WETTREG für die Variablen Temperatur und Niederschlag .....	48
Tab. 3.2.1: Durchschnittliche Anzahl an Tagen im Jahr mit Starkniederschlag in den Bodenregionen Sachsen- Anhalts .....	113
Tab. 3.2.2: Relativer Index für die potentielle Gefährdung der Bodenregionen in Sachsen-Anhalts durch Wassererosion (kleinster möglicher Indexwert: 0,3- sehr gering gefährdet; größter möglicher Indexwert: 5- sehr stark gefährdet) .....	113
Tab. 3.3.1: Zuordnung der Landkreise (2001) Sachsen-Anhalts zu Boden-Klima-Räumen .....	136
Tab. 3.3.2: Mittelwerte ( $\bar{y}$ ), Variabilitätskoeffizienten (V) und relative Ertragsänderung ( $\bar{y}'$ ) der Praxiserträge auf Landkreisebasis von Winterweizen, Raps und Silomais in den Boden-Klima-Räumen von Sachsen- Anhalt für den Zeitraum 1991-2006 .....	137
Tab. 3.3.3: Werte ausgewählter Klimagrößen von Boden-Klima Räumen für die Jahre 1991-2000 .....	137
Tab. 3.3.4: Klimavariablen des statistischen Modellansatzes mit Einheiten und Abkürzungen .....	139
Tab. 3.3.5: Zeitbezüge der in der Modellbildung für die Fruchtarten Winterweizen (WW), Winterraps (WRa) und Silomais (SM) genutzten Klimavariablen .....	139
Tab. 3.3.6: Relative Häufigkeit von signifikanten Klimavariablen in den Landkreismodellen für Winterweizen (WW) und Winterraps (WRa) .....	140
Tab. 3.3.7: Korrelationskoeffizienten zwischen simulierten und beobachteten Ertrags-änderungen für die Validierungsperiode 2001-2006 nach Boden-Klima-Räumen und für das Land Sachsen-Anhalt .....	141
Tab. 3.3.8: Modifizierende Wirkung des CO <sub>2</sub> -Düngungseffektes auf C3- und C4-Pflanzen für eine Spanne von relativen Ertragseffekten .....	145
Tab. 3.3.9: Folgen verschiedener SRES-Emissionsszenarien auf die atmosphärische CO <sub>2</sub> -Konzentration in ausgewählten Jahren des Szenarienzeitraumes nach dem Berner Modell .....	146
Tab. 3.3.10: Differenzen modellrelevanter Klimavariabler für <u>Winterweizen</u> im Vergleich der Zeiträume 2071-2100 und 1961-1990 je Boden-Klima-Raum (BKR) und das Land insgesamt für die Szenarien A2, A1B und B1 der Klimamodelle REMO und WETTREG (Abkürzungen s. Tab. 3.3.4 und Tab. 3.3.5) ..	147
Tab. 3.3.11: Differenzen modellrelevanter Klimavariabler für <u>Silomais</u> im Vergleich der Zeiträume 2071-2100 und 1961-1990 je Boden-Klima-Raum (BKR) und das Land insgesamt für die Szenarien A2, A1B und B1 der Klimamodelle REMO und WETTREG (Abkürzungen s. Tab. 3.3.4 und Tab. 3.3.5) .....	148
Tab. 3.3.12: Differenzen modellrelevanter Klimavariabler für <u>Winterraps</u> im Vergleich der Zeiträume 2071- 2100 und 1961-90 je Boden-Klima-Raum (BKR) und das Land insgesamt für die Szenarien A2, A1B und B1 der Klimamodelle REMO und WETTREG (Abkürzungen s. Tab. 3.3.4 und Tab. 3.3.5) .....	150
Tab. 3.3.13: Simulierte Ertragsänderungen (ohne CO <sub>2</sub> -Düngungseffekt) für Winterweizen (WW), Winterraps (WRa) und Silomais (SM) in den Boden-Klima Räumen (BKR) von Sachsen-Anhalt und das Land insgesamt (leere Zellen: keine valide Modellabschätzung möglich) .....	153
Tab. 3.4.1: Waldbrandgefährdungsklassen nach der Internationalen Skala (Käse 1969) .....	162
Tab. 3.4.2: Geographische Daten der betrachteten Level II-Flächen mit den zugeordneten Klimastationen ....	162

Tab. 3.4.3: Angaben zu den betrachteten Flächen der Ökologischen Waldzustands-kontrolle in Sachsen-Anhalt .....	164
Tab. 3.4.4: Die untersuchten Bestände und ihre forstlichen Wuchsgebiete und -bezirke .....	168
Tab. 3.4.5 Zusammenfassung der Standort-Initialisierungen für das Waldwachstums-modell 4C im Vergleich zu den gelieferten Bestandesdaten der NW-FVA (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt) (N Stammzahl, BHD Brusthöhendurchmesser, HO Oberhöhe, V Volumen, G Grundfläche).....	169
Tab. 3.4.6: Simulationsergebnisse für den Level II-Standort Klötze (1501).....	172
Tab. 3.4.7: Simulationsergebnisse für den Level II-Standort Nedlitz (1502).....	173
Tab. 3.4.8: Vergleich der Berechnungen der Nettoprimärproduktion der Baumarten .....	199
Tab. 3.4.9: Vergleich der Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Baumarten .....	200
Tab. 3.4.10: Minimale und maximale Änderungsraten [%] der gesamten Kohlenstoffspeicherung für die Zukunftsperioden im Vergleich zum Basiszeitraum 1961-1990.....	201
Tab. 3.4.11: Minimale und maximale Änderungsraten [%] der gesamten Kohlenstoffspeicherung für die Zukunftszeiträume im Vergleich zum Basiszeitraum 1961-1990 .....	204
Tab. 3.4.12: Minimal- und Maximalwerte der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz [mm] nach den Projektionen des Modells WETTREG.....	207
Tab. 3.4.13: Minimal- und Maximalwerte der Änderung der mittleren jährlichen Versickerung [%] nach den Projektionen des Modells WETTREG gegenüber dem Basiszeitraum 1961-1990.....	209
Tab. 3.4.14: Minimal- und Maximalwerte der mittleren, jährlichen, klimatischen Wasserbilanz [mm] nach den Projektionen des Modells REMO.....	211
Tab. 3.4.15: Minimal- und Maximalwerte der Änderung der mittleren jährlichen Versickerung [%] für Projektionen nach dem Modell REMO gegenüber dem Basiszeitraum 1961-1990 .....	213
Tab. 3.4.16 Mittlere Windgeschwindigkeit an Standorten in Sachsen-Anhalt .....	220
Tab. 3.4.17: Vergleich der mit WETTREG simulierten mittleren Windgeschwindigkeit im Zeitraum von 1961-1990 mit gemessenen Daten .....	232
Tab. 3.4.18: Potenzielle Windwurfgefährdung der Forstwuchsgebiete Sachsen-Anhalts.....	235
Tab. 3.5.1: Für die Analyse gebildete Sachsen-Anhalt-spezifische Lebensraumklassen und korrespondierende FFH-LRT (Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie) (Kodierung der FFH-LRT s. Anhang Tab. 3.5.1)(*prioritäre FFH-LRT).....	251
Tab. 3.5.2: Sensitivität der FFH-LRT gegenüber dem Klimawandel.....	266
Tab. 3.6.1: Mögliche Pflanzenindikatoren mit ihrer entsprechenden Phasenkennung (PK) .....	280
Tab. 3.7.1: Vergleich der meteorologischen Werte der Stationen Artern und Bad Kösen.....	295
Tab. 3.7.2: Huglin-Indizes für wichtige Sorten .....	296
Tab. 3.7.3: Einteilung der Rebphänologie in sechs Hauptphasen .....	298
Tab. 3.7.4: Weinbaulich relevante Klimagrößen .....	299
Anhang Tab. 1.1.1: Beteiligte am PIK und der CEC GmbH Potsdam.....	314
Anhang Tab. 1.1.2: Mitglieder des Projektbegleitenden Arbeitskreises (PAK) in Sachsen-Anhalt .....	315
Anhang Tab. 1.1.3: Weitere Ansprechpartner in Sachsen-Anhalt .....	315
Anhang Tab. 1.1.4: Verwendete Datensätze der Studie .....	316
Anhang Tab. 3.5.1: In Sachsen-Anhalt vorkommende Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie (FFH-LRT) (Gebietsstand Mai 2005, * prioritäre FFH-LRT) .....	421
Anhang Tab. 3.5.2: Vergleich der Daten und Methodik der des interaktiven Tools der BfN-Studie mit der LSA-Studie, Sektor Naturschutz.....	435
Anhang Tab. 3.6.1: Übersicht über die phänologischen Beobachtungsorte und Einordnung in Naturräume....	436
Anhang Tab. 3.6.2: Zuordnung der phänologischen Stationen im Naturraum Flusstäler und Niederungslandschaften.....	439
Anhang Tab. 3.6.3: Veränderung der phänologischen Jahreszeiten (Tage) der sieben ausgewählten Stationen. ....	440

<i>Anhang Tab. 3.6.4: Veränderung der phänologischen Jahreszeiten (Tage) der vier ausgewählten Naturräume Sachsen-Anhalts.....</i>	<i>446</i>
--	------------



## Textboxverzeichnis

<i>Box 2.2.1: Übersicht über ausgewählte Szenarien.....</i>	<i>17</i>
<i>Box 2.3.1: Das Klimamodell REMO .....</i>	<i>21</i>
<i>Box 2.3.2: Das Klimamodell WETTREG .....</i>	<i>22</i>
<i>Box 2.3.3: Das Klimamodell STAR.....</i>	<i>23</i>
<i>Box 3.1.1: Das ökohydrologische Modell SWIM .....</i>	<i>59</i>
<i>Box 3.1.2: Die mögliche Rolle der europäischen Rahmenrichtlinien in der Umsetzung der Anpassungsstrategien in der wasserwirtschaftlichen Planung.....</i>	<i>93</i>
<i>Box 3.1.3: Anpassungsempfehlungen zum Wassersektor.....</i>	<i>96</i>
<i>Box 3.1.4: Weiterführende Informationen.....</i>	<i>97</i>
<i>Box 3.2.1: Anpassungsempfehlungen im Bereich Boden .....</i>	<i>124</i>
<i>Box 3.2.2: Weiterführende Informationen zum Bodensektor .....</i>	<i>126</i>
<i>Box 3.3.1: Blauzungenkrankheit - eine Erscheinung des Klimawandels oder nicht? .....</i>	<i>156</i>
<i>Box 3.3.2: Anpassungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion .....</i>	<i>157</i>
<i>Box 3.3.3: Weiterführende Informationen zum Sektor Landwirtschaft .....</i>	<i>157</i>
<i>Box 3.4 1: Klimatische Waldbrandgefahr.....</i>	<i>161</i>
<i>Box 3.4.2: Anpassungsempfehlungen zur Forstwirtschaft .....</i>	<i>237</i>
<i>Box 3.4.3: Weiterführende Informationen zum Forstsektor.....</i>	<i>241</i>
<i>Box 3.5.1: Anpassungsempfehlungen.....</i>	<i>272</i>
<i>Box 3.5.2: Weiterführende Informationen zum Naturschutzsektor .....</i>	<i>273</i>
<i>Box 3.6.1: Handlungsempfehlungen zur Phänologie.....</i>	<i>289</i>
<i>Box 3.6.2: Weiterführende Informationen zur Phänologie .....</i>	<i>290</i>
<i>Box 3.7.1: Anpassungsempfehlungen zum Weinbau .....</i>	<i>308</i>
<i>Box 3.7.2: Weiterführende Informationen zum Weinbau .....</i>	<i>308</i>

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
4C	Waldwachstumsmodell FORESEE-FORESt Ecosystems in a changing environment des PIK
a	Jahr
A2, A1B, B1	Emissionsszenarien
ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
Abb	Abbildung
AG KW	Arbeitsgruppe Klimawandel Sachsen-Anhalt
ALFF	Amt für Landwirtschaft, Flurordnung und Forsten
AML	Altmoränenlandschaften
BAH	Büro für Angewandte Hydrologie Berlin
BASZ	Basiszeitraum 1961-1990 der Studie
BB	Brandenburg
BBCH-Code	Code des morphologischen Entwicklungsstadiums einer Pflanze im Weinbau, ausgegeben von der Biologischen Bundesanstalt, dem Bundessortenamt und der chemischen Industrie
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BCA	jährliche Bodenkohlenstoffakkumulation
BDF	Bodendauerbeobachtungsflächen
BFL	Bergbaufolgelandschaften
Bft	Beaufort (Maßeinheit der Windstärke)
BG	Breitengrad
BGBI	Bundesgesetzblatt
BHD	Brusthöhendurchmesser
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEVL	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BTV	Blauzungenkrankheit
BUEK	Bodenübersichtskarte
BZE	Bodenzustandserhebung
C	Kohlenstoff
CCLM	COSMO-CLM, regionales, dynamisches Modell
CDO	Climate Data Operator (Software zur Analyse von Klimadaten)
CEC	Climate & Environment Consulting (CEC) Potsdam GmbH
CH <sub>4</sub>	Methan
CMIP	Coupled Modell Intercomparison Project
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> -Äq.	Kohlenstoffdioxidäquivalent (anthropogene Treibhausgase und Aerosole, umgerechnet von den entsprechenden Strahlungsantrieben)
CORINE	Landbedeckungsklassifikation nach CORINE-Landcover
DGM	Digitales Geländemodell
d/a	Tage im Jahr
d/Jahr	Tage/Jahr
DE	Dessau
DJF	Dezember-Januar-Februar (meteorologischer Winter)
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg
DLR-DFD	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt- Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
DWD	Deutscher Wetterdienst
EC	Europäische Kommission (European Commission)
ECHAM5/MPI-OM	Globales Zirkulationsmodell des Max-Planck-Instituts (MPI) für Meteorologie, Hamburg
ETP	Potentielle Evapotranspiration
EU	Europäische Union
EU27	Europäische Union auf Basis der 27 Mitgliederstaaten
EU SPA	Schutzgebiete nach EU SPA-RL
EU SPA-RL	Richtlinie 79/409/EWG des Europäischen Rates über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten (Vogelschutz-Richtlinie)
EVA	Verdunstung
EZG	Einzugsgebiet
FFH-LRT	Lebensraumtyp nach der FFH-RL
FFH-RL	Richtlinie 92/43/EWG des Europäischen Rates zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen (Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie)

FFH-Schutzgebiete	Schutzgebiete nach der FFH-RL
FKZ	Förderkennzeichen
FL	Flusslandschaften
FSME	Frühsommer-Meningoenzephalitis
G	Grundfläche
GB	gesamte Biomasse
GC	Gesamt-Kohlenstoff
GCM	Allgemeines Zirkulationsmodell (Globales Klimamodell)
GDV	Gesamtverband Deutscher Versicherungen
GIS	Geographisches Informationssystem
GP	Gittermittelpunkte des dynamischen Klimamodells REMO
GWNB	Grundwasserneubildung
GWR	Rate der Grundwasserneubildung
H	Höhe
ha	Hektar
HAD	Hydrologischer Atlas Deutschland
HAL	Halle (Saale)
HO	Oberhöhe
HQ	Hochwasser
IDP2006	Integriertes Diagnose- und Präsentationstool 2006
IDW	Inverse Distance Weigthing (Interpolationsverfahren)
IPCC	Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change)
JJA	Juni-Juli-August (meteorologischer Sommer)
JML	Jungmoränenlandschaften
K	Kelvin
KW	Klimawandel
KWB	Klimatische Wasserbilanz
LAGB	Landesanstalt für Geologie und Bergwesen in Sachsen-Anhalt
LAI	Blattflächenindex (Leaf Area Index)
LAU	Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
LG	Längengrad
LLFG	Landesanstalt für Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Gartenbau
LR-Klassen	Klassifikation von Lebensraumtypen, wie sie innerhalb der LSA-Studie entwickelt wurde
LSA	Land Sachsen-Anhalt
LSA-Studie	Vulnerabilitätsstudie Sachsen-Anhalt
m/s	Meter pro Sekunde
Max	Maximum
MBHL	Mesozoische Berg- und Hügelländer mit Löss
MD	Magdeburg
Min	Minimum
MLU	Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt
MPI	Max-Planck-Institut in Hamburg
Mrd.	Milliarden
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nord-Rhein-Westfalen
M ü. NN	Meter über Normalnull
MV	Mecklenburg-Vorpommern
N	Stammzahl
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid
NA	Abweichung N von dem Wert für STAR (s. Kap. 3.4.)
NATURA 2000-Schutzgebiete	Netzwerk aus Schutzgebieten, welches die Gebiete der FFH-Richtlinie und der Vogelschutzrichtlinie umfasst
NC	New York
NI	Niedersachsen
NPP	Nettoprimärproduktion
NR	Nummer
NS	Niederschlag
NV-FVA	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
NQ	Niedrigwasser
o. li.	oben links
o. re.	oben rechts
OH	Oberhöhe
ÖWK	Ökologische Waldzustandskontrolle
P1	Szenarienperiode 1 der Studie: 2011-2040
P2	Szenarienperiode 2 der Studie: 2011-2040
P3	Szenarienperiode 3 der Studie: 2011-2040
p <sub>0</sub>	Mittel des Dampfdrucks [hPa]
PAK	Projektbegleitender Arbeitskreis der Studie in Sachsen-Anhalt
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
PK	Phasenkennung
PMB	Paläozoische Mittelgebirge und Bergländer

PNV	Potentielle Natürliche Vegetation
P <sub>p</sub>	Summe Niederschlag [mm]
ppm	(parts per million) Teilchen pro Million Maßeinheit der Treibhausgase
Q	Summe Globalstrahlung [J·m <sup>-2</sup> ]
R	Strahlung
r <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
RCM	Regionales Klimamodell (Regional Climate Modell)
Relf	Relative Luftfeuchte [%]
REMO	Regionales, dynamisches Klimamodell
r <sub>H</sub>	Mittel der relativen Luftfeuchte [%]
rSZ	Relativer Stammholzzuwachs
S	Sicherheitswahrscheinlichkeit (beim zweiseitigen Student-T-Test)
SDL	Stendal
Sens_F	Sensitivität aufgrund der Anteile an Feuchtezeigern nach Ellenberg (1992)
Sens_T	Sensitivität aufgrund der Anteile an Kältezeigern als Temperaturzeigern nach Ellenberg (1992)
SM	Silomais
SN	Sachsen
SNS	Starkniederschlag
SRES	Special Report on Emission Scenarios
ST	Sachsen-Anhalt
STAR II	Regionales statistisches Klimamodell
Str	Globalstrahlung
SWIM	Ökohydrologisches Modell (Kap. 1.3)
SZ	Stammholzzuwachs
t C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	Tonnen Kohlenstoff pro Hektar und Jahr
Tg	Terragramm (10 <sup>15</sup> g, 10 <sup>9</sup> Tonnen)
Temp	Temperatur, Tagesmittel der Lufttemperatur
T <sub>emp</sub>	Empirischer T-Wert des Student T-Signifikanztests
TH	Thüringen
Tmax	Tagesmaximum der Lufttemperatur [°C]
Tmit	Tagesdurchschnitt der Lufttemperatur [°C]
Tmin	Tagesminimum der Lufttemperatur [°C]
Tsum	Temperatursumme mit T >6°C
Tsw	Temperaturspannweite
UBA	Umweltbundesamt
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
u.li.	unten links
u.re	unten rechts
V	Volumen
v. l. n. r.	von links nach rechts
WB	Wuchsbezirk (Forst)
WBB	Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz
WBI	Mittlerer Waldbrandindex
WETTREG	Regionales statistisches Klimamodell
WG	Wuchsgebiet (Forst)
WMO	Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization)
WRa	Winteraps
WW	Winterweizen
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

# 1. Einleitung

Klimawandel ist ein globales Phänomen mit äußerst komplexen und unterschiedlichen Ausprägungen auf regionaler oder lokaler Ebene. Die Veröffentlichung des mittlerweile 4. Sachstandsberichts des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC 2007a, IPCC 2007b und IPCC 2007c) trug erheblich dazu bei, die öffentliche Wahrnehmung hinsichtlich des Themas Klimawandel zu sensibilisieren. Auch wenn die Auswirkungen nicht immer eindeutig dem Klimawandel zuzuordnen sind, passen viele Ereignisse nach aktuellem Wissenstand in das Gesamtbild eines sich verändernden Klimas ein. Beispiele hierfür sind unter anderem die Oderflut 1997, die Elbeflut 2002 (vgl. Petrow & Merz 2009), das Hitzejahr 2003 (Beniston 2004; Luterbacher et al. 2004; Stott et al. 2004; Rebetez et al. 2006), oder auch der extrem schneearme Winter 2007/2008. Solche Phänomene haben sehr komplexe und teils erhebliche soziale, ökologische und ökonomische Konsequenzen. So sind beispielsweise insbesondere ältere Menschen aufgrund von Kreislaufproblemen in erhöhtem Maße von Hitzewellen betroffen (Klinenberg 2002); auch nimmt die Unfallhäufigkeit im Straßenverkehr während Hitzeperioden zu (Arminger et al. 1996). Steigende Temperaturen beeinflussen zudem die natürliche Vegetation, u.a. die Kohlenstoffspeicherfähigkeit (Ciais et al. 2005). Auch die europäische Energieindustrie musste in den extremen Hitzesommern 2003 und 2006 ihre Kraftwerkskapazitäten drosseln (Kanter 2007; Müller et al. 2007). Neue Ergebnisse zeigen, in welcher Größenordnung sich ökonomische Verluste im Energiesektor zukünftig bewegen können (Förster & Lilliestam 2009).

Klimawandel beschränkt sich allerdings nicht ausschließlich auf das verstärkte Auftreten extremer Wetterphänomene, sondern zeigt sich vor allem in langfristigen prozessualen Veränderungen mit mikro- und makroökonomischen Konsequenzen. So haben z.B. die beschleunigte Zunahme alpiner Gletscherschmelze und die Abnahme der saisonalen Schneedeckung einschneidende Folgen für Liftbetreiber, da sich deren ökonomische Grundlage aufgrund veränderter klimatischer Rahmenbedingungen reduziert (Zemp et al. 2006; OECD 2007). Zukünftig muss womöglich noch mit einer Beschleunigung globaler und regionaler Klimaveränderungen gerechnet werden, daher ist die Identifikation von verwundbaren Regionen oder Sektoren für eine Zukunftsplanung obligatorisch (vgl. auch Baettig et al. 2007; Kropp & Daschkeit 2008). Ausgangspunkt für die Entwicklung, Selektion und Etablierung potentiell geeigneter Gegenmaßnahmen und Handlungsoptionen als Reaktion auf bestimmte Auswirkungen ist ein adäquater Informationsstand bezüglich regionaler, lokaler bzw. sektoraler Auswirkungen veränderter klimatischer Rahmenbedingungen. Primäres Ziel der vorliegenden Studie ist deshalb eine Analyse der Anfälligkeiten verschiedener Sektoren im Land Sachsen-Anhalt unter Berücksichtigung der regionalen und lokalen Charakteristika.

## 1.1. Rahmenbedingungen und Vorgehensweise der Studie "Klimawandel in Sachsen-Anhalt"

Aufbauend auf Studien, welche sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Sachsen-Anhalt befassen (Franke et al. 2006; LAU 2007; Bernhofer et al. 2008; LAU 2008), initiierte das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt im Oktober 2008 die Durchführung der vorliegenden Studie, um einerseits Klimawirkungen auf ausgewählte Sektoren zu untersuchen und weiteren Forschungsbedarf zu evaluieren, sowie andererseits bereits mögliche Handlungsoptionen aufzuzeigen (für einen Überblick der wesentlichen Bestandteile der Studie, vgl. Tab. 1.1.1). Um eine möglichst effiziente Nutzung der Studienergebnisse durch die Institutionen in Sachsen-Anhalt zu sichern, erfolgte während der Projektlaufzeit eine Beratung durch den projektbegleitenden Arbeitskreis (PAK) der Studie in Sachsen-Anhalt<sup>1</sup>. Eine zu Beginn geplante Erweiterung der Studie hinsichtlich des Energiesektors konnte nicht umgesetzt werden. Dennoch sollte der Energiesektor klimabedingte Veränderungen in zukünftige Planungen mit einbeziehen, um Ausfälle und Verluste zu vermeiden (vgl. Förster & Lilliestam 2009). Eine weitergehende Erforschung dieses Sektors ist daher anzuraten.

**Tab. 1.1.1: Wesentliche Eckpunkte der Studie**

Eckpunkte der vorliegenden Studie			
Projektzeitraum	Oktober 2008 – November 2009		
Auftraggeber	Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt		
Ziel	Aufzeigen von Vulnerabilitäten (Sensitivitäten) ausgewählter Sektoren gegenüber dem Klimawandel sowie von Untersuchungsbedarf und Handlungsoptionen		
Untersuchte Bereiche	Wasser, Boden, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz, Phänologie, Weinanbau		
Analysierte Zeiträume	Vergangenheit	1961-1990 <sup>2</sup>	Basiszeitraum (BASZ)
	Zukunft	2011-2040	Periode 1 (P1)
		2041-2070	Periode 2 (P2)
		2071-2100	Periode 3 (P3)
Klimawandel	Regionale Klimamodelle	Statistisch	WETTREG (STAR II <sup>3</sup> )
		Dynamisch	REMO
	Emissionsszenarien	A2, A1B, B1	

Parallel zur Studie bezüglich der Verletzlichkeiten ausgewählter Sektoren gegenüber den Folgen des Klimawandels am PIK hat die Landesregierung Sachsen-Anhalts den Entwurf einer Anpassungsstrategie für das Land erarbeitet und dazu vom 23.09. – 10.11.2009 eine öffentliche Anhörung durchgeführt.

<sup>1</sup> Für eine Übersicht der an der Studie beteiligten Personen und der verwendeten Daten siehe Anhang zu Kapitel 1.1

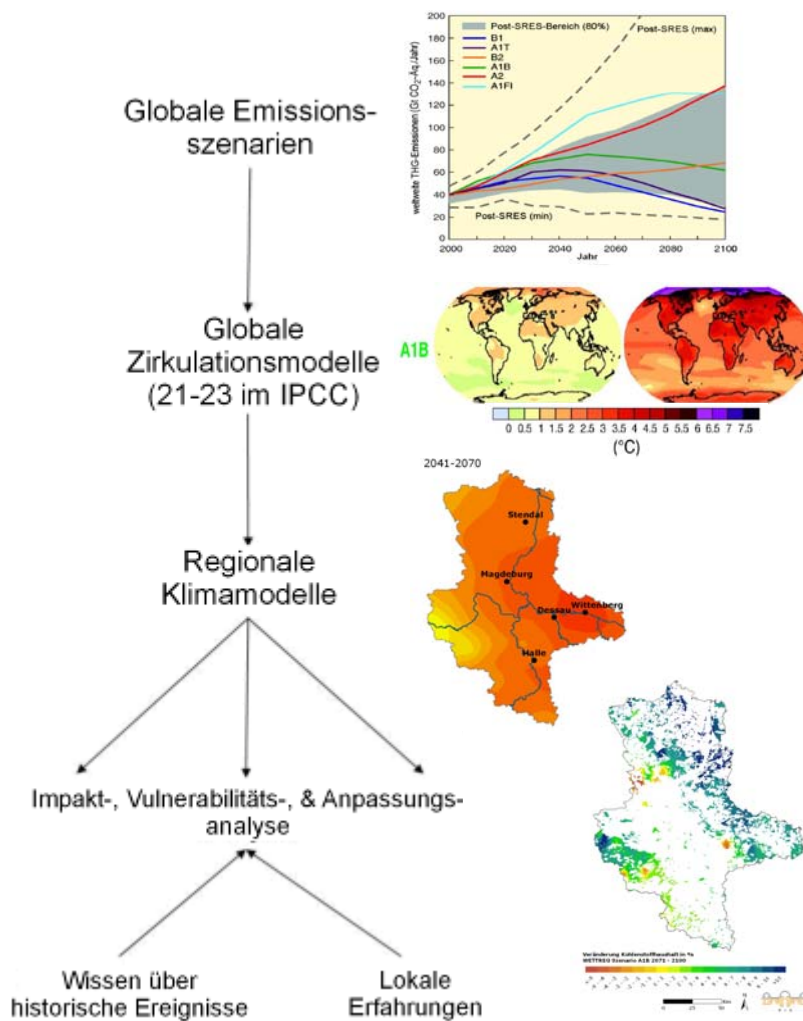
<sup>2</sup> Aufgrund der Datenlage wird ggfls. ein anderer Vergleichszeitraum als der sonst übliche Basiszeitraum 1961-1990 in Bezug gesetzt, worauf entsprechend hingewiesen wird.

<sup>3</sup> Einige Sektoren verwenden in der Studie das Klimamodell STAR II, entweder anstatt WETTREG oder REMO, oder zusätzlich zu diesen (vergleiche dazu die Modellbeschreibungen in Kapitel 2.3).

Die Vulnerabilitätsstudie Sachsen-Anhalt folgt insgesamt einem hierarchischen Schema für Wirkungsstudien (Abb. 1.1.1). Hierbei wird von den Emissionsszenarien (SRES-Szenarien) (vgl. Kapitel 2.2) des Weltklimarates IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ausgegangen, welche durch globale Klimamodelle in Klimaprojektionen übersetzt werden. Um von diesen Allgemeinen Zirkulationsmodellen (General Circulation Models GCMs) auf die Skala einer zu untersuchenden Region, z.B. Sachsen-Anhalt, zu gelangen, erfolgt ein Herunterskalieren (downscaling) dieser Modelle. Ausgehend von diesen regionalen Klimaprojektionen erfolgt schließlich die Wirkungsanalyse (Impaktanalyse) für die ausgewählten Sektoren.

Die Erkenntnisse dieser Studien können Entscheidungsträger vor Ort unterstützen, eine Anpassungsstrategie an den potentiell auftretenden Klimawandel zu entwickeln sowie Hinweise bezüglich Risiken, aber auch Chancen, geben. Hierbei sollte existierendes lokales Wissen sowie Erfahrungen über historische Ereignisse immer hinzugezogen werden. Legt man die Definition des IPCC zur Verwundbarkeit zu Grunde (siehe Abschnitt 1.2), dann ist die Berücksichtigung der Anpassungskapazität zwingend erforderlich. Dies wird bisher kaum in Studien berücksichtigt. Ansätze finden sich bei O'Brien et al. (2004), weil die Bestimmung der Anpassungskapazität detaillierter Analysen bedarf, um hemmende oder beschleunigende Mechanismen in einzelnen Sektoren zu identifizieren. Dieser Detaillierungsgrad war im Rahmen der Studie nicht leistbar. Daher stellt die vorliegende Untersuchung für das Land Sachsen-Anhalt eine Klimawirkungsanalyse dar, die spezifische Risiken für ausgewählte Sektoren abbildet und daher als eine reduzierte Vulnerabilitätsanalyse aufgefasst werden kann.

In Kapitel 2 werden Klima und Klimawandel in Sachsen-Anhalt untersucht auf Basis der Simulationsläufe, die mit Hilfe der Regionalmodelle WETTREG und REMO generiert wurden (UBA 2007). Dabei werden drei SRES-Szenarien, A2, A1B und B1, für die Zeiträume 1961-1990 (Basiszeitraum, BASZ) sowie die zukünftigen Perioden 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (P1, P2, P3) betrachtet. Im Folgenden schließen sich in Kapitel 3 die Untersuchungen zur jeweiligen Klimawirkung in den ausgewählten Sektoren an. Das Kapitel 4 synthetisiert anschließend die Ergebnisse der Sektoranalysen.



**Abb. 1.1.1: Hierarchischer Aufbau der Vulnerabilitätsstudie (Sensitivitätsstudie) Sachsen-Anhalt.**

Die Struktur der Kapitel der einzelnen Sektoranalysen (Kap. 3.1 bis 3.7) gliedert sich wie folgt:

- Zu Beginn werden die Schlüsselergebnisse der Analyse des entsprechenden Sektors vorgestellt.
- Der Schwerpunkt der Kapitel liegt auf der Wirkungsanalyse. Hier werden Daten und Methodiken plausibilisiert und die Ergebnisse eingehend interpretiert.
- Abschließend widmen sich die Kapitel dem Aufzeigen möglicher Handlungsoptionen, ohne jedoch eine Strategie zu entwickeln, da dies bereits im Rahmen der Erarbeitung einer Anpassungsstrategie unter Federführung des Landes Sachsen-Anhalt erfolgt.
- Für weiterführende Informationen verweist eine Textbox am Ende der Kapitel auf Projekte und Informationsquellen bezüglich des Sektors und Klimawandel in Sachsen-Anhalt und der Bundesrepublik Deutschland hin.
- Um den Lesefluss zu erleichtern, wurden z.T. weitere Abbildungen als Anhang dem jeweiligen Kapitel zugeordnet.



## 1.2. Zum Begriff der Vulnerabilität

Der IPCC definiert Vulnerabilität/Verwundbarkeit wie folgt (IPCC 2008):

**Verwundbarkeit/Vulnerabilität** ist das Maß, zu dem ein System gegenüber nachteiligen *Auswirkungen der Klimaänderung*, einschließlich *Klimavariabilität* und Extremwerte, anfällig ist. Verwundbarkeit ist eine Funktion der Art, des Ausmaßes und der Geschwindigkeit der Klimaänderung und -schwankung, der ein System ausgesetzt ist, seiner *Sensitivität* und seiner *Anpassungskapazität* (IPCC 2007). Die in dieser Definition enthaltenen Termini werden folgendermaßen definiert:

- **Klimaänderung** bezieht sich auf jede Änderung des Klimas im Verlauf der Zeit, die aufgrund einer Änderung im Mittelwert (meist 30 Jahre) oder im Schwankungsbereich seiner Eigenschaften identifiziert werden kann und die über einen längeren Zeitraum von typischerweise Jahrzehnten oder, noch länger, andauert. Klimaänderungen können durch interne natürliche Schwankungen des Klimasystems, durch anthropogen verursachte Veränderungen (z.B. Emissionen durch Verwendung fossiler Brennstoffe, Landnutzungsänderungen), oder durch erdgebundene Antriebe, wie z.B. vulkanische Aktivitäten, oder - auf sehr langen Zeitskalen - auch durch Veränderungen der orbitalen Bahnparameter der Erde zustande kommen.
- **Auswirkungen der Klimaänderung** auf natürliche und menschliche Systeme: Je nach Einbeziehung von Anpassung, kann zwischen potenziellen und verbleibenden Auswirkungen unterschieden werden: Die potenziellen Auswirkungen umfassen alle Wirkungen, die bei einer projizierten Klimaänderung auftreten könnten, ohne die Berücksichtigung einer Anpassung. Verbleibende Auswirkungen sind diejenigen Auswirkungen einer Klimaänderung, die trotz einer Anpassung noch auftreten würden.
- **Klimavariabilität** bezieht sich auf Schwankungen des mittleren Zustandes und anderer statistischer Größen (wie Standardabweichungen, Vorkommen von Extremereignissen, etc.) des Klimas auf allen zeitlichen und räumlichen Skalen, die über einzelne Wetterereignisse hinausgehen.
- **Sensitivität** ist der Grad, zu dem ein System durch die Variabilität des Klimas oder durch eine Klimaveränderung beeinflusst wird, sei es negativ oder positiv. Eine Wirkung kann direkt sein (z.B. eine Veränderung des Ernteertrags als Reaktion auf eine Veränderung des Durchschnitts, der Bandbreite oder der Variabilität der Temperatur) oder indirekt (z.B. Schäden, die durch eine zunehmende Häufigkeit an Küstenüberflutungen aufgrund des Meeresspiegelanstiegs verursacht werden).
- **Anpassungskapazität**: „Die Gesamtheit der Fähigkeiten, Ressourcen und Institutionen eines Landes oder einer Region, um wirksame Maßnahmen zur Anpassung umzusetzen.“

Dabei ist Anpassung wie folgt definiert:

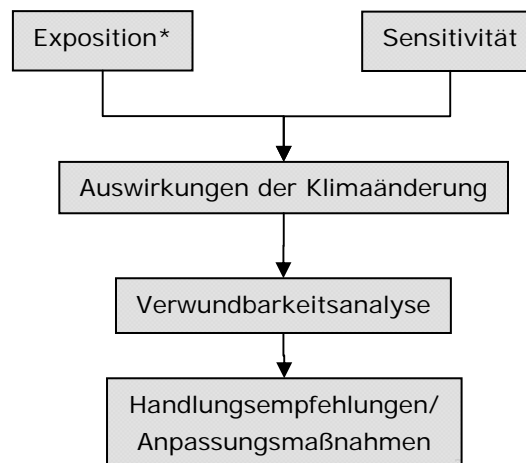
- **Anpassung**: Initiativen und Maßnahmen, um die Empfindlichkeit natürlicher und menschlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung zu verringern. Es können verschiedene Arten von Anpassungen unterschieden werden, darunter vorausschauende und reaktive, private und öffentliche, autonome und geplante Anpassung. Beispiele sind unter anderem die Erhö-

hung von Fluss- und Küstendeichen oder der Einsatz von Pflanzen, die z.B. besser mit Trockenphasen umgehen können (IPCC 2007).

Bei der Betrachtung von Risiken bezeichnet Vulnerabilität die Exposition und Sensitivität gegenüber durch Klimaänderungen verursachten bestimmten Auswirkungen, z.B. die Zunahme von Naturgefahren wie überfluteter Flächen durch Hochwasser oder Ernterückgang durch verstärkte Trockenheit. Der Begriff Vulnerabilität bezieht sich dabei zumeist auf physische Systeme und hat eher einen beschreibenden als erklärenden Charakter (Füssel & Klein 2006). Untersuchungen dieser Art hat es für Deutschland schon mehrfach gegeben (Zebisch et al. 2005; Kropp et al. 2006). Eine allgemein gültige Definition von Vulnerabilität existiert nicht, da Vulnerabilität eines Systems immer abhängig ist von der betrachteten Skala, den Analysefaktoren, den zugrundeliegenden definitorischen Konzepten und den klimatischen Stimuli. Eher integrierte Konzepte sind daher schwierig umsetzbar (vgl. Turner et al. 2003)

Bisher existiert kein allgemein akzeptiertes und geschlossenes mathematisches Konzept zur Definition der Vulnerabilität. Daraus ergibt sich auch, dass Messvorschriften nicht standardisiert sind und dass dadurch viele Studien oft nicht miteinander verglichen werden können. Erste Ansätze einer formalen Ausarbeitung existieren zwar (Ionescu et al. 2009), haben sich aber bisher nicht durchgesetzt.

Ziel jeder Vulnerabilitätsanalyse ist es letztlich, besonders risikoreiche Regionen oder Sektoren zu identifizieren (Kropp et al. 2006; Stock et al. 2009) und Analysekonzepte zur Anwendung zu bringen, die eine räumliche Vergleichbarkeit, z.B. auf der Ebene von Landkreisen oder Gemeinden, gewährleisten. Mit Bezug auf die Untersuchungen für Sachsen-Anhalt wird das vom IPCC definierte Vulnerabilitätskonzept nicht vollständig umgesetzt. Klimawandel ist ein stetiger Prozess, der auf äußerst unterschiedlichen Zeitskalen und mit stark variierender Ausprägung verlaufen kann. Risiko ist damit ebenso wie Anpassungskapazität eine dynamische Variable. Die Analysen für Sachsen-Anhalt beschreiten aus diesem Grund einen Mittelweg und bilden szenarioabhängig Klimawirkungen integriert und sektoral ab. So beruhen vorliegende Analysen zur Verletzlichkeit Sachsen-Anhalts gegenüber dem Klimawandel zwar grundsätzlich auf dem Konzept der Verletzlichkeit des IPCC (2007), orientieren sich aber im Wesentlichen an der sektorspezifischen naturräumlichen Exponiertheit Sachsen-Anhalts (Abb. 1.2.1 beschreibt die spezifischen Analyse-Komponenten für die Sachsen-Anhalt-Studie).



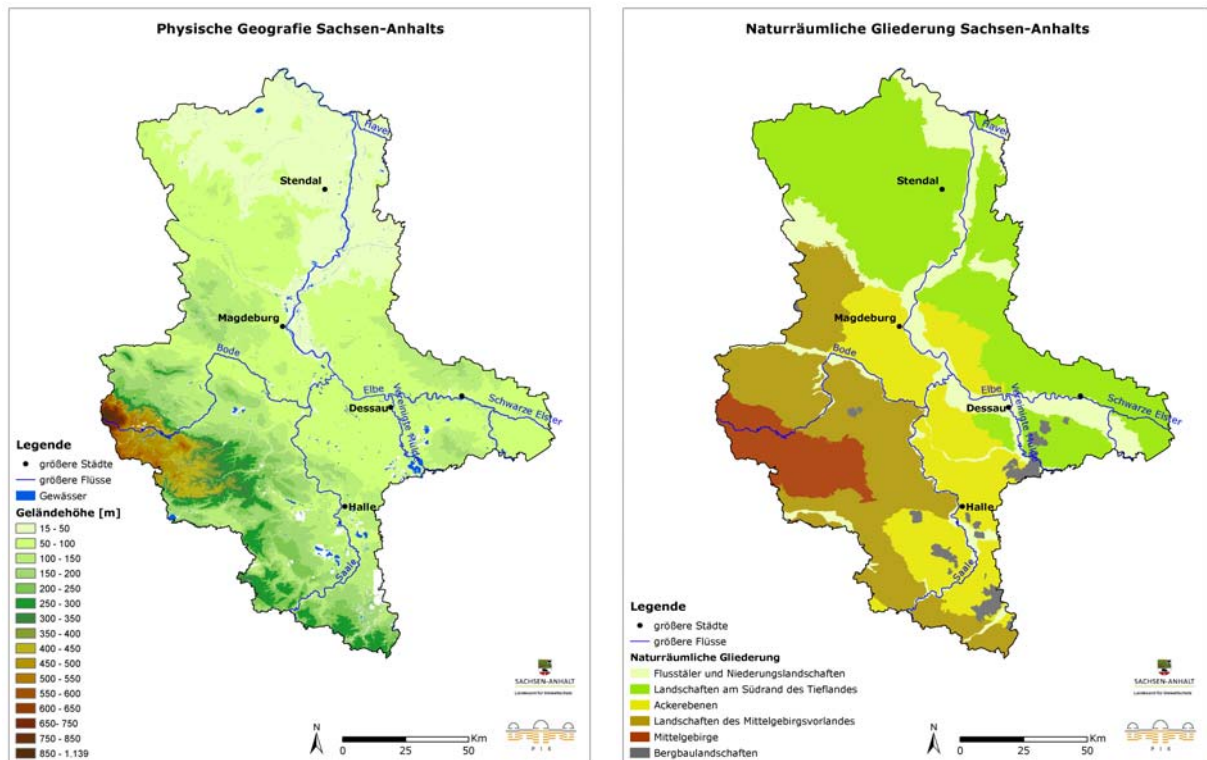
**Abb. 1.2.1: Vereinfachte und modifizierte Darstellung der bestimmenden Komponenten für eine Vulnerabilitätsanalyse**

**Die Darstellung ist an die Rahmenbedingungen der Sachsen-Anhalt Studie angepasst (nach Stock 2005; Füssel & Klein 2006; IPCC 2007)**

*\*Exposition gibt an, wie sehr eine bestimmte Region bzw. ihr soziales oder Ökosystem klimatisch bedingten Risiken ausgesetzt ist. Diese sind regional deutlich unterschiedlich ausgeprägt (BPB 2009).*

### 1.3. Das Bundesland Sachsen-Anhalt

Als Hintergrund zu den einzelnen Analysen ist in Abb. 1.3.1 die physische Geographie sowie die naturräumliche Gliederung Sachsen-Anhalts dargestellt. Sachsen-Anhalt ist mit einer Gesamtfläche von 20.445 km<sup>2</sup> das achtgrößte Bundesland Deutschlands und hat ca. 2,37 Mio. Einwohner (StaLA 2009). Die höchste Bevölkerungsdichte haben die südlichen und mittleren Regionen des Bundeslandes, Landeshauptstadt und Regierungssitz ist die Stadt Magdeburg. Die Topographie des Bundeslandes ist vielfältig. Ausgehend vom Tiefland im Norden des Landes steigt das Relief süd- und westwärts kontinuierlich an und erreicht auf dem Brockengipfel im Hochharz die größte Höhenlage (1.141 m ü. NN). Mittelgebirgscharakter besitzt in Sachsen-Anhalt ausschließlich der Harz, wobei der Unterharz und der Mittelharz (meist unter 500 m bzw. 650 m) deutlich niedrigere Höhenstufen aufweisen als der Hochharz (Hochflächen über 750 m). Die Altmark, am Südrand des Norddeutschen Tieflandes gelegen, weist als schwach reliefierte Altmoränenlandschaft großflächig Geländehöhen von unter 50 m ü. NN auf. Südwärts schließen sich das Tiefland mit der fruchtbaren Magdeburger Börde und die großen Ackerebenen Sachsen-Anhalts mit Geländehöhen bis zu 200 m ü. NN an. Am Südrand Sachsen-Anhalts gehen die Ackerebenen in das wellig-hügelige Relief des Mittelgebirgsvorlandes über, wo weiträumig Geländehöhen zwischen 150 und 200 m ü. NN erzielt werden. Darüber hinaus ist Sachsen-Anhalt auch durch ausgedehnte Flusstäler und Niederungslandschaften mit Höhen zwischen 50 und 150 m ü. NN charakterisiert. Dominierend ist hier vor allem das weite Elbtal, welches das östliche und nördliche Sachsen-Anhalt durchzieht.



**Abb. 1.3.1: Physische Geografie (links) und naturräumliche Gliederung (rechts) Sachsen-Anhalts**

## 1.4. Literatur

- Arminger, G., K. Bommert und T. Bonne (1996): "Einfluss der Witterung auf das Unfallgeschehen im Strassenverkehr." *Allgemeines Statistisches Archiv* 80(2): 181–206.
- Baettig, M. B., M. Wild und D. M. Imboden (2007): "A climate change index: Where climate change may be most prominent in the 21st century." *Geophysical Research Letters* 34(1).
- Beniston, M. (2004): "The 2003 heatwave in Europe. A shape of things to come. An analysis based on Swiss climatological data and simulations." *Geophysical Research Letters* 31: 2022-2026.
- Bernhofer, C., V. Goldberg, J. Franke, M. Surke und J. Adam (2008): "REKLI - Sachsen-Anhalt II, Regionale Klimadiagnose für Sachsen-Anhalt, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt." Institut für Hydrologie und Meteorologie und T. U. Dresden (Hrsg.). Dresden.
- BPB Bundeszentrale für Politische Bildung (2009): "Dossier Klimawandel - Glossar." Bonn.
- Ciais, P., M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogee, V. Allard, M. Aubinet, N. Buchmann, C. Bernhofer, A. Carrara, F. Chevallier, N. De Noblet, A. D. Friend, P. Friedlingstein, T. Grunwald, B. Heinesch, P. Keronen, A. Knohl, G. Krinner, D. Loustau, G. Manca, G. Matteucci, F. Miglietta, J. M. Ourcival, D. Papale, K. Pilegaard, S. Rambal, G. Seufert, J. F. Soussana, M. J. Sanz, E. D. Schulze, T. Vesala und R. Valentini (2005): "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003." *Nature* 437(7058): 529-533.
- Förster, H. und J. Lilliestam (2009): "Water and Energy: Thermoelectric Energy Production in View of Climate Change." *Energy Conversion and Management*: im Druck.
- Franke, J., V. Goldberg, U. Mellentin und C. Bernhofer (2006): "Risiken des regionalen Klimawandels in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen." *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*(55): 97-104.

- Füssel, H. M. und R. J. T. Klein (2006): "Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking." *Climatic Change* 75(3): 301-329.
- Ionescu, C., R. J. T. Klein, J. Hinkel, K. S. K. Kumar und R. Klein (2009): "Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change " *Environmental Modeling & Assessment* 14(1): 1-16.
- IPCC (2007): "Summary for Policymakers." In: M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden und C. E. Hanson: "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge, UK, Cambridge University Press: 7-22.
- IPCC (2008): "Klimaänderung 2007 - Synthesebericht." Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Berlin 109 S.
- Kanter, J. (2007): "Climate change puts nuclear energy into hot water." *The New York Times* (May 20, 2007). New York. 2 S.
- Klinenberg, E. (2002): "Heat Wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago." University of Chicago Press. Chicago. 320 S.
- Kropp, J. P., A. Block, F. Reusswig, K. Zickfeld und H. J. Schellnhuber (2006): "Semi-quantitative assessment of regional climate vulnerability: The North-Rhine Westphalia Study." *Climatic Change* 76(3-4): 265-290.
- Kropp, J. P. und A. Daschkeit (2008): "Planungshandeln im Lichte des Klimawandels." *Informationen zur Raumentwicklung* 6-7: 353-361.
- LAU (2008): "Regionale Klimaänderungen auf der Basis des statistischen Regionalisierungsmodells WETTREG, Analysen und Trends für Sachsen-Anhalt " Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt; Sonderheft 3/2008. Landesamt für Umweltschutz (LAU) Sachsen-Anhalt (Hrsg.). Landesamt für Umweltschutz LAU Sachsen-Anhalt. [http://www.mu.sachsen-anhalt.de/start/fachbereich03/ag\\_klimawandel\\_neu/fachberichte/files/szenarien\\_mit\\_wettreg\\_bericht\\_isa\\_09\\_2008.pdf](http://www.mu.sachsen-anhalt.de/start/fachbereich03/ag_klimawandel_neu/fachberichte/files/szenarien_mit_wettreg_bericht_isa_09_2008.pdf)
- LAU Sachsen-Anhalt - Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (2007): "Künftige Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt. Sachstand und Handlungsfelder." Workshop am 16. Juni 2006 im Landesamt für Umweltschutz, Halle, Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt. Sonderheft 1/2007.
- Luterbacher, J., D. Dietrich, E. Xoplaki, M. Grosjean und H. Wanner (2004): "European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500." *Science* 303(5663): 1499-1503.
- Müller, U., S. Greis und B. Rothstein (2007): "Impacts on Water Temperatures of Selected German Rivers and on Electricity Production of Thermal Power Plants due to Climate Change." In: P. Heneka, B. zum Kley, G. Tetzlaff und F. Wenzel: "8. Forum DKKV/CEDIM: Disaster Reduction in a Changing Climate 15./16.10.2007." Karlsruhe, Germany.
- O'Brien, K., R. Leichenko, U. Kelkar, H. Venema, G. Aandahl, H. Tompkins, A. Javed, S. Bhadwal, S. Barg, L. Nygaard und J. West (2004): "Mapping Vulnerability to Multiple Stressors: Climate Change and Economic Globalization in India." *Global Environmental Change* 14(4): 303-313.
- OECD (2007): "Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management." S. Agrawala (Hrsg.). Paris.
- Petrow, T. und B. Merz (2009): "Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002." *Journal of Hydrology* 371(1-4): 129-141.
- Rebetez, M., H. Mayer, O. Dupont, D. Schindler, K. Gartner, J. P. Kropp und A. Menzel (2006): "Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis." *Annals of Forest Science* 63(6): 569-577.
- StaLA - Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt (2009): "Bevölkerungsfortschreibung nach Kreisen vom 01.01.-31.03.2009." Letzter Zugriff am: 12.11. 2009, [http://www.stala.sachsen-anhalt.de/Internet/Home/Daten\\_und\\_Fakten/1/12/124/12411/Monatliche\\_Bevoelkerungsfortschreibung\\_seit\\_Jahresbeginn\\_nach\\_Kreisen.html](http://www.stala.sachsen-anhalt.de/Internet/Home/Daten_und_Fakten/1/12/124/12411/Monatliche_Bevoelkerungsfortschreibung_seit_Jahresbeginn_nach_Kreisen.html).

- Stock, M. (2005): "KLARA - Klimawandel, Auswirkungen, Risiken, Anpassung." PIK Report No. 99. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam.
- Stock, M., J. P. Kropp und O. Walkenhorst (2009): "Risiken, Vulnerabilität und Anpassungserfordernisse für klimaverletzliche Regionen." *Raumforschung & Raumordnung* 67(2): 97-113.
- Stott, P., D. Stone und M. Allen (2004): "Human contribution to the European heat wave of 2003." *Nature* 432: 610-614.
- Turner, B. L., R. E. Kasperson, P. A. Matson, J. J. McCarthy, R. W. Corell, L. Christensen, N. Eckley, J. X. Kasperson, A. Luers, M. L. Martello, C. Polsky, A. Pulsipher und A. Schiller (2003): "A framework for vulnerability analysis in sustainability science." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100(14): 8074-8079.
- UBA (2007): "Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WettReg." Dessau.
- Zebisch, M., T. Grothmann, D. Schröter, C. Haße, U. Fritsch und W. Cramer (2005): "Klimawandel in Deutschland, Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme." Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).
- Zemp, M., W. Haeberli, M. Hoelzle und F. Paul (2006): "Alpine glaciers to disappear within decades?" *Geophysical Research Letters* 33(L13504).



## 2. Klima und Klimawandel

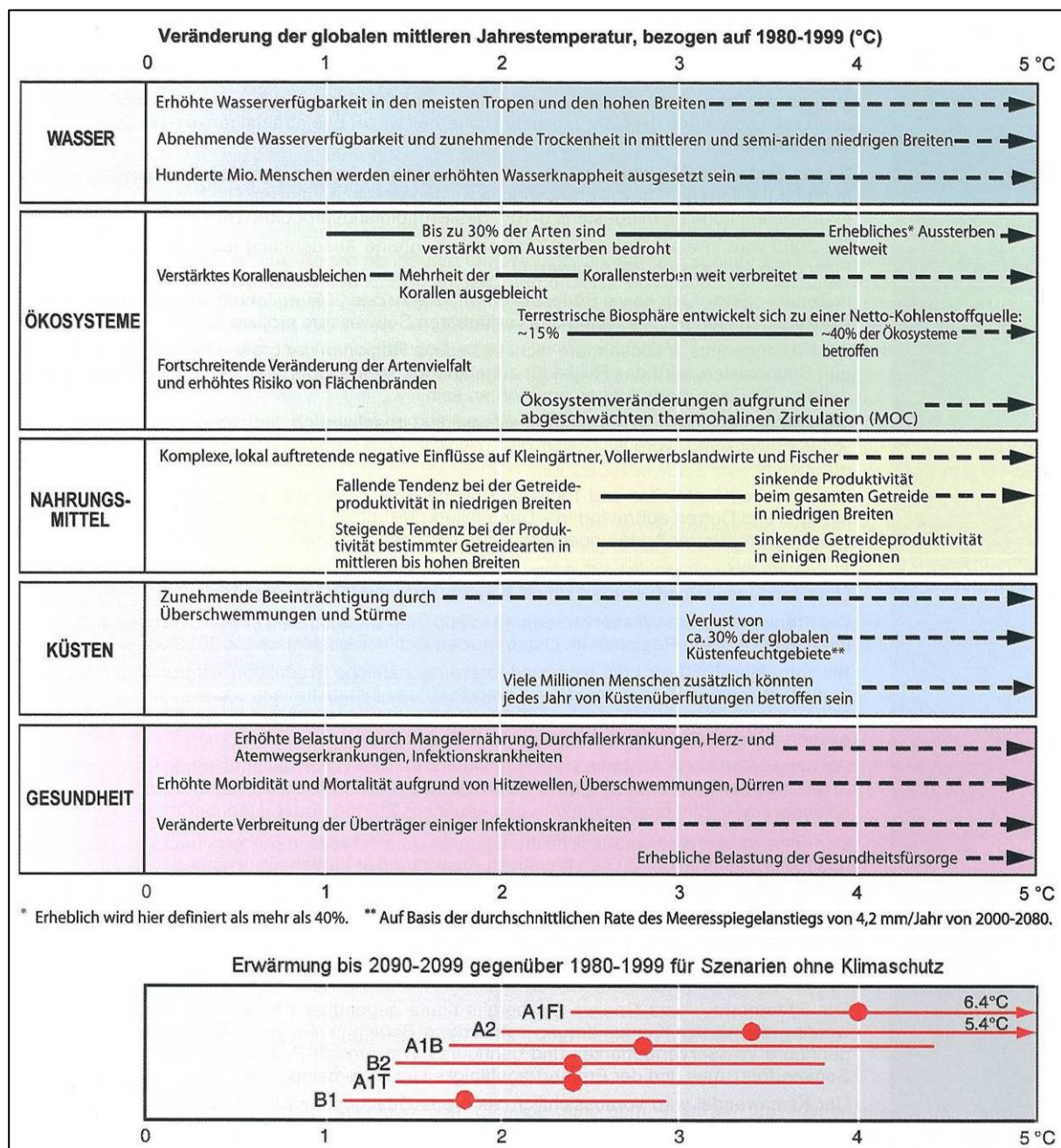
### 2.1. Das Klima wandelt sich

Das Bewusstsein, dass seit Beginn der Industrialisierung Mitte des 19. Jahrhunderts die anthropogene Emission von Treibhausgasen den natürlichen Treibhauseffekt verstärkt, hat sich durch die Beobachtung signifikanter regionaler Klimaveränderungen manifestiert (Alexander et al. 2006; Chen et al. 2006; Tank et al. 2006; IPCC 2007c, a, b). Umfassende Daten zu klimasystemrelevanten Variablen wie Temperatur, Niederschlag, Wind, Wetterextremen, Schneebedeckung, der Ausdehnung von Land- und Meereis und Anstieg des Meeresspiegels, aus denen u.a. globale Mittelwerte abgeleitet werden können, werden seit etwa 1860 an vielen Orten der Welt erhoben. Seit den späten 1970er Jahren unterstützen Satellitendaten Messungen in Bodennähe durch Ermittlung der von der Erde absorbierten, reflektierten und emittierten Strahlung. Anfang der 1990er Jahre kam die Satellitenmessung über Veränderungen des Meeresspiegels hinzu.

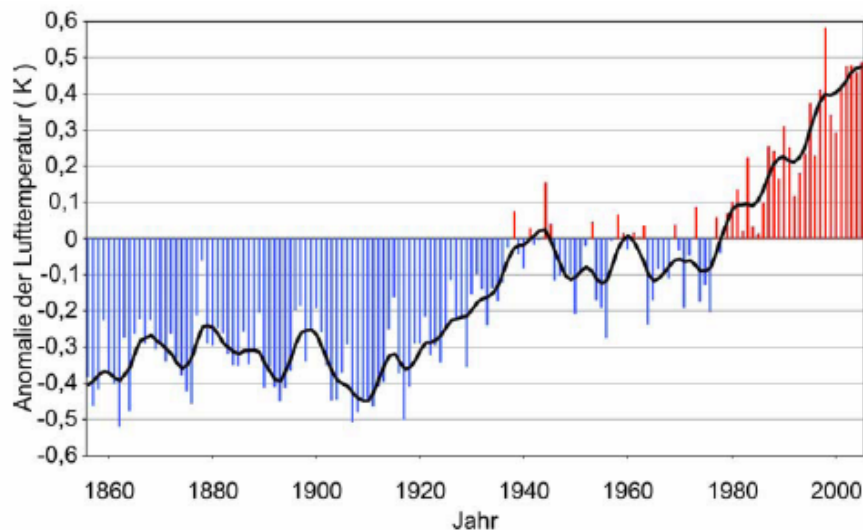
Der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) als ein von Politik, Wissenschaft und Öffentlichkeit global anerkanntes wissenschaftliches Forum gibt seit 1990 regelmäßig Sachstandsberichte heraus, die aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zusammenfassen. Wesentliche darin enthaltende Ergebnisse sind u.a. 100jährige Anstiegstrends für globale Temperaturen sowie prägnante regionale Veränderungen, die durchaus globale Folgen nach sich ziehen. So beträgt z.B. der Anstieg der Temperatur im globalen Mittel von 1900-2000 rund 0,6 °C (3. Sachstandsbericht 2001), für 1906-2005 beträgt er bereits 0,74 °C (4. Sachstandsbericht 2007), d.h. der Klimawandel beschleunigt sich. Zudem wurden elf der wärmsten jemals gemessenen Jahre in den letzten zwölf Jahren verzeichnet. Der grönländische Eisschild schmilzt deutlich schneller als bisher angenommen (Vinther et al. 2009), mit möglicherweise gravierenden Folgen durch den damit einhergehenden Meeresspiegelanstieg und die Dynamik der nordatlantischen Thermohalinen Zirkulation („Golfstrom“) (Rahmstorf 2000; Vellinga & Wood 2002; Chen et al. 2006). Fokussiert man auf Europa, so haben die Niederschläge in den letzten 100 Jahren in Nordeuropa signifikant zu, im Mittelmeerraum dagegen abgenommen. Die Temperaturentwicklung lag in Deutschland leicht höher als im weltweiten Mittel und hat in den letzten 100 Jahren um fast 1°C zugenommen, auch hier mit großen regionalen Unterschieden. Eine regionale Diskrepanz besteht hinsichtlich der Niederschlagsentwicklung, die für den Westen Deutschlands für das letzte Jahrhundert eine stabile bis leicht ansteigende Tendenz, für die östlichen Bundesländer dagegen einen abnehmenden Trend gezeigt hat. Zudem verändert sich das Abflussgeschehen im Einzugsgebiet der Elbe; einerseits bedingt durch eine Veränderung der Strahlungsverhältnisse, andererseits verursacht durch abnehmenden Niederschlag und eine Veränderung der Schneebedeckung (Mächtigkeit und Dauer) im Oberlauf der Elbe. Sollte sich der Klimawandel im bisherigen Tempo fortsetzen, sind dramatische und sehr viel weitergehende Konsequenzen zu erwarten (siehe Abb. 2.1.1), nicht nur auf globaler Ebene, sondern auch regional und kleinräumig und damit auch in Sachsen-Anhalt. Trotz dieser regionalen Bezüge ist Klimawandel in der öffentlichen Wahrnehmung dennoch zumeist mit globalen Konsequenzen verknüpft. Auswirkungen, die bestimmte Lebens- und Umweltbereiche betreffen, sollten aber sektor- und regionspezifisch analysiert werden, um geeignete Handlungsoptionen ableiten zu



können. Dies ist die Herausforderung der kommenden Jahrzehnte und Gegenstand der vorliegenden Studie.



**Abb. 2.1.1: Darstellung der Auswirkungen des Klimawandels für spezifische Sektoren und Regionen in Abhängigkeit von der zu erwartenden Temperaturerhöhung (IPCC 2008)**



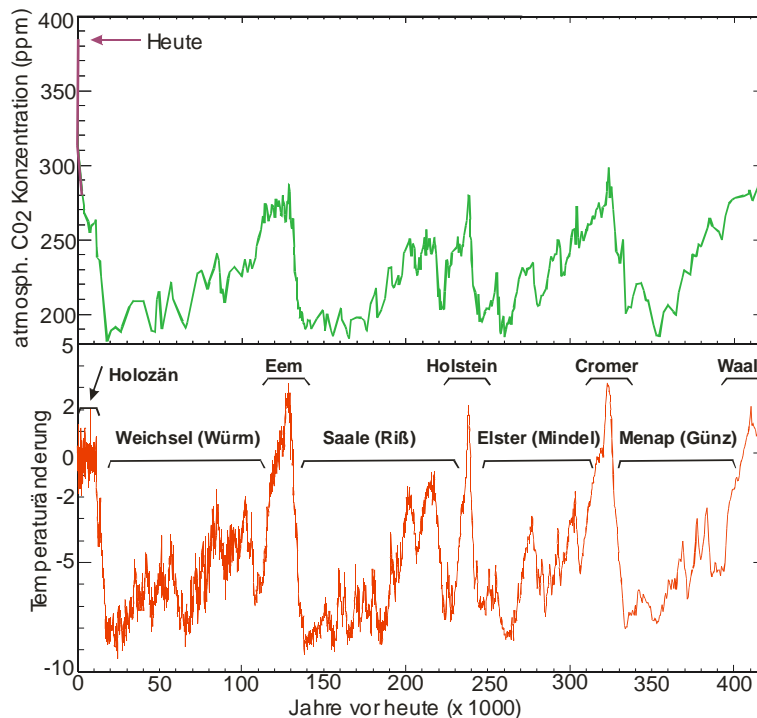
**Abb. 2.1.2: Veränderung der globalen Mitteltemperatur im Zeitraum 1856-2005<sup>1</sup>  
(Temperaturanomalie im Vergleich zum Basiszeitraum 1961-1990)**

Paläoklimatische Untersuchungen belegen, dass sich das Klima der Erde in einem stetigen Wandel befindet und immer wieder abrupte und starke Wechsel erlebt hat. Die Analyse dieser vergangenen Ereignisse ermöglicht es uns, den momentanen Klimawandel einzuordnen und sein Ausmaß und seine Auswirkungen zu verstehen. Zunächst ist es wichtig, die Begriffe „Klima“ und „Wetter“ voneinander abzugrenzen. Tagtäglich wahrnehmbar und fühlbar ist nur das Wetter, z.B. in Form von starken Temperaturschwankungen, Gewitterregen, Stürmen etc. Die Vorhersage von Wetterereignissen hat systemische Grenzen, die in der chaotischen Natur der Atmosphäre begründet liegen. Das Klima dagegen ist nicht direkt fühlbar und bleibt daher abstrakt. „Klima“ bezeichnet die langfristige (häufig für 30 Jahre), statistische Beschreibung atmosphärischer Größen wie die mittlere Jahrestemperatur oder jährliche Niederschlagssumme. Klimaänderungen lassen sich für einen längeren Zeitraum projizieren, als Funktion einer Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre, z.B. der Treibhausgaskonzentration. Grundlage hierfür sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des „Treibhauseffektes“, die zum Teil seit mehr als 150 Jahren wissenschaftlich beschrieben sind (Fourier 1827; Tyndall 1872; Arrhenius 1896). Vereinfacht gesagt, halten bestimmte in der Lufthülle vorkommende Gase die eingestrahlte Sonnenenergie zurück, wodurch sich die Erde aufheizt. Wäre dies nicht der Fall, wäre Leben auf der Erde unter den heutigen Bedingungen nicht möglich. Obwohl der Wasserdampf das mengenmäßig wichtigste Treibhausgas ist, spielt Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) eine zentrale Rolle. Es fällt bei allen Verbrennungsprozessen von organischem Material an. Hierzu gehören auch unsere fossilen Brennstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle, die im Verlauf von Jahrtausenden aus Pflanzenresten entstanden sind. Die intensive Nutzung der fossilen Rohstoffe durch den Menschen und die damit verbundene Emission von Treibhausgasen (vor allem  $\text{CO}_2$ , aber auch Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ )) hat die Konzentration von  $\text{CO}_2$ -Äquivalenten<sup>2</sup> von ca. 280 ppm (Mittelwert für Warmzeiten in den letzten 400.000 Jahren) innerhalb von nur 150 Jahren auf jetzt 385 ppm  $\text{CO}_2$ -Äquivalenten ansteigen lassen (Abb. 2.1.3) (nach Petit et al. 1999).

<sup>1</sup> <http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/34/PDF/34.pdf>

<sup>2</sup> Kohlenstoffdioxidäquivalent: der Strahlungsantrieb einer Konzentration an anthropogenen Treibhausgasen und Aerosolen wird auf den Strahlungsantrieb einer entsprechenden  $\text{CO}_2$ -Konzentration umgerechnet

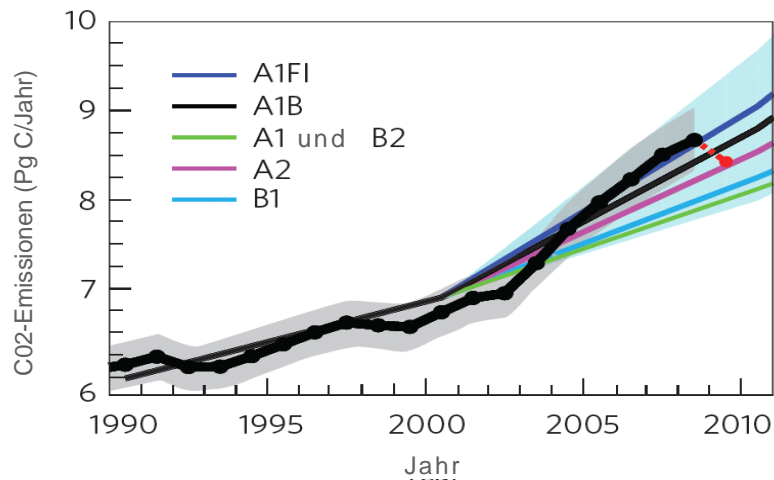
Die Konzentration der Treibhausgase zu Beginn des 21. Jahrhunderts übertrifft damit bei weitem die Schwankungsbreite der vergangenen 650.000 Jahre. Der enorme Anstieg dieser Gase in den letzten 150 Jahren führt aufgrund des Treibhauseffekts zu einer verstärkten Erwärmung. Diese verursacht einen Anstieg der Verdunstung und damit einen höheren Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre (ca. 7 % bei einer Temperaturerhöhung von 1 °C). Durch diese Rückkopplung wird der Treibhauseffekt verstärkt.



**Abb. 2.1.3: Atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration und globale Mitteltemperatur der letzten 400.000 Jahre (nach Petit et al. 1999)**

Die in Abb. 2.1.3 dargestellte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration (oben) und globale Mitteltemperatur (unten) wurde für die letzten 400.000 Jahre rekonstruiert und um CO<sub>2</sub>-Messungen für die letzten 150 Jahre ergänzt (oberer Teil von Abb. 2.1.3, magentafarben markiert). Nach der Weichsel-Eiszeit setzte vor ca. 13.000 Jahren eine langsame Erwärmung ein. In Abb. 2.1.3 ist sichtbar, dass die Kohlenstoffdioxidkonzentration und die globale Mitteltemperatur in einem Gleichgewicht stehen. Dieses Gleichgewicht ist bedingt durch externe (orbitale) Randbedingungen, so z.B. durch die Neigung der Erdachse, aber auch durch geologische Prozesse auf der Erde, wie Vulkanismus oder Plattentektonik. Die dabei frei werdenden Gase bildeten über Milliarden von Jahren schließlich die heutige Atmosphäre. Methan, Kohlenstoffdioxid und andere in geringer Konzentration vorkommenden Komponenten sind für den natürlichen Treibhauseffekt verantwortlich. Die anthropogenen Emissionen steigen seit ca. 150 Jahren stark an (Abb. 2.1.3) und beeinflussen so auch den Wärmehaushalt der Erde. Würde man bei einem unveränderten Verhalten der Menschheit die durch den IPCC projizierten Temperaturänderungen erreichen, wäre die Geschwindigkeit der zu erwartenden Änderung mindestens 15-20mal schneller als am Ende der Weichsel(Würm)eiszeit (vgl. Abb. 2.1.3). Die Frage ist, ob Öko- und die modernen zivilisatorischen Systeme sich dieser Entwicklung ausreichend schnell anpassen können. Dass sich der Klimawandel beschleunigt, lässt sich auch aus den momenta-

nen Emissionen ableiten, die zurzeit (ausgenommen 2009) oberhalb des vom IPCC selbst definierten „worst-case Szenarios“ (A1FI, Markerszenario) liegen (Abb. 2.1.4).



**Abb. 2.1.4: Vergleich aktueller Kohlenstoffdioxid(CO<sub>2</sub>)-Emissionen (schwarze Punkte) mit sechs IPCC-Szenarien (farbige Linien) und geschätzte Emissionen für das Jahr 2009 (rot) (Le Quéré et al. 2009) (1Petagramm (Pg)= 10<sup>9</sup> Tonnen)**

Die Kurve der tatsächlichen Emissionen erreicht im Jahr 2004 das Maß des höchsten Emissionsszenarios (A1FI, Markerszenario) und übersteigt dieses seither, wie Abb. 2.1.4 zeigt. Ebenso liegen die tatsächlichen Emissionen ab dem Jahr 2003 weit oberhalb der beiden Stabilisierungstrajektorien von 450 ppm und 650 ppm, die für anzustrebende Klimaschutzziele als Bezug dienen. Die jährliche Zunahme der zwischen den Jahren 2000 bis 2006 beobachteten Treibhausgasemissionen liegt bei 3,3 % und ist somit höher als die höchste in den Szenarien angenommene Rate (A1FI geht von 2,4 % aus) (Raupach et al. 2007).

In Sachsen-Anhalt sind ebenfalls bereits klimatische Veränderungen festzustellen. So haben sich regionale Unterschiede bereits verstärkt: Der Niederschlag im Harz hat im Zeitraum von 1951-2006 um bis zu 22 % zugenommen, während im Saaletal ein Rückgang um 5-15 % beobachtet wurde (Bernhofer et al. 2008). Besonders stark war der Rückgang dabei in den Sommermonaten, mit über -30 % in der Altmark und im südöstlichen Harzvorland. Generell war im selben Zeitraum eine Umverteilung der Niederschläge zum Winter hin festzustellen. Ohnehin trockene Gebiete sind daher in den letzten Jahrzehnten zunehmend trockener geworden, während feuchtere Regionen wie der Harz Niederschlagszunahmen zu verzeichnen hatten. Allerdings sind die Trends dieser Veränderungen größtenteils nicht signifikant.

Die Jahresmitteltemperatur ist in Sachsen-Anhalt bereits großflächig um 0,5-1,5 °C gestiegen, mit der stärksten Erwärmung in den Wintermonaten (Bernhofer et al. 2008). Die Signifikanz dieser Temperaturveränderung ist dabei deutlich höher als für den Niederschlagstrend.



## 2.2. Wie kommen wir zu Zukunftsprojektionen?

Um das zukünftige Klima projizieren zu können, werden im Rahmen des IPCC-Prozesses mehr als zwanzig globale Zirkulationsmodelle (GCM) verwendet, für die die regionale Auflösung und die Betonung der physikalischen Prozesse durchaus unterschiedlich ist, die aber dennoch unter gleichen Startbedingungen betrieben werden. Die Ergebnisse werden in internationalen Projekten miteinander verglichen<sup>3</sup>. Diese Modelle haben eine großskalige Auflösung von derzeit noch minimal 110 km x 110 km. Um diese Modelle anzutreiben, sind Annahmen über potentielle Entwicklungs- und Emissionspfade der Menschheit notwendig. Da niemand genau vorhersagen kann, wie diese Entwicklung verlaufen wird, hat der IPCC im Jahr 2000 (Nakicenovic & Swart 2000) insgesamt vier Modellgeschichten zu möglichen Emissionsszenarien veröffentlicht, in denen unter anderem Annahmen über demographische, ökonomische, gesellschaftliche und technologische Entwicklungen enthalten sind. Auf diesen Modellgeschichten basieren vier Gruppen von Emissionsszenarienfamilien (Szenarien A1, A2, B1, B2). Diese können weiter in insgesamt sieben untergeordnete Szenariengruppen (A1, A1B, A1FI, A1T, A2, B1, B2) unterteilt werden. In Box 2.2.1 sind die Szenarienfamilien A1, A2 und B1 näher erläutert.

---

<sup>3</sup> CMIP – Coupled Model Intercomparison Project unter  
<http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/cmip/index.php>

**Box 2.2.1: Übersicht über ausgewählte Szenarien**

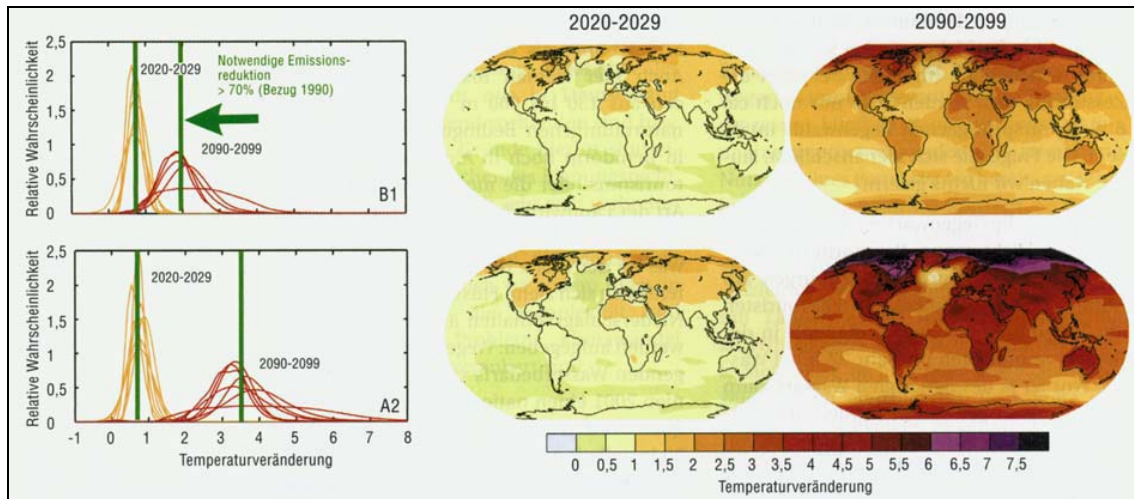
*(für weitere Szenarien vgl. IPCC-SRES 2000) (siehe auch Abb. 2.1.4)*

**A1:** Die A1-Modellgeschichte geht aus von einer Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer in der Mitte des Jahrhunderts den Höchststand erreichenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung und rascher Einführung neuer und effizienter Technologien. A1 teilt sich in drei Gruppen auf, die unterschiedliche Ausrichtungen des neuen Technologiewandels beschreiben: fossilintensiv (A1FI), nicht-fossile Energieträger (A1T) und eine ausgewogene Nutzung aller Quellen (A1B). Dieses Szenario geht von einer Konzentration des CO<sub>2</sub>-Äquivalenten von rund 700 ppm für A1T, 850 ppm für A1B und 1550 ppm für A1FI zum Ende des Jahrhunderts aus (IPCC 2007d).

**A2:** Dieses Szenario geht von einer sich sehr heterogen entwickelnden Welt aus. Die Bevölkerung wird auf ca. 15 Milliarden Menschen im Jahr 2100 anwachsen. Das ökonomische Wachstum ist regional unterschiedlich und insgesamt niedriger als in allen anderen Antriebsszenarien. Die Entwicklung verläuft in Richtung einer Manifestation unterschiedlicher ökonomischer Regionen, wobei wenig Bedeutung auf interregionale Beziehungen gelegt wird. Die Einkommensunterschiede zwischen industrialisierten Nationen und Entwicklungsländern sind erheblich und die Wohlfahrtslücke wird nicht geschlossen. Mit diesem Szenario ist am Ende des Jahrhunderts eine atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration verbunden, die mindestens der Verdreifachung (~ 960 ppm) des vorindustriellen Wertes entspricht, bzw. einer Konzentration des CO<sub>2</sub>-Äquivalenten von rund 1250 ppm bis 2100 (IPCC 2007d). Eine solche Entwicklung, die am oberen Rand aller durchgeführten Kalkulationen liegt, ist bei einem unveränderten Verhalten der Menschheit sehr wahrscheinlich. Das für die Analyse verwendete A1B-Szenario liegt mit seinen Projektionen etwas unter A2. (IPCC 2007d).

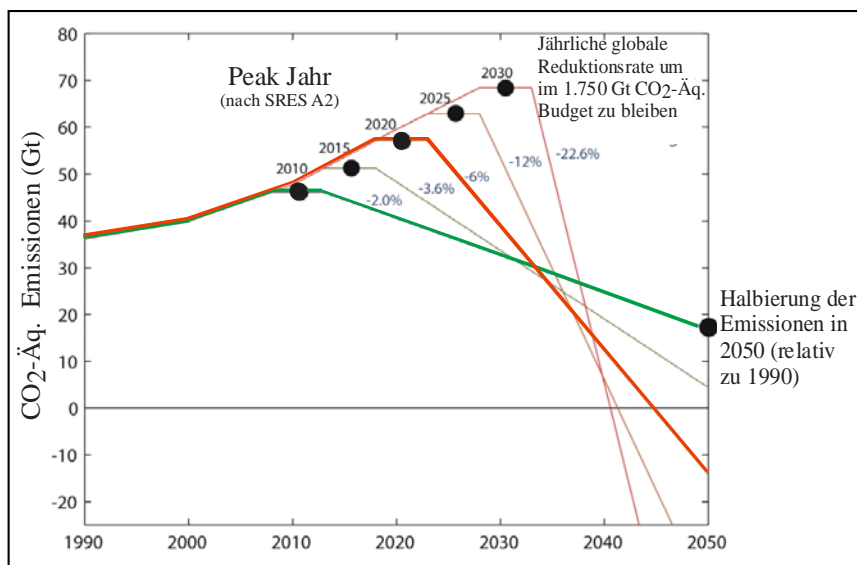
**B1:** Dieses Szenario strebt eine konvergente Welt an, wobei ein schneller Übergang zu einer globalen Service- und Dienstleistungsökonomie erfolgt. Die Materialintensität in Produktionsprozessen wird gesenkt und neue und ressourceneffiziente Technologien werden schnell eingeführt. Die Bevölkerung stabilisiert sich 2100 bei ca. 7 Milliarden Menschen und die Wohlfahrtslücke zwischen armen und reichen Nationen wird erheblich verkleinert. Insgesamt ist Nachhaltigkeit in Kombination mit sozialem Bewusstsein ein Entwicklungsziel. Dieses Szenario führt zunächst zu einer Stabilisierung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration bei ca. 450 ppm (2050) und stellt damit in etwa das von der Europäischen Union und der deutschen Bundesregierung anvisierte Ziel dar, den Klimawandel auf eine Temperaturerhöhung von 2°C zu begrenzen. Bis 2100 geht dieses Szenario von einer Konzentration der CO<sub>2</sub>-Äquivalenten von rund 600 ppm aus (IPCC 2007d).

Die auf dieser Basis gewonnenen Antriebsszenarien werden zu charakteristischen Emissionstrajektorien von Treibhausgasen übersetzt (Abb. 2.1.4) und in die globalen Klimamodelle eingespeist, um Änderungen des Klimas zu modellieren. Da, wie Box 2.2.1 zeigt, die Antriebsszenarien Handlungsziele implizit beinhalten, bedeutet dies auch, dass die zukünftige Klimaentwicklung maßgeblich von heutigen Handlungen und Entscheidungen mitbestimmt wird.



**Abb. 2.2.1: Globale Änderung der Oberflächentemperatur für die Antriebsszenarien B1 und A2 (IPCC 2007c)**

Abbildung 2.2.1 zeigt die Änderungen der Oberflächentemperatur für zwei Antriebsszenarien B1 und A2. Im Falle des B1-Szenarios wäre es möglich, bei entsprechenden Reduktionsverpflichtungen (mehr als 70 % für die OECD Länder, 50 % weltweit), die Erderwärmung auf ca. 2-3 °C zu beschränken (Meinshausen et al. 2009). Für beide Fälle wird für die Dekade 2020-2029 eine zusätzliche Erwärmung von ca. 0,8 °C erwartet. Diese ist unvermeidlich, weil sich die dafür verantwortlichen Treibhausgase bereits in der Atmosphäre befinden.



**Abb. 2.2.2: Vergleich von Stabilisierungsszenarien, die das 2°C-Ziel (450 ppm) erreichen könnten (Meinshausen et al. 2009)**

Legt man jedoch das 2°C-Ziel als politisches Klimaschutzziel fest, kann man aufgrund der wissenschaftlichen Erkenntnisse auch das noch zu emittierende Treibhausgas-„Restbudget“ ermitteln. Mit Bezug hierauf lassen sich dann entsprechende Reduktions-szenarien berechnen, die das 2°C-Ziel einhalten. Die Herausforderungen für eine entsprechende Emissionsreduktion stellt die globale Gemeinschaft vor große Herausforderungen. Würden die Emissionen bereits 2010 stabilisiert (Abb. 2.2.2, grüner Verlauf), dann wäre in den nachfolgenden Jahren mit einer jährlichen Reduktion von 2% dieses



Ziel zu erreichen. Gelänge dies erst 2020 (Abb. 2.2.2, roter Verlauf), wären jährlich bereits Emissionsreduktionen von 6% nötig, was einer Reduktionsverpflichtung von mehr als einem Kyoto-Protokoll pro Jahr entspräche. Im Kyoto-Protokoll wurde 1997 eine Reduktion der weltweiten Treibhausgase um 5,2% zum Vergleichsjahr 1990 festgelegt, jedoch für einen Zeitraum von vier Jahren (2008-2012). Wenn die Stabilisierung später erfolgt, sind sogar „negative“ Emissionen möglich, d.h. um dieses Ziel zu einzuhalten, sind möglicherweise technische Lösungen nötig, um CO<sub>2</sub> wieder aus der Atmosphäre zu entfernen (Meinshausen et al. 2009).

Politische Entscheidungsträger und Institutionen fordern zunehmend kleinräumigere Klimaprojektionen. Um diese bereitstellen zu können, müssen regionale Klimamodelle verwendet werden. Im Wesentlichen lassen sich diese Modelle in zwei Kategorien einordnen: in statistische und in dynamische Modelle. Statistische regionale Modelle berücksichtigen empirische Messwerte und deren statistische Eigenschaften und nutzen Trends aus Allgemeinen Zirkulationsmodellen (GCM<sup>4</sup>). Prinzipiell stellen GCMs die Prozesse in einem räumlich größeren Maßstab (Grid) dar, aber mit einer sehr viel detaillierten Repräsentation von Prozessen. Während statistische Modelle streng genommen mit ihren Projektionen nur für die jeweiligen meteorologischen Stationen gelten, trifft dies nicht auf dynamische regionale Modelle zu. Sie repräsentieren die Klimaphysik dynamisch, d.h. sie berechnen für jede Gitterzelle und jeden Zeitschritt diejenigen Prozesse, die für die Klimaevolution auf der gewählten Auflösungsskala bedeutsam sind. Dynamische Modelle benötigen zum Betrieb allerdings einen Randinput (sogenanntes „nesting“) von globalen Zirkulationsmodellen, da aufgrund der kleinen Gitterweite und der zu berücksichtigenden lokalen Gegebenheiten die Rechenzeit zu lang werden würde. Die Aussagen der regionalen Modelle gelten nur für die gewählten Antriebsszenarien und für das verwendete GCM. Um die Güte der regionalen Modelle zu bestimmen, wird deren Output mit Beobachtungsdaten verglichen (validiert). In Deutschland werden im Wesentlichen vier regionale Klimamodelle eingesetzt: Die statistischen Modelle WETTREG (CEC Potsdam) und STAR (PIK Potsdam) sowie die dynamischen Modelle REMO (MPI Hamburg) und CCLM (CLM-Community). Szenariodaten aus diesen Modellen können über das Deutsche Klimarechenzentrum in Hamburg (DKRZ) bezogen werden. Ein Vergleich dieser vier Regionalen Klimamodelle wird derzeit beim DWD (Deutscher Wetterdienst) und am PIK durchgeführt. Für den Vergleich werden Modellläufe mit einheitlichen Eingangsparametern und einheitlichen Zeiträumen für das Emissionsszenario A1B gegenüber gestellt. Im Wesentlichen konnten dabei einheitliche Trends ermittelt werden, die jedoch teilweise jahreszeitliche oder geographische Unterschiede aufweisen. Tendenziell liegen dabei die Ergebnisse für die Temperaturentwicklung bei WETTREG niedriger als bei den anderen Modellen. Die dynamischen Modelle REMO und CCLM zeigen einen stärkeren Temperaturgradienten von Nord nach Süd als die beiden statistischen Modelle STAR und WETTREG. Im Vergleich zeigen die Modelle tendenziell eine Abnahme der Sommerniederschläge und eine Zunahme der Winterniederschläge, wobei bei REMO im Gegensatz zu den drei anderen Modellen bei den Sommerniederschlägen nur eine geringere Abnahme bis hin zu geringen Zunahmen in manchen Gegenden zu verzeichnen ist<sup>5</sup>. Die Unterschiede zwischen den Modellen STAR, WETTREG und REMO werden in Kap. 2.6 für Sachsen-Anhalt herausgearbeitet.

<sup>4</sup> General Circulation Model

<sup>5</sup> Für eine detailliertere Auswertung siehe <http://www.dwd.de>

## 2.3. Verwendete Klimadaten der Studie

Für die Klimawirkungsanalyse in diesem Bericht wurden zwei unterschiedliche regionale Klimamodelle verwendet (WETTREG, Box 2.3.2 und REMO, Box 2.3.1), deren Ergebnisse für jeweils drei Emissionsszenarien (A2, A1B, B1, siehe Box 2.2.1) ausgewertet wurden. Entsprechend der wissenschaftlichen Praxis werden für die Analysen jeweils jährliche Durchschnittswerte für 30-Jahresperioden betrachtet, für den Basiszeitraum 1961-1990 und für die Szenarienperioden 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100. Für die Zukunftsszenarien erfolgte entsprechend den Szenarioperioden die Betrachtung daher für kurz-, mittel- und langfristige Veränderungen. In einzelnen Kapiteln wurde modellbedingt davon abgewichen, wobei in diesen Fällen an der entsprechenden Stelle darauf hingewiesen wird. Für einige Analysen wurden außerdem zusätzlich Modellergebnisse des statistischen Modells STAR (Box 2.3.3) verwendet (Stock et al. 2007; Orłowsky et al. 2008). Die betrachteten Modelle werden alle von dem GCM ECHAM5/MPI-OM des Max-Planck-Institutes (MPI) angetrieben (Roeckner et al. 2003). Für einen Überblick über die in der Sachsen-Anhalt-Studie verwendeten Regionalen Klimamodelle siehe Tab. 2.3.1.

**Tab. 2.3.1: Überblick über die in der Sachsen-Anhalt-Studie verwendeten Regionalen Klimamodelle**

Kenngröße	WETTREG	REMO	STAR
Zeitraum	1961-2100	1951-2100	1951-2055
Untersuchungsgebiet	Deutschland sowie der Nordwesten Tschechiens	Deutschland sowie Einzugsgebiete der Elbe	Deutschland
Bezug	Meteorologische Stationen des DWD	Raster aus Gitterzellen	2342 Meteorologische Stationen des DWD
Räumliche Auflösung	Entsprechend der Dichte der meteorologischen Stationen	ca. 10km*10km Raster (0,088°)	Entsprechend der Dichte der meteorologischen Stationen
Zeitliche Auflösung	Tageswerte	Stundenwerte	Tageswerte
Modelltyp	Statistisches Regionalisierungsverfahren (basierend auf Großwetterlagen)	Dynamisch-genestetes Modell	Statistisches Regionalisierungsverfahren (basierend auf empirischen Stationsmessungen)
Entwickler	Climate & Environment Consulting (CEC) Potsdam GmbH	Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg (MPI)	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Realisierungen	20 oder „trocken“, „mittel“, „feucht“ anhand der KWB	1	100 bzw. „trocken“, „mittel“, „feucht“ anhand der KWB

**Box 2.3.1: Das Klimamodell REMO**

Das Modellsystem REMO ist ein regionales dynamisches Klimamodell, welches seinen Ursprung in der Wettervorhersage hat. Es wird initialisiert und angetrieben durch die Simulationsläufe des globalen ECHAM5/MPI Klimamodells. Die horizontale Auflösung des Atmosphärenmodells ECHAM5 beträgt  $1,875^\circ$  entsprechend einem Gitterabstand von etwa 200 km am Äquator, während die des Ozeanmodells (MPI-OM)  $1,5^\circ$  entsprechend etwa 160 km am Äquator beträgt. Da REMO eine sehr viel geringere Auflösung hat, spricht man in diesem Zusammenhang davon, dass es in das grösserskalige Modell „genested“ wird. In der Sachsen-Anhalt-Studie wurde REMO in einer Auflösung von  $0,088^\circ$  (ca.  $10 \times 10$  km) verwendet, die Auflösungen sind von  $1/10^\circ$  -  $1^\circ$  variabel wählbar.

REMO wurde entwickelt, um langfristige Vorhersagen z.B. der Temperatur, des oberflächennahen Luftdrucks oder der Windentwicklung treffen zu können. Die zeitliche Auflösung der bereitgestellten Daten beträgt Tage bis Stunden. Das Modell enthält die im Modellgitter darstellbaren („aufgelösten“) Prozesse sowie die nicht aufgelösten („parametrisierten“) Prozesse, die für die Transporte von Impuls, Energie und Wasser im Erdsystem von Bedeutung sind. So ist auf der Gitterskala z.B. Wolkenphysik integriert. Der Wasserdampf und der Wassergehalt der Wolken sind prognostische Variablen, Niederschlag und Schneefall werden unter Stationaritätsbedingungen diagnostisch abgeleitet, unter Vernachlässigung der Advektion. Die Modelldaten für das A1B-Szenario liegen von 1950 bis 2100 vor. Dabei sind die Läufe transient, d.h. die Antriebsfaktoren folgen dem realen zeitlichen Verlauf und werden über die Jahre nicht konstant gehalten. REMO weist einige bekannte Schwierigkeiten in der Modellierung der Niederschlagssummen auf, die sich allerdings nur auf orografisch stark strukturierte Gebiete beschränken. Diese Umstände wurden in der Bearbeitung der Daten berücksichtigt. (Modellentwicklung: Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg (MPI), siehe auch Jacob et al. (2007))

**Box 2.3.2: Das Klimamodell WETTREG**

Das Modell WETTREG (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode) ist ein statistisches Klimamodell, bei dem Beziehungen zwischen Klimaparametern anhand der empirischen Daten der Vergangenheit entwickelt und auf die Zukunft übertragen werden. Es werden synthetisierte Zeitreihen an den Orten von Messstationen generiert, die alle gleich wahrscheinlich sind. Die räumliche Auflösung des Modells ist somit unmittelbar von der Stationsdichte abhängig.

WETTREG nutzt klassifizierte Wetterlagen. Die empirischen Zeitreihen der Messdaten werden anhand der Leitgröße Temperatur im Verlauf der WETTREG-Simulationen in übernormal warme bzw. unternormal kalte Abschnitte unterteilt. Per Zufallsgenerator wird eine Neukombination der Witterungsabschnitte zu einer simulierten Zeitreihe unter der Prämisse einer bestmöglichen Annäherung an die vorgegebene Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen des Temperaturregimes durchgeführt. Aufeinanderfolgende Wetterlagen müssen eine Übergangswahrscheinlichkeit von mehr als 10% aufweisen. Jeder Tag dieser simulierten Zeitreihe enthält eine Zuordnung zu Wetterlagen des Temperatur- und Feuchteregimes und den originalen Datumsbezug. Der Jahresgang der meteorologischen Größen, der als Abweichung vom stationsspezifischen Jahresgang vorliegt, wird anschließend auf die simulierte Zeitreihe aufgeprägt. Die simulierten Werte liegen auf dieser Verarbeitungsstufe im Wertebereich der Messwerte, können jedoch eine andere Häufigkeitsverteilung annehmen.

Der Wettergenerator erlaubt jedoch nur eine Rekombination von gemessenen Zeitreihenabschnitten, wobei allerdings die sich in der Zukunft ändernde Häufigkeit der Wetterlagen der primäre steuernde Faktor ist. Das bedeutet aber auch, dass der Ereignisraum des gegenwärtigen Klimas, etwa im Sinne von neuen (Klima)Extremen, nicht verlassen wird. Um dies zu ermöglichen wird für alle meteorologischen Größen, mit Ausnahme des Niederschlages, eine wetterlagenspezifische Änderung auf die simulierte Zeitreihe aufgeprägt, die aus GCM-Simulationen abgeleitet wird. Da das Modell auf Stationswerten beruht, gelten die Projektionen streng genommen auch nur für den Standort der jeweiligen Wetterstation. (Modellentwicklung: Climate & Environment Consulting Potsdam (CEC)).

**Box 2.3.3: Das Klimamodell STAR**

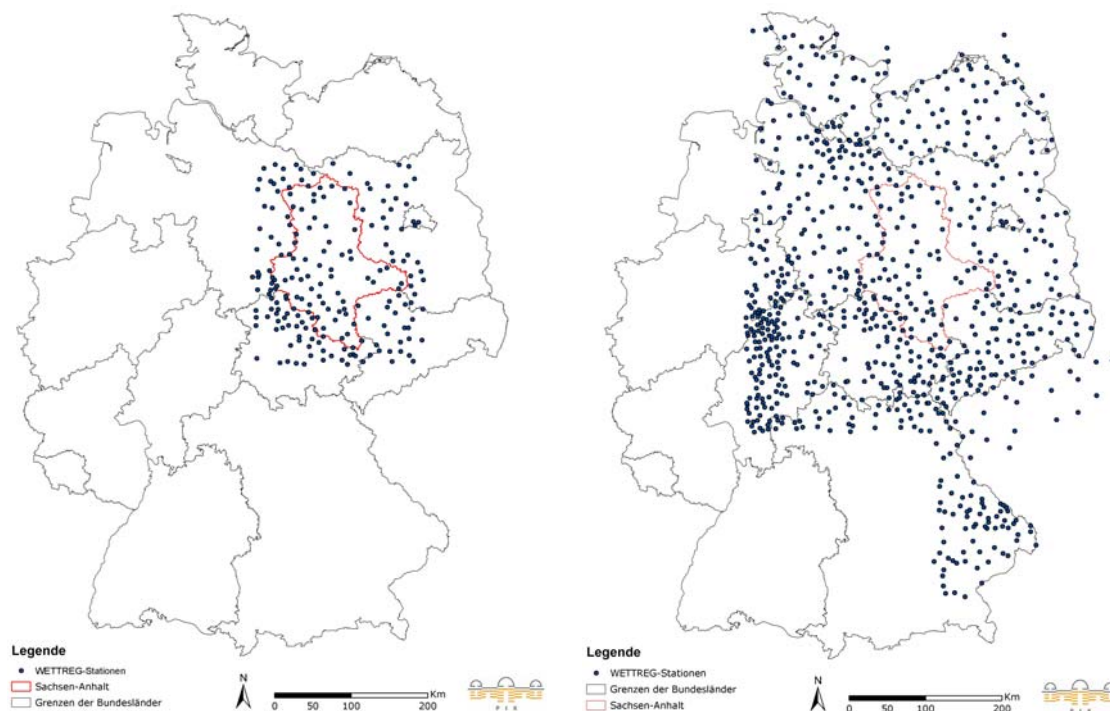
In einzelnen Fällen wurde im Rahmen der vorliegenden Studie bezüglich der Verletzlichkeiten Sachsen-Anhalts gegenüber den Folgen des Klimawandels das Modell STAR als weiteres statistisches Modell verwendet.

Basis für dieses Modell sind beobachtete Zeitreihen meteorologischer Größen von 1951 bis 2006. Der Temperaturentwicklung aus diesen Zeitreihen wird eine vorgegebene Änderung aus einem globalen Zirkulationsmodell (GCM) aufgeprägt. Als GCM wurde hier das Modell ECHAM (ECHAM-5-Lauf des MPI für Meteorologie in Hamburg), unter Szenario A1B verwendet. Durch einen speziellen Algorithmus werden die weiteren meteorologischen Größen an diese Änderung angepasst, so dass ihre Grundeigenschaften und Beziehungen weitestgehend erhalten bleiben. Um Wahrscheinlichkeiten des Eintretens der simulierten Änderung der klimatischen Parameter abzuschätzen, werden anhand einer sogenannten Monte-Carlo-Simulation viele zufällige Realisierungen erzeugt. Diese Realisierungen wurden anschließend anhand des Trends der klimatischen Wasserbilanz auf Grundlage von acht Bezugsstationen innerhalb Deutschlands ausgewertet, um ein trockenes, mittleres und ein feuchtes Szenario zu charakterisieren. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Charakterisierung von der regionalen Situation Sachsen-Anhalts abweichen kann.

Neben diesen drei Realisierungen wurden in der vorliegenden Studie für Analysen der Hydrologie 100 Realisierungen verwendet, um eine bessere Spannbreite der Unsicherheit abbilden zu können. Diese 100 Realisierungen sind gleichberechtigte, mögliche Klimaentwicklungen, die die vorgegebene Erwärmung innerhalb Deutschlands widerspiegeln. Der Simulationszeitraum erstreckt sich über die Jahre 2007 bis 2060. Die räumliche Auflösung wird durch die zugrunde liegenden STAR-Stationen (insgesamt 70 in Sachsen-Anhalt) bestimmt und räumlich interpoliert. Stand der verwendeten Klimadaten aus dem Modell STAR (Version II) ist März 2008. Auch für STAR gilt eine Projektion strenggenommen nur für die entsprechende Station, allerdings werden in der Regel interpolierte Klimakarten dargestellt (Modellentwicklung: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)).

### 2.3.1. Das regionale Klimamodell WETTREG

Das Modell WETTREG beruht auf den Daten der Klimastationen des Deutschen Wetterdiensts (DWD). Insgesamt gingen in die vorliegende Studie 201 Messstationen des DWD innerhalb und angrenzend an das Bundesland ein, von denen 35 Stationen mehrere Klimavariablen messen und 166 ausschließlich den Niederschlag (Abb. 2.3.1). Die Modellergebnisse liegen in mehreren Realisierungen vor, die durch die Ergebnisse zur klimatischen Wasserbilanz als „trocken“, „mittel“ und „feucht“ charakterisiert werden. Auf diese drei Realisierungen greifen alle Sektoren bis auf den Sektor Wasser und Weinbau zurück. Die Analysen des Sektors Wasser (Kapitel 3.1) betrachten die Einzugsgebiete der Elbe und der Weser, welche die Landesgrenzen überschreiten (Abb. 2.3.1 und Abb. 2.3.2). Des Weiteren wurden für die hydrologischen Modellberechnungen alle 20 Realisierungen des Klimamodells WETTREG von insgesamt 799 Stationen verwendet. Die Untersuchungen zum Weinbau verwendet aus datentechnischen Gründen das Modell STAR (s. Kap. 3.7)



**Abb. 2.3.1: Die Stationen des Modells WETTREG der Studie**  
*(links für die Sektoren in den Grenzen des Bundeslandes, rechts für die Analysen des Sektors Wasser auf Basis der Flusseinzugsgebiete)*

Für die Sektorenanalysen mussten die WETTREG-Daten teilweise weiter aufbereitet werden. Zunächst enthält das Modell keine Schaltjahre, die jedoch für tagesbasierte Berechnungen der Analysen nötig sind und deshalb hinzugefügt wurden<sup>6</sup>. Zudem wurde anhand der Differenz der Klimavariablen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration nach Turc/Ivanov (Gleichung 1), die klimatische Wasserbilanz für die Zukunftsszenarien berechnet. Die räumliche Auflösung des Modells WETTREG ist von der Stationsdichte abhängig (s. Box 2.3.2). Um die Stationsdichte zur Verbesserung der Analysegrundlage zu erhöhen, erfolgte für die an den Niederschlagsstationen fehlenden Klimavariablen eine Übertragung von Klimadaten von den benachbarten Klimastationen auf die Niederschlagsstationen. Hierfür wurde eine abstandsgewichtete Interpolation (Inverse Distance Weighting) unter Einbeziehung der zehn nächstgelegenen Klimastationen und einer Höhenkorrektur<sup>7</sup> durchgeführt. Anschließend wurden Klimadaten dieser "virtuellen" Klimastationen mit gemessenen Stationswerten zur Validierung des Verfahrens verglichen. Sektorspezifisch wichen hiervon die Analysen der Sektoren Landwirtschaft und Wasser ab (Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4.), welche anstelle der Niederschlagsstationen Landkreismittelpunkte bzw. ÖWK<sup>8</sup>-Standorte für die Übertragung heranzogen<sup>9</sup>.

<sup>6</sup> Doppelung des 28. Februar

<sup>7</sup> Berechnung der Höhenabhängigkeit anhand eines linearen Modells und Interpolation der Residuen auf die linearen Werte

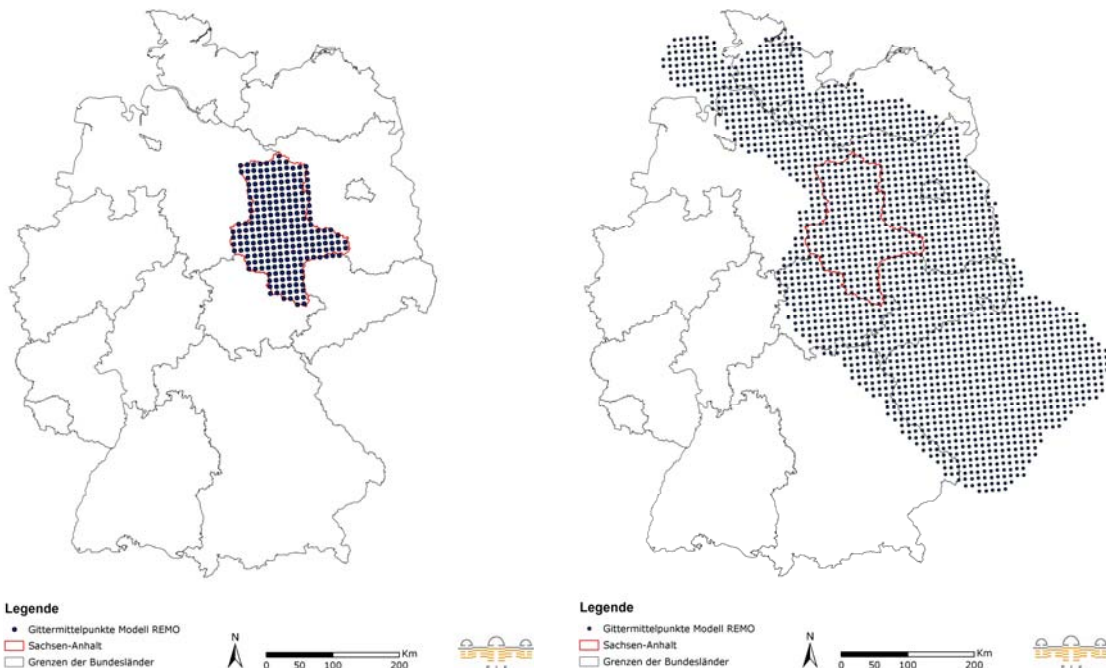
<sup>8</sup> Ökologische Waldzustandskontrolle

<sup>9</sup> Eine detaillierte Beschreibung der Methodik in genannten Kapiteln 3.3 und 3.4



### 2.3.2. Das regionale Klimamodell REMO

Als dynamisch-genestetes Modell liegen die Daten des Klimamodells REMO im Raster-Format vor. Für den Großteil der Analysen wurde ein Ausschnitt um Sachsen-Anhalt gewählt (Abb. 2.3.2), der insgesamt 236 Rasterzellen umfasst. Aufgrund der größeren räumlichen Ausdehnung der hydrologischen Analysen wurde in Kapitel 3.1 ein größerer Ausschnitt von insgesamt 2125 Rasterzellen analysiert.



**Abb. 2.3.2: Die Gittermittelpunkte des Modells REMO der Studie**  
(links für die Sektoren in den Grenzen des Bundeslandes, rechts für die Analysen des Sektors Wasser auf Basis der Flusseinzugsgebiete)

Vor Beginn der Analysen wurden die Daten des Modells REMO so aufbereitet, wie es das Max-Planck-Institut (MPI) für die Nutzung im Zusammenhang von Studien wie dieser empfiehlt (MPI 2009). Zur Ergänzung des Datensatzes wurde die Globalstrahlung (Gleichung 2) ermittelt und durch empirische Daten anhand der 1°-Zonalstreifen geprüft. Anschließend wurden analog zu dem Modell WETTREG die potentielle Evapotranspiration und die klimatische Wasserbilanz berechnet.



**Gleichung 1: Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach Turc/Ivanov**

$T \geq 5^\circ\text{C}$  (Turc-Ansatz)

$$ETP = 0,0031(RG + 209,4) \frac{T}{T + 15} ETPF_{mon} \quad [\text{mm/Tag}]$$

$T < 5^\circ\text{C}$  (Ivanov-Ansatz)

$$ETP = fk 0,000036 (T + 25)^2 (100 - RH) \quad [\text{mm/Tag}]$$

RG	Globalstrahlung in $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$
$ETPF_{mon}$	empirischer Faktor, monatsweise (s. Tab.)
fk	empirischer Korrekturwert
T	Tagesmittel der Temperatur in $^\circ\text{C}$
RH	Relative Luftfeuchte in %

**Gleichung 2: Berechnung der Globalstrahlung**

$$RAD_{iy,im,id,i} = a_{im,j} * (BEW_{iy,im,id,i} - \overline{BEW}_{im,j}) + \overline{RAD}_{im,j}$$

$iy, im, id$  Jahr, Monat, Tag

$i$  Nummer des Gitterpunktes

$j$  Nummer des  $1^\circ$ -Streifens

$\overline{BEW}_{im,j}$  aus den Stationsdaten berechnete mittlere monatliche Bewölkung

$\overline{RAD}_{im,j}$  aus den Stationsdaten berechnete mittlere monatliche Globalstrahlung

$a_{m,j} = RXY_{im,j} * SY_{im,j} / SX_{im,j}$  mit aus den Stationsdaten berechneter monatlicher:

RXY Korrelation zwischen Bewölkung und Globalstrahlung

SY Streuung der Globalstrahlung

SX Streuung der Bewölkung

**2.3.3. Betrachtete Klimavariablen**

Für die vorliegende Studie wurden Klimadaten der Regionalen Klimamodelle WETTREG und REMO hinsichtlich verschiedener Zeiträume (Tab. 2.3.2), Klimakenngrößen (Tab. 2.3.3) und Klimakenntage (Tab. 2.3.4) ausgewertet. Basis der Auswertung sind die Tageswerte der Klimavariablen Tagesmaximal-, Tagesmittel- und Tagesminimaltemperatur sowie Niederschlag, Klimatische Wasserbilanz und Windgeschwindigkeit. Für die Analysen der einzelnen Sektoren der Studie sind jeweils unterschiedliche Zeiträume und Variablen zu berücksichtigen. Als Grundlage für den gesamten Bericht finden sich in Kapitel 2.5 Auswertungen zu den Klimakenngrößen Temperatur, Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz jeweils für die durchschnittlichen Jahreswerte und den Jahresverlauf sowie Auswertungen zu den jährlichen Werten der Klimakenngrößen. Detaillierte Untersuchungen anderer Zeiträume und Variablen erfolgen jeweils in den relevanten Sektorenkapiteln. Darüber hinaus sind weitere räumliche Darstellungen der Variablen – sofern nicht in den Sektorenkapiteln abgebildet – im Anhang zu Kapitel 2.5 zu finden.

**Tab. 2.3.2: Betrachtete meteorologische und hydrologische Zeiträume**

Zeitraum	Definition
Meteorologisch	
Jahr	Januar – Dezember
Winter	Dezember – Februar
Sommer	Juni – August
Vorsommer	Mai – Juni
Vegetationsperiode	April – September
Hydrologisch	
Sommer	Mai – Oktober
1. Hälfte des hydrologischen Sommers	Mai – Juli

**Tab. 2.3.3: Definitionen ausgewählter Klimakenngrößen**

Weitere Kenngrößen	Definition	Zeitliche Auflösung
Tagesmaximum der Lufttemperatur (Tmax)	Tmax [°C]	Jahresverlauf
Tagesminimum der Lufttemperatur (Tmin)	Tmin [°C]	Jahresverlauf
Tagesmittel der Lufttemperatur (Tmit)	Tmit [°C]	Jahresverlauf, °C/Jahr, °C/Winter, °C/Sommer
Niederschlag (NS)	NS [mm]	Jahresverlauf, mm/Jahr, mm/Winter, mm/Sommer
Klimatische Wasserbilanz (KWB)	KWB [mm]	Jahresverlauf, mm/Jahr, mm/Winter, mm/Sommer
Trockene Tage	≤ 1 mm NS/Tag	Tage/Jahr, Tage/ Winter, Tage/Sommer
Trockenphasen	≥ 20 aufeinanderfolgende Tage mit ≤ 1 mm NS/Tag	Hydrologischer Sommer
Tage ohne Niederschlag	<0 mm NS/Tag	Mai – Juli
Starkniederschlag	≥ 10 mm NS/Tag	Tage/Jahr, Tage/ Winter, Tage/Sommer
Tage mit ≥ 4 Beaufort	Mittlere tägliche Windgeschwindigkeit ≥ 5,5 m/s	Tage/Jahr
Tage mit ≥ 6 Beaufort	Mittlere tägliche Windgeschwindigkeit ≥ 10,8 m/s	Tag/Jahr

**Tab. 2.3.4: Definitionen der Klimakenntage in der Sachsen-Anhalt-Studie**

Klimakenntage	Definition	Zeitliche Auflösung
Eistage	Tagesmaximaltemperatur < 0°C	Tage/Jahr
Frosttage	Tagesminimaltemperatur > 0°C	
Sommertage	Tagesmaximaltemperatur ≥ 25°C	
Heiße Tage	Tagesmaximaltemperatur ≥ 30°C	
Tropennächte	Tagesminimaltemperatur ≥ 20°C	

## 2.4. Die mittleren klimatischen Verhältnisse in Sachsen-Anhalt im Basiszeitraum

Den Analysen in diesem Bericht liegen als Basiszeitraum die mittleren klimatischen Verhältnisse im Land Sachsen-Anhalt im Zeitraum 1961-1990 zu Grunde, gegenüber denen die Änderungssignale der Klimamodelle ausgewertet wurden. Diese werden im Folgenden kurz dargestellt. Die Informationen über Temperatur und Niederschlag basieren auf den gemessenen Daten der Klimastationen des DWD innerhalb und angrenzend an Sachsen-Anhalt (Abb. 2.3.1 und Abb. 2.3.2), die Darstellung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) beruht auf Berechnungen des DWD.

### 2.4.1. Temperatur

Wie in Abb. 2.4.1 zu sehen ist, folgt die räumliche Temperaturdifferenzierung in Sachsen-Anhalt klar den orographischen Gegebenheiten des Landes. Die Jahresdurchschnittstemperaturen in den Mittelgebirgslagen von 7,2°C variieren über eine Spannbreite von 3,0°C bis 8,5°C. In den tiefer liegenden Bereichen erreichen die Durchschnittstemperaturen höhere Werte zwischen 8,6°C und 9°C und sind weniger differenziert. Die Jahresmitteltemperatur für das gesamte Land Sachsen-Anhalt liegt für den Zeitraum 1961-1990 bei 8,6°C.

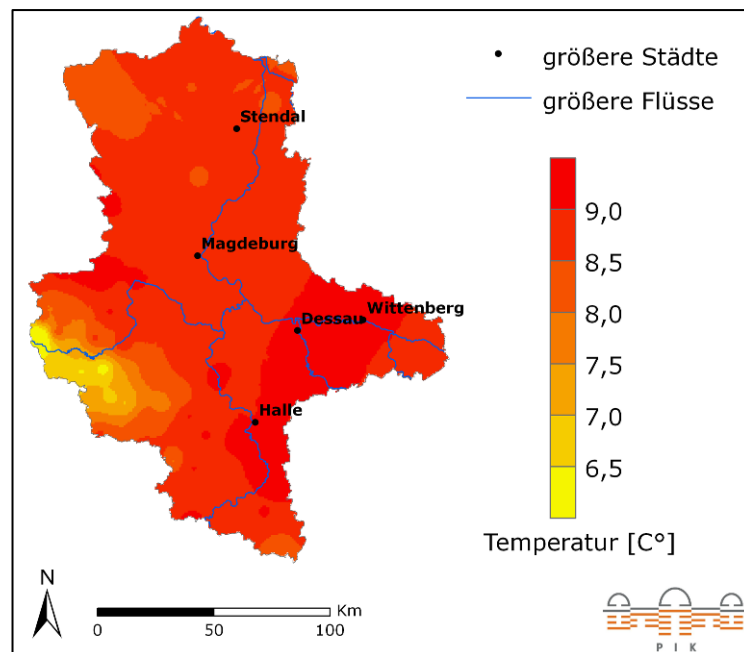
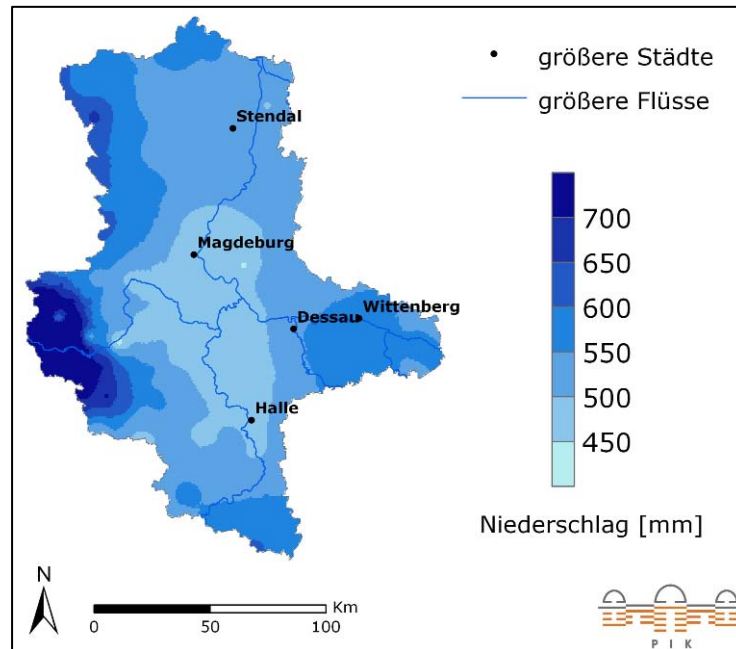


Abb. 2.4.1: Jahresmittel der Lufttemperatur im Basiszeitraum 1961-1990

### 2.4.2. Niederschlag

Bei der räumlichen Verteilung des Niederschlags (Abb. 2.4.2) werden die orographischen Gegebenheiten des Landes ebenfalls deutlich. Insgesamt beträgt die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme in Sachsen-Anhalt rund 550 mm. Dabei liegt das Mittelgebirge mit durchschnittlich 758 mm und einem Maximum von über 1700 mm über dem Lan-

desdurchschnitt. Am wenigsten Niederschlag ist mit 500 mm in der Jahressumme in den Ackerebenen entlang der Elbe und Saale zu verzeichnen, die auf Grund ihrer Lage im Lee des Harzes bereits heute sehr trocken sind und als mitteldeutsches Trockengebiet bezeichnet werden.

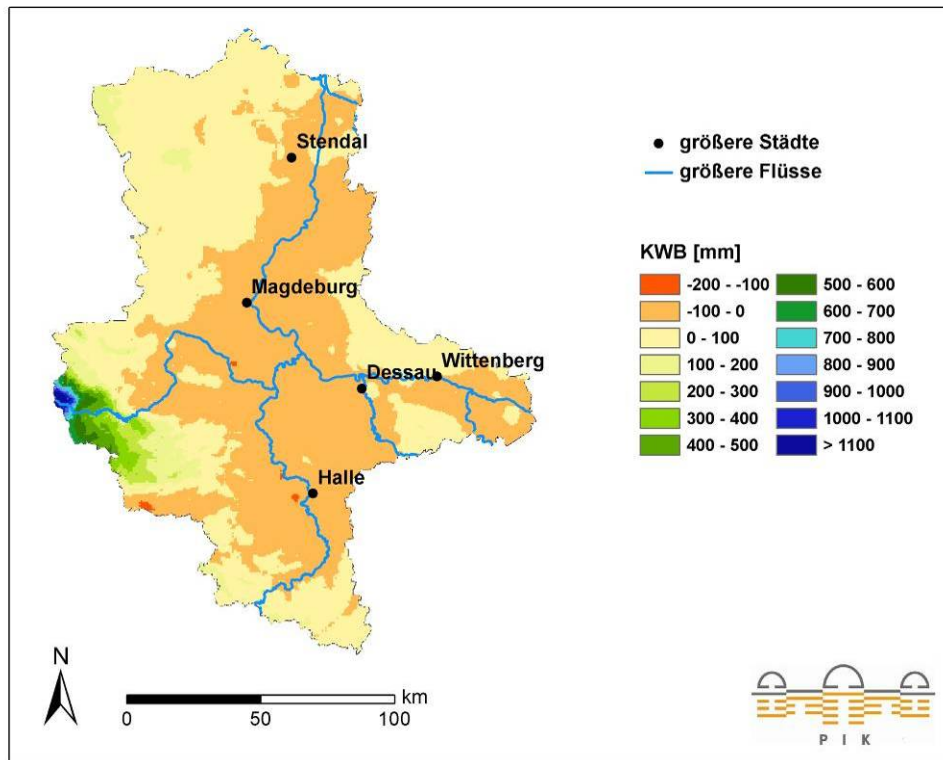


**Abb. 2.4.2: Durchschnittliche Jahresniederschlagssumme im Basiszeitraum 1961-1990**

### 2.4.3. Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz (KWB) (Abb. 2.4.3) ist eine zentrale Kenngröße des Wasserhaushaltes und von hoher Relevanz für verschiedene in dieser Studie betrachtete Sektoren. Sie wird als Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung berechnet. Für beide zugrunde liegenden Klimavariablen sind starke Veränderungen in den nächsten Jahrzehnten zu erwarten (vgl. z.B. Kapitel 2.5.3.2), was erhebliche Auswirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt haben kann (Hattermann et al. 2007). Veränderungen der KWB haben darüber hinaus Konsequenzen für das Wasserdargebot, die Produktivität der Land- und Forstwirtschaft, die klimatische Waldbrandgefahr sowie Ökosysteme und Arten. Beispielsweise untersuchten Parry et al. (2004) das Zusammenwirken des CO<sub>2</sub>-Düngeeffektes einerseits, welcher zu Ertragssteigerung in der Land- und Forstwirtschaft führen kann, und steigenden Lufttemperaturen andererseits, welche mit höheren Evaporationsverlusten und abnehmender Bodenfeuchte einhergehen und zu Ernterückgängen führen können.

Steigende Temperaturen spielen eine besondere Rolle für die Bodenfeuchte, daher ist bei der Betrachtung dieser Größe die Verdunstung bzw. Wasserbilanz entscheidender als die alleinige Berücksichtigung des Niederschlags. Simulationen im Elbeinzugsgebiet in Brandenburg zeigen deutliche, zu erwartende Rückgänge des verfügbaren Bodenwassers in den nächsten Jahrzehnten (Holsten et al. 2009). Dies kann sich wiederum auf atmosphärische Bedingungen auswirken, bzw. diese verstärken. So haben niedrige Werte der Bodenfeuchte im Sommer 2003 in einigen Regionen in Europa zu einer Verstärkung der Hitzewelle geführt (Fischer et al. 2007).



**Abb. 2.4.3: Durchschnittliche jährliche klimatische Wasserbilanz (KWB) im Zeitraum 1961-1990, basierend auf Berechnungen des DWD**

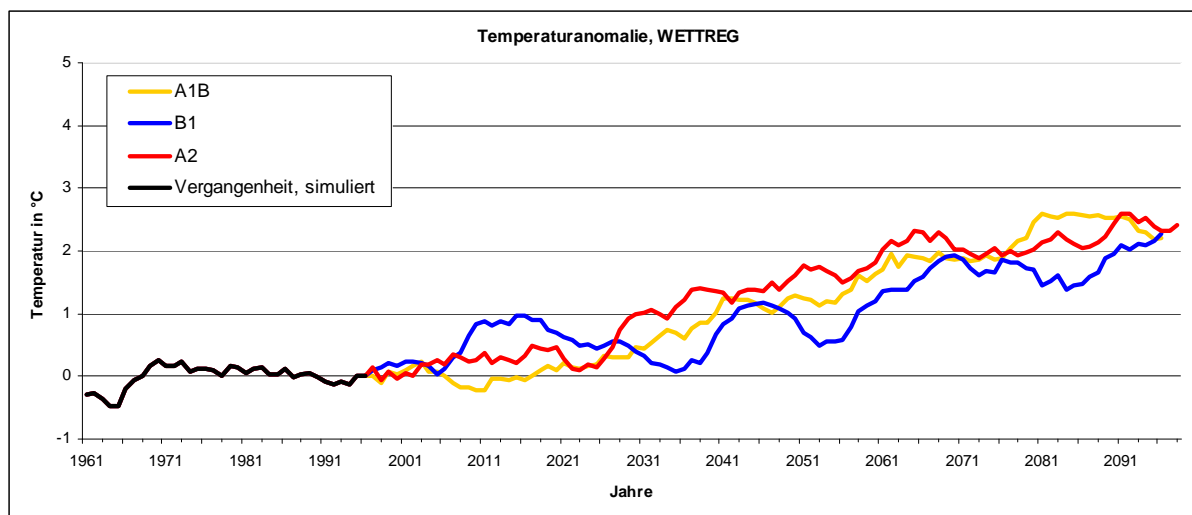
In Abb. 2.4.3 wird deutlich, dass das mitteldeutsche Trockengebiet bereits heute im Jahresmittel eine negative klimatische Wasserbilanz aufweist. Entlang der Flussläufe im Zentrum des Landes ist die jährliche klimatische Wasserbilanz defizitär mit Werten von bis zu -100 mm/Jahr. Im Landesmittel ist die Bilanz mit 20 mm jedoch im positiven Bereich. Insbesondere im Harz sind dabei hohe positive Werte von über 1500 mm zu verzeichnen. Betrachtet man das Landesmittel ohne diese besonders feuchte Region liegt die Bilanz zwar gerade noch im positiven Bereich, ist mit 1 mm im Jahresdurchschnitt jedoch deutlich niedriger.

## 2.5. Die projizierte Veränderung der Klimakenngrößen nach den Modellen WETTREG und REMO

Im Folgenden wird ein Überblick über die projizierten Veränderungen der Klimavariablen Temperatur, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz bis zum Ende des Jahrhunderts im Land Sachsen-Anhalt gegeben. Um die mögliche Bandbreite der Veränderungen sowie räumliche und jahreszeitliche Unterschiede der Ergebnisse der zwei regionalen Klimamodelle für jeweils drei der IPCC-Emissionsszenarien darzustellen, erfolgt die Auswertung in mehreren Schritten. Die Abb. 2.5.1 bis Abb. 2.5.4 geben einen Überblick über die Temperatur- und Niederschlagsanomalien bis zum Ende des Jahrhunderts. In Tab. 2.5.1 und Tab. 2.5.2 ist zunächst eine Übersicht über die Jahresmittelwerte im Basiszeitraum und den zukünftigen Szenarienzeiträumen für die genannten Klimavariablen zu sehen. Darauf folgt die Interpretation der räumlichen Verteilung der Änderungssignale (Abb. 2.5.5 bis Abb. 2.5.7). Weiterhin kann der Jahresverlauf der Klimavariablen Einblicke in die mögliche jahreszeitliche Verschiebung des Klimageschehens geben (Abb. 2.5.8).

### 2.5.1. Temperaturanomalien nach den Modellen WETTREG und REMO

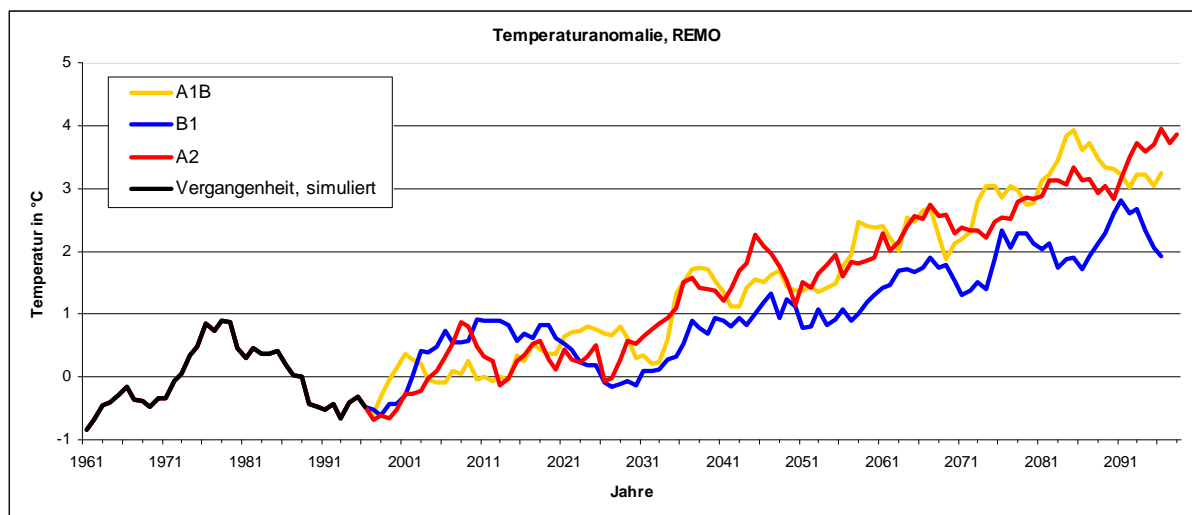
Die Abb. 2.5.1 und Abb. 2.5.2 zeigen die Temperaturanomalien (Abweichung der Werte) nach den Modellen WETTREG und REMO für die Szenarien A2, A1B und B1 im Zeitraum 1961-2100 gegenüber dem Mittel 1961-1990<sup>10</sup>. Beide Modelle zeigen einen deutlichen Temperaturanstieg unter allen Szenarien bis zum Ende des Jahrhunderts. Die Zunahme liegt unter Annahme der Entwicklung nach B1 im Schnitt am niedrigsten, der Kurvenverlauf der beiden anderen Szenarien ist im Wesentlichen ähnlich stark. Auffallend ist, dass im Modell REMO von einem deutlich schnelleren Temperaturanstieg ausgegangen wird und somit bis zum Ende des Szenariozeitraumes eine höhere Temperatur unter allen Szenarien projiziert wird. Für beide Modelle ergibt sich ein höchst signifikanter Trend des Temperaturanstiegs nach allen Szenarien<sup>11</sup>.



**Abb. 2.5.1: Temperaturanomalie als Vergleich der Jahresmitteltemperaturen zum Zeitraum 1961-1990 als gleitendes 5-Jahresmittel als Flächenmittel für Sachsen-Anhalt, Modell WETTREG**

<sup>10</sup> Der glattere Kurvenverlauf der Ergebnisse des Modells WETTREG im Vergleich zu REMO ist auf die Mittelung der drei Realisationen trocken, mittel und feucht zurückzuführen.

<sup>11</sup> Nach Menn-Kendall Trend Test, höchst signifikant  $p \leq 0,001$



**Abb. 2.5.2: Temperaturanomalie als Vergleich der Jahresmitteltemperaturen zum Zeitraum 1961-1990 als gleitendes 5-Jahresmittel als Flächenmittel für Sachsen-Anhalt, Modell REMO**

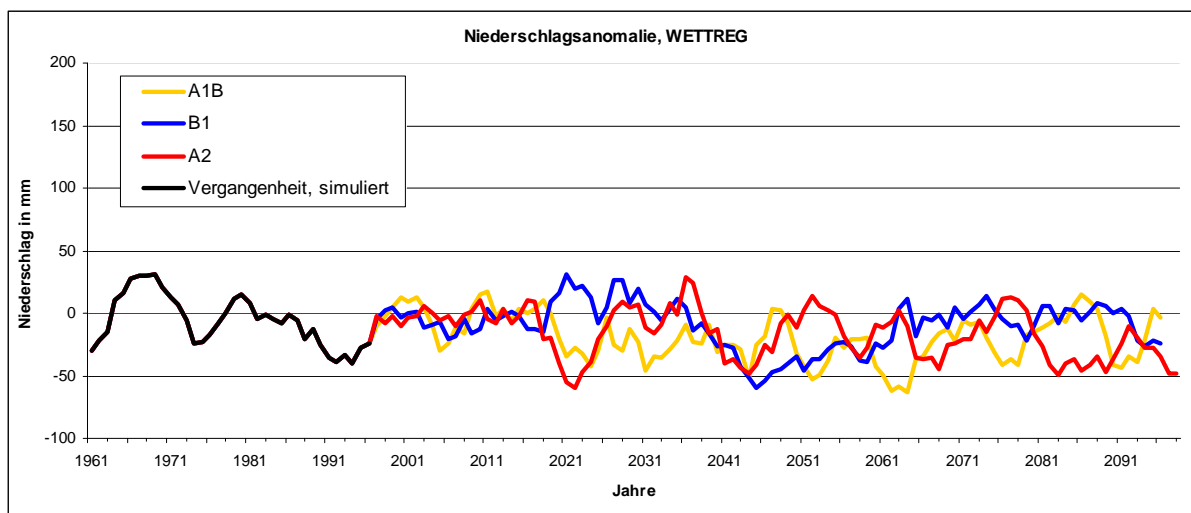
### 2.5.2. Niederschlagsanomalien nach den Modellen WETTREG und REMO

Die Ergebnisse der Niederschlagsanomalien der beiden Modelle WETTREG und REMO fallen unterschiedlich aus<sup>12</sup>. Im Modell WETTREG ist unter allen Szenarien ein Trend zu weniger Niederschlag zu erkennen, im Gegensatz dazu projiziert REMO eine Zunahme des Jahresniederschlags in Sachsen-Anhalt. Das Szenario B1 ist dabei in beiden Modellen im Allgemeinen das Feuchteste, so dass unter diesen Annahmen im Modell WETTREG die geringste abnehmende Tendenz und bei REMO die höchste zunehmende Tendenz des Niederschlages zu verzeichnen ist. Die Ergebnisse bei REMO zeigen starke Schwankungen der Niederschlagsanomalien über den Verlauf des Jahrhunderts. Interannuelle Schwankungen sind auch bei WETTREG zu erkennen, allerdings deutlich schwächer ausgeprägt. Der Signifikanztest<sup>13</sup> für Niederschlagsveränderungen zeigt für die Modelle und Szenarien unterschiedliche Signifikanzen. So ist der Trend der Niederschlagssummen bei WETTREG für das Szenario A2 und bei REMO für das Szenario B1 signifikant, für alle anderen Szenarien ist der Trend jedoch nicht signifikant.

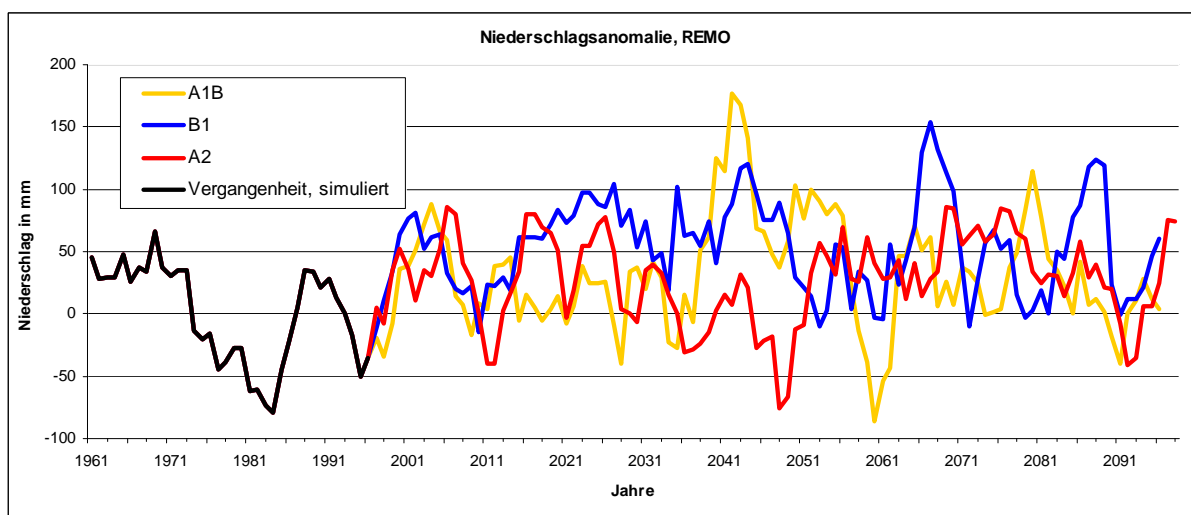
<sup>12</sup>Der glattere Kurvenverlauf der Ergebnisse des Modells WETTREG im Vergleich zu REMO ist auf die Mittelung der drei Realisationen trocken, mittel und feucht zurückzuführen.

<sup>13</sup> Nach Menn-Kendall Trend Test: nicht signifikant  $p \geq 0,05$ , Tendenz  $0,05 < p < 0,1$ , signifikant  $0,05 < p < 0,1$ , hoch signifikant  $0,01 \leq p < 0,001$ , höchst signifikant  $p \leq 0,001$





**Abb. 2.5.3: Niederschlagsanomalie als Vergleich der Jahresniederschlagssummen zum Zeitraum 1961–1990 als gleitendes 5-Jahresmittel als Flächenmittel für Sachsen-Anhalt, WETTREG**



**Abb. 2.5.4: Niederschlagsanomalie als Vergleich der Jahresniederschlagssummen zum Zeitraum 1961–1990 als gleitendes 5-Jahresmittel als Flächenmittel für Sachsen-Anhalt, REMO**

### 2.5.3. Klimaveränderungen nach den Modellen WETTREG und REMO

Für die Übersicht der Jahresmittel wurden zunächst die Werte für das gesamte Land Sachsen-Anhalt ermittelt, darüber hinaus sind in Klammern die Werte für das Land ohne den Naturraum „Mittelgebirge“ mit dem Harz angegeben (vgl. Abb. 1.3.1, Kap. 1.), da dieser sich auf Grund seiner Höhenlage deutlich vom Rest des Landes unterscheidet.

**Tab. 2.5.1: Klimatische Durchschnittswerte für das Land Sachsen-Anhalt nach WETTREG für die Klimavariablen Temperatur (Tmit), Niederschlag (NS) und die klimatische Wasserbilanz (KWB) als gemittelte Jahresdurchschnittswerte. Die Werte in Klammern beziehen sich auf Sachsen-Anhalt ohne den Naturraum „Mittelgebirge“.**

	A2				A1B			B1		
	1961-1990	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
<b>Tmit</b> [°C]	8,9 (9,0)	9,4 (9,5)	10,6 (10,7)	11 (11,1)	9,1 (9,2)	10,3 (10,4)	11,2 (11,2)	9,4 (9,4)	9,9 (9,9)	10,7 (10,7)
<b>NS</b> [mm]	552 (538)	543 (527)	526 (510)	524 (508)	539 (525)	517 (502)	534 (518)	557 (557)	520 (520)	544 (544)
<b>KWB</b> [mm]	19 (1)	-16 (-35)	-78 (-98)	-90 (-110)	-6 (-24)	-70 (-89)	-72 (-91)	4 (4)	-54 (-54)	-55 (-56)

Insgesamt ist nach den Ergebnissen des Modells WETTREG im gesamten Land Sachsen-Anhalt, einschließlich des Harzes bis zum Ende des Jahrhunderts eine Erhöhung der Jahresdurchschnittstemperatur zu erwarten, die je nach Emissionsentwicklung zwischen 1,8 ° (B1) und 2,3 °C (A1B) betragen kann (Tab. 2.5.1). Der mittlere Jahresniederschlag zeigt in den Modellläufen für den Zeitraum 2071-2100 eine rückläufige Tendenz, mit Abnahmen von 8 mm (B1) bis 28 mm (A2). Dies hat Auswirkungen auf die klimatische Wasserbilanz, deren Werte bis Ende des Jahrhunderts unter allen Szenarien negativ ausfallen. Das Defizit kann bis Ende des Jahrhunderts im Mittel zwischen -55 mm (B1) und -90 mm (A2) liegen, so dass Wassermangelsituationen auftreten können. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, sind in der Mittelgebirgsregion klimatisch deutliche Unterschiede zum Rest des Landes auszumachen. Die Temperaturen liegen hier durchschnittlich niedriger, die Niederschläge dagegen höher. Diese Tendenz setzt sich auch in der Zukunft fort (Tab. 2.5.1, Vergleich der Werte mit und ohne Klammern). Der Landesdurchschnitt ohne Mittelgebirgsregion zeigt daher insgesamt wärmere und trockenere Bedingungen als der Durchschnitt mit dieser Region.

In Tab. 2.5.2 sind die durchschnittlichen Jahreswerte der Variablen Temperatur und Niederschlag sowie die klimatische Wasserbilanz abgebildet, wie sie das Modell REMO für die entsprechenden Szenarien und Zeitscheiben berechnet.

**Tab. 2.5.2: Klimatische Durchschnittswerte für das Land Sachsen-Anhalt nach REMO für die Klimavariablen Temperatur (Tmit), Niederschlag (NS) und die klimatische Wasserbilanz (KWB) als gemittelte Jahresdurchschnittswerte. Die Werte in Klammern beziehen sich auf Sachsen-Anhalt ohne den Naturraum „Mittelgebirge“.**

	A2				A1B			B1		
	1961-1990	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
<b>Tmit</b> [°C]	9,1 (9,3)	9,6 (9,8)	11,0 (11,1)	12,1 (12,3)	9,7 (9,8)	10,9 (11,1)	12,1 (12,3)	9,5 (9,7)	10,3 (10,4)	11,1 (11,3)
<b>NS</b> [mm]	702 (687)	722 (706)	718 (704)	741 (727)	714 (698)	757 (742)	723 (708)	765 (750)	761 (748)	745 (731)
<b>KWB</b> [mm]	67 (48)	77 (57)	28 (11)	40 (23)	65 (46)	81 (50)	14 (-3)	125 (106)	102 (85)	71 (54)

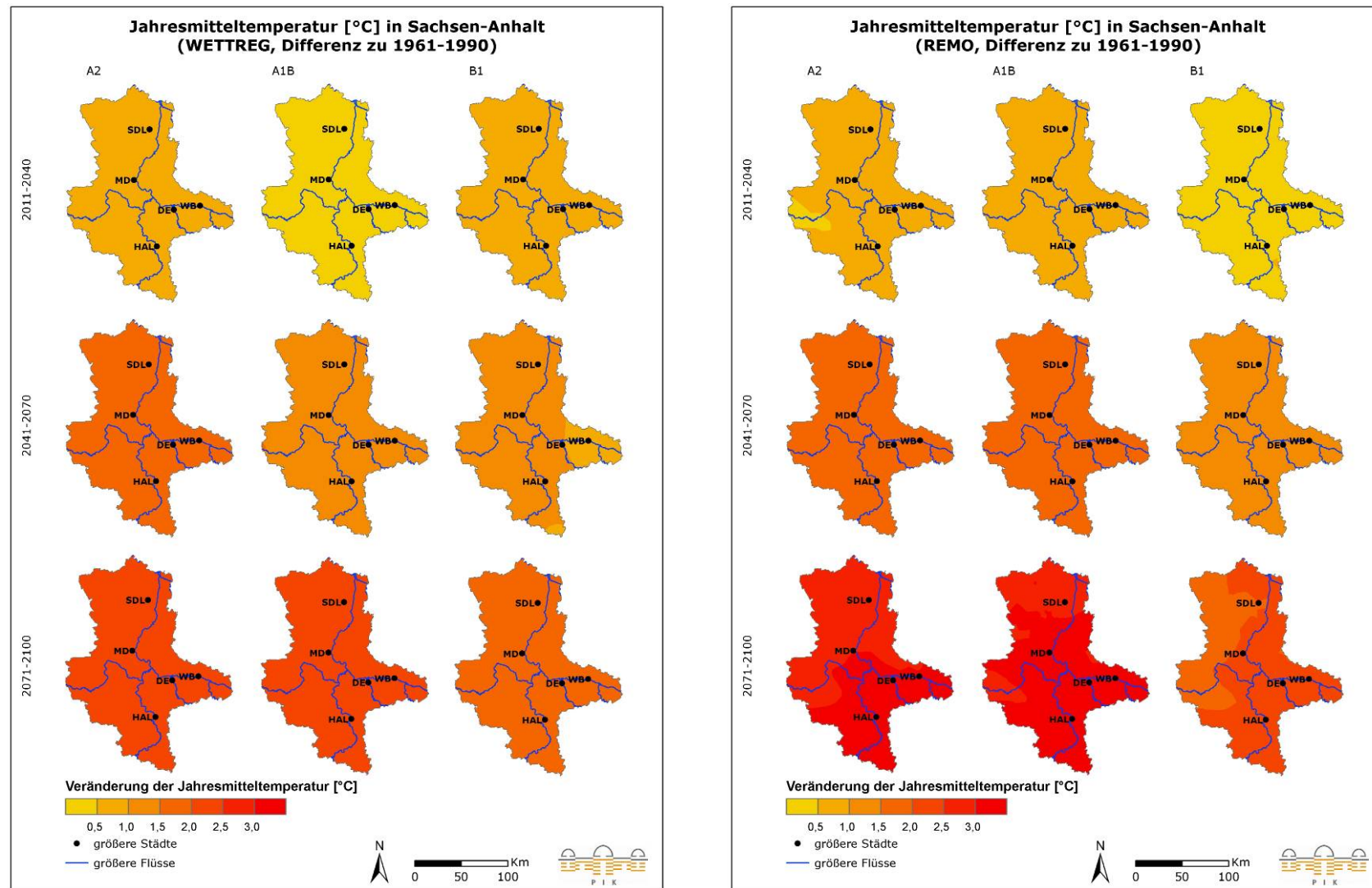
Bis zur Mitte des Jahrhunderts sind die Ergebnisse der Jahresmitteltemperatur denen des Modells WETTREG ähnlich (vgl. Tab. 2.5.1), zum Ende des Jahrhunderts liegen die Ergebnisse nach dem Modell REMO mit Zunahmen zwischen 2°C (B1) und 3°C (A1B, A2) deutlich höher. Die Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung des Jahresniederschlags unterscheiden sich auch zwischen den beiden Modellen. Im Gegensatz zu WETTREG projiziert REMO eine Zunahme des Niederschlags zwischen 21 mm (A1B) und 43 mm (B1) gegen Ende des Jahrhunderts. Ähnliches gilt auch für die Wasserbilanz: Unter den Annahmen von REMO fällt die klimatische Wasserbilanz bereits heute deutlich positiver aus als nach dem Modell WETTREG. Je nach Szenarioannahmen ist mit Reduzierungen von -53 mm (A1B) bis hin zu sehr geringen Zunahmen von 4 mm (B1) gegen Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Obwohl insgesamt eine Verringerung der Wasserbilanz im Verhältnis zum Basiszeitraum zu erwarten ist, ausgenommen +4mm unter dem Szenario B1, liegt die Bilanz im Zeitraum 2071-2100 im Allgemeinen im positiven Bereich. Es ist bei dem Modell REMO jedoch zu beachten, dass bereits für die Modellierung des Basiszeitraumes die Ergebnisse für den Niederschlag mit 702 mm um etwa 150 mm über den gemessenen Werten für das Landesmittel liegen<sup>14</sup>.

### 2.5.3.1. Temperaturveränderungen

Die räumliche Verteilung des Änderungssignals der Jahresmitteltemperatur über das kommende Jahrhundert ist in Abb. 2.5.5 für beide Modelle WETTREG und REMO zu sehen. Die untersuchten Szenarien sind von links nach rechts gegenübergestellt, von oben nach unten zeigt sich die Veränderung über den Verlauf des Jahrhunderts. Während die Verteilung der absoluten Jahresmitteltemperatur im Land Sachsen-Anhalt in Zukunft weiterhin den orographischen Gegebenheiten folgt (vgl. Anhang zu Kapitel 2.5), zeigt sich beim Anstieg der Temperaturen bei beiden Modellen ein weitgehend einheitlicher räumlicher Trend. Je nach Szenario unterscheidet sich die Änderungsintensität, jedoch mit geringer räumlicher Differenzierung. Der Anstieg der Jahresmitteltemperatur liegt beim Modell WETTREG bis zum Ende des Jahrhunderts zwischen 1,75-1,95°C (B1) und 2,2-2,35°C (A1B, A2). Tendenziell sind im Nordwesten des Landes geringfügig höhere Temperaturanstiege im Jahresmittel möglich als im Südosten.

Im Gegensatz dazu sind nach dem Modell REMO die Aussagen für die verschiedenen Szenarien deutlich unterschiedlicher. Die räumliche Bandbreite zwischen den Szenarien zeigt sich jedoch ähnlich gering, so sind Temperaturzunahmen von 1,9-2,2°C (B1) bis 2,9-3,3°C (A1B) möglich. Deutlicher ist die räumliche Differenzierung der Ergebnisse im Vergleich zu WETTREG, mit den höchsten Temperaturzunahmen im südöstlichen Teil von Sachsen-Anhalt, während im Norden sowie in der Mittelgebirgsregion geringfügig schwächere Zunahmen projiziert werden.

<sup>14</sup> Für einen detaillierten Vergleich der Ergebnisse der beiden Klimamodelle und der Ursachen für Niederschlagsdifferenzen siehe Modellvergleich in Kapitel 2.6.



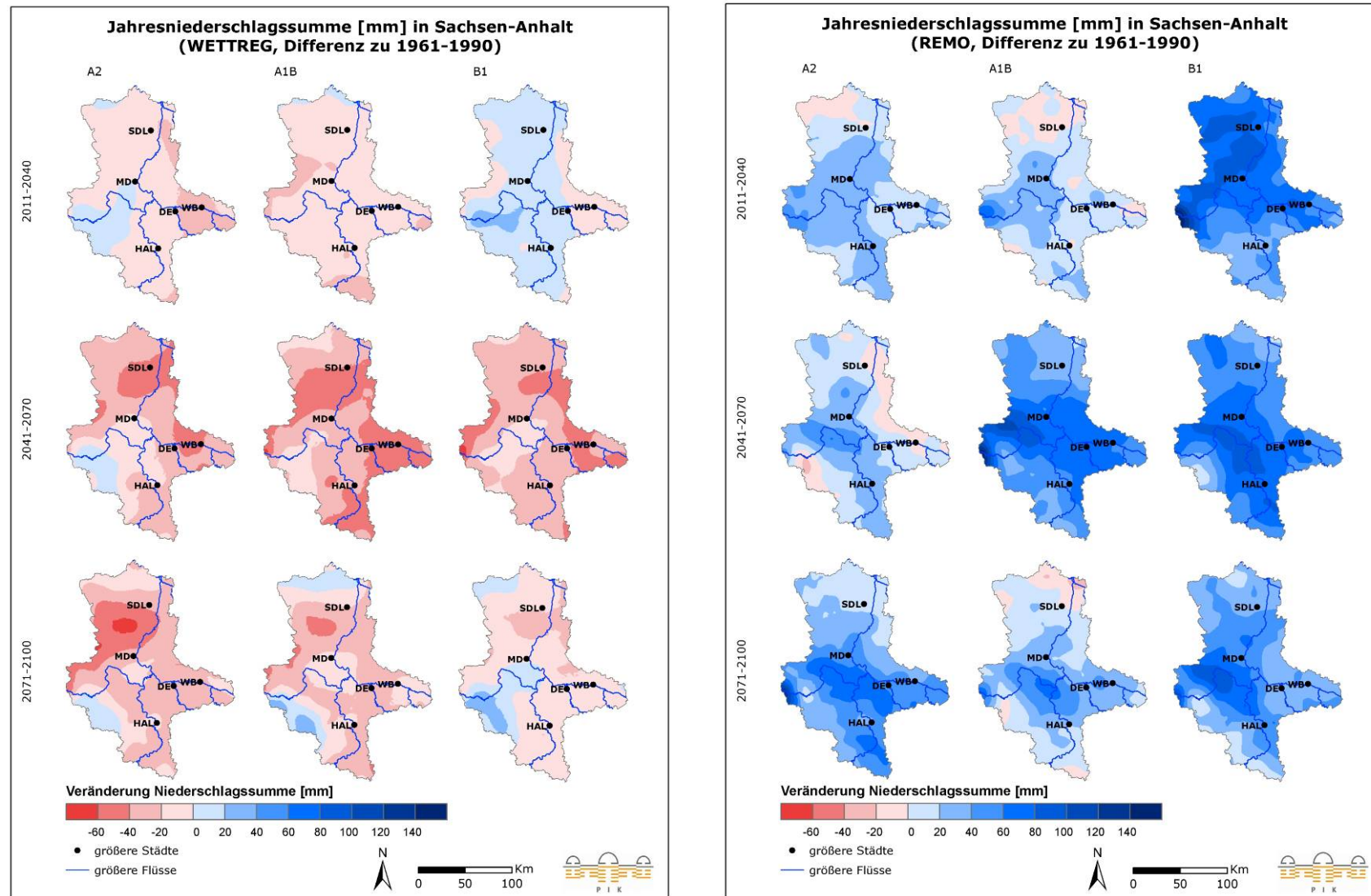
**Abb. 2.5.5: Veränderung der Jahresmitteltemperatur [°C] in Sachsen-Anhalt**  
nach den Modellen WETTREG (links) und REMO (rechts) für die Emissionsszenarien A2, A1B und B1 (von links nach rechts) für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 (von oben nach unten) gegenüber dem Basiszeitraum 1961-1990

### 2.5.3.2. Niederschlagsveränderungen

Wie sich bereits bei der Darstellung der Niederschlagsanomalien (vgl. Abb. 2.5.3) gezeigt hat, wird im Modell WETTREG vorwiegend eine Abnahme der Niederschlagssummen über alle Szenarien projiziert (Abb. 2.6.2). Dabei ist das Szenario A2 bis zum Ende des Jahrhunderts insgesamt am trockensten. Unter den Szenarien A1B und B1 sind im Zeitraum 2041-2070 starke Niederschlagsrückgänge für das gesamte Land zu verzeichnen, die jedoch zum Zeitraum 2071-2100 weniger stark hervortreten und südlich des Harzes sind auch geringe Zunahmen zu erkennen. Besonders stark zeigen sich die Rückgänge bei allen Szenarien und Zeitscheiben im nördlichen Teil des Landes, wo unter Annahmen des Szenarios A2 Niederschlagsrückgänge bis über 80 mm auftreten.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen des Modells WETTREG zeigt REMO eine allgemeine Zunahme der Niederschlagssummen für das gesamte Jahrhundert gegenüber dem Basiszeitraum. Das Szenario A2 ist hier für den Zeitraum 2041-2070 das trockenste und zeigt die geringsten Niederschlagszunahmen sowie geringe Abnahmen im äußersten Nordosten und Südwesten des Landes. Für die letzte Zeitscheibe 2071-2100 zeigt das Szenario A1B Abnahmen der Jahresniederschlagssummen im Norden und Süden und Südwesten des Landes sowie die geringsten Niederschlagszunahmen im Vergleich zu den anderen betrachteten Szenarien in diesem Zeitraum. Insbesondere das mitteldeutsche Trockengebiet liegt nach den Ergebnissen von REMO im Bereich von Niederschlagszunahmen im Jahresmittel. Erkennbar ist außerdem ein weiterer Anstieg der Niederschläge im Gebiet des Harzes, das bereits unter heutigen klimatischen Verhältnissen hohe Niederschläge zu verzeichnen hat.





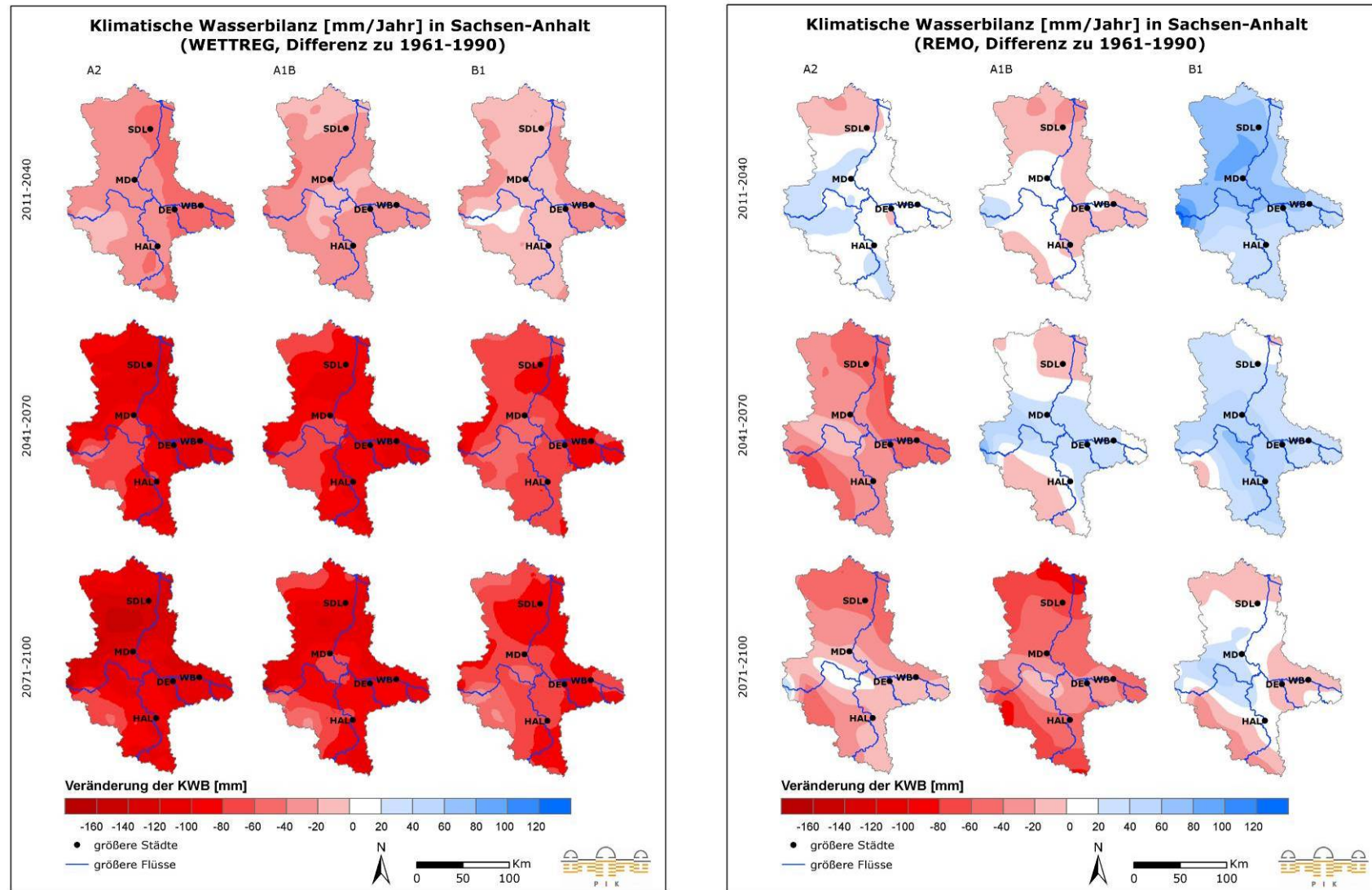
**Abb. 2.5.6: Veränderung der Jahresniederschlagssumme [mm] in Sachsen-Anhalt nach den Modellen WETTREG (links) und REMO (rechts) für die Emissionsszenarien A2, A1B und B1 (von links nach rechts) für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 (von oben nach unten) gegenüber dem Basiszeitraum 1961-1990**



### 2.5.3.3. Veränderungen der Klimatischen Wasserbilanz

Analog zu den erwarteten Veränderungen der Jahresniederschläge und Temperaturen sind im Laufe der kommenden Jahrzehnte Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz zu erwarten (Abb. 2.5.7). Nach dem Modell WETTREG ist unter allen Emissionsszenarien ein Rückgang der Wasserverfügbarkeit in Sachsen-Anhalt anzunehmen. Nach den Annahmen des Szenarios A2 sind dabei Abnahmen von über -160 mm möglich. Insgesamt sind die Rückgänge im Norden, Osten und Süden des Landes am stärksten, die Rückgänge im bereits von Wasserstress betroffenen Mitteldeutschen Trockengebiet sind z.T. geringer.

Das Modell REMO hingegen geht bis zum Ende des Jahrhunderts von einer deutlich geringeren Reduktion der KWB aus, in manchen Teilen des Landes ist den Szenarien nach, insbesondere nach B1 sogar eine positive Entwicklung der Wasserbilanz zu erwarten. Nach dem Szenario A1B und B1 ist im Zeitraum 2041-2070 für das Mitteldeutsche Trockengebiet eine höhere Klimatische Wasserbilanz möglich, bis zum Ende des Jahrhunderts ist unter Szenario A1B jedoch eine Abnahme für das gesamte Land projiziert. Das Szenario A2 geht für den Zeitraum 2041-2070 von einem Rückgang der Wasserverfügbarkeit im Gegensatz zum Basiszeitraum aus, der jedoch zum Ende des Jahrhunderts wieder weniger ausgeprägt ist und für das Mitteldeutsche Trockengebiet sowie für den Harz nur noch sehr geringe Veränderungen zeigt.



**Abb. 2.5.7: Veränderung der Klimatischen Wasserbilanz [mm] in Sachsen-Anhalt nach den Modellen WETTREG (links) und REMO (rechts) für die Emissionsszenarien A2, A1B und B1 (von links nach rechts) für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 (von oben nach unten) gegenüber dem Basiszeitraum 1961-1990**

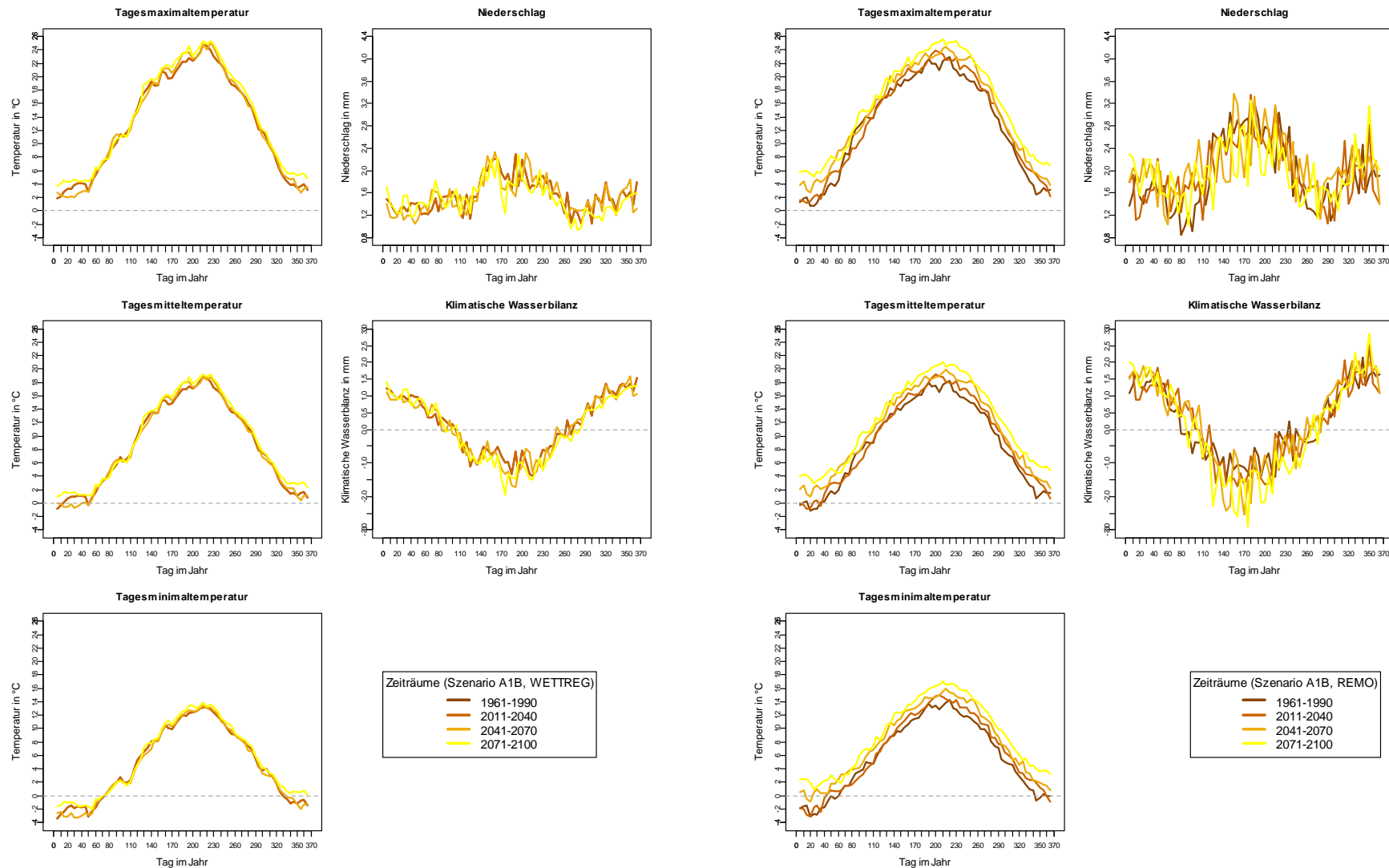
#### 2.5.3.4. Jahresverlauf ausgewählter Klimavariablen

Es ist davon auszugehen, dass neben einer Veränderung der Jahresmittel der Klimavariablen sich auch deren jahreszeitlicher Verlauf teilweise verändert. Dies zeigt sich in Abb. 2.5.8 für den Verlauf der Maxima, Minima und Mittel der Tagestemperatur sowie für Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz für die Modelle WETTREG und REMO unter dem Szenario A1B (Abb. für die Szenarien A2 und B1 im Anhang zu Kapitel 2.5).

Insgesamt ist bei dem Modell WETTREG über das gesamte Jahr ein leichter Temperaturanstieg zu erwarten. Am deutlichsten zeigt sich diese Temperaturzunahme bei den Tagesmaxima. Innerhalb des Jahresverlaufes ist der Anstieg in den Wintermonaten (DJF) am stärksten: unter den Szenarien A1B und B1 ist mit einer deutlichen Abnahme von Frosttagen zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen, unter A2 wird bis zum Ende des Jahrhunderts nur noch eine geringe Frostwahrscheinlichkeit projiziert. Für den restlichen Jahresverlauf zeigen sich unter den Szenarien A1B und B2 nur geringe Veränderungen der Temperaturen. Deutlicher ist der Anstieg der Tagesmaximaltemperatur unter dem Szenario A2 in den Sommermonaten, so dass ein häufigeres Auftreten von extremen Hitzeereignissen möglich ist. Für die Mittel- und Minimaltemperatur sind für die restlichen Monate unter allen Szenarien nur geringe Zunahmen projiziert. Der Niederschlagsverlauf nach dem Modell WETTREG zeigt für den Basiszeitraum höhere Niederschläge in den Sommermonaten gegenüber dem Rest des Jahres auf. Diese Tendenz wird im Verlauf des Jahrhunderts zunehmend ausgeglichen, so dass weniger Niederschläge im Sommer, dafür aber Zunahmen im Winter zu erwarten sind, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Klimatische Wasserbilanz. Durch höhere Temperaturen und geringere Niederschläge in den Sommermonaten wird die im Basiszeitraum bereits defizitäre Wasserbilanz weiter sinken. Hingegen ist in den Wintermonaten jedoch insgesamt mit einer Zunahme des Wasserdargebots zu rechnen. Diese Entwicklung ist unter allen drei Emissionsszenarien zu erkennen, am deutlichsten zeigt sie sich unter den Annahmen des Szenarios A2. Insgesamt stellt sich der Verlauf der Jahreswerte der Klimagrößen bei WETTREG im Verhältnis zu denen des Modells REMO deutlich weniger variabel dar. Dies ist darauf zurück zu führen, dass für statistische Modelle wie WETTREG eine Vielzahl von Modellläufen existiert (vgl. Box 2.3.2). Für die vorliegende Analyse wurden die drei dieser Läufe – trocken, mittel und feucht – gemittelt, was zu einer Glättung des Kurvenverlaufs führt.

Ähnlich wie bei WETTREG zeigt sich im Modell REMO die Entwicklung der Temperatur im Jahresgang. Insgesamt ist mit einem Anstieg über das gesamte Jahr hinweg zu rechnen, die Zunahme ist in den Sommer- und Wintermonaten besonders stark ausgeprägt. Das bedeutet einerseits, dass bis zum Ende des Jahrhunderts die Minima des 5-Tagesmittels der Temperatur nicht mehr in den negativen Bereich fallen und somit eine deutliche Abnahme von Frost zu erwarten ist. Andererseits ist eine Zunahme von Hitzeextremen in den Sommermonaten anzunehmen. Beide Tendenzen sind unter den Szenarien A1B und A2 deutlicher ausgeprägt als unter Szenario B1. Im Unterschied zu den Jahresverläufen des Modells WETTREG ist bei REMO auch ein deutlicher Anstieg der Temperaturminima und -mittel projiziert. Im Basiszeitraum zeigt sich ein deutlich höherer Niederschlag in den Sommermonaten gegenüber dem Rest des Jahres. Insgesamt ist in Zukunft mit einem Ausgleich über den Jahresgang zu rechnen, mit einer Abnahme der Niederschläge im Sommer und einer Zunahme im Frühjahr, Herbst und Winter. Diese ausgleichende

Tendenz ist nach dem Modell REMO jedoch weniger deutlich ausgeprägt als nach WETTREG. Die Veränderungen der Variablen Temperatur und Niederschlag führen zu einem weiteren Absinken der klimatischen Wasserbilanz in den Sommermonaten bis zum Ende des Jahrhunderts. Der Jahresverlauf der Klimavariablen im Modell REMO zeigt sich im Gegensatz zu den Ergebnissen des Modells WETTREG deutlich variabler. Trotz Mittelung über fünf Tage zeigt sich eine starke Variabilität, da im Gegensatz zum statistischen Modell WETTREG für das dynamische Modell REMO keine unterschiedlichen Modellläufe gemittelt wurden, da es hierfür nur einen Modelllauf gibt (Tab. 2.3.1).



**Abb. 2.5.8: Jahresverlauf der Klimavariablen Temperatur (Minimum, Mittel, Maximum), Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz für das Szenario A1B in den Zeiträumen 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 für die Klimamodelle WETTREG (links) und REMO (rechts)**

### 2.5.4. Die projizierte Veränderung der Klimakenntage nach den Modellen WETTREG und REMO

Neben der Betrachtung der mittleren Klimakenngrößen sind auch Extremereignisse für die betrachteten Sektoren von Bedeutung. Daher wird im Folgenden auf temperaturabhängige Extremwerte in Form von Klimakenntagen eingegangen. Beispielhaft werden die Kenntage Eistage, Frosttage, Sommertage, Hitzetage und tropische Nächte als Ergebnisse der Klimamodelle REMO<sup>15</sup> und WETTREG<sup>16</sup> diskutiert (Definitionen der Kenntage siehe Tab. 2.3.4).

Die simulierten Werte der Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 unter den Szenarien A2, A1B und B1 werden dabei mit simulierten und gemessenen<sup>17</sup> Werten für den Referenzzeitraum 1961-1990 (Abb. 2.5.9 bis Abb. 2.5.11) diskutiert. Die räumliche Differenzierung der entsprechenden Werte ist dem Anhang zu Kapitel 2.5 (Anhang Abb. 2.5.71 - 2.5.100) zu entnehmen.

Die beobachteten Werte werden z.T. nur unzureichend durch die Modelle wiedergegeben. Mit Ausnahme der tropischen Nächte wird die jährliche Anzahl an Kenntagen durch die Modelle unterschätzt, jedoch zuerst weniger stark durch das Modell WETTREG. Die größten Übereinstimmungen zwischen den beiden Modellen und den beobachteten Werten existieren bezüglich der Anzahl der Eistage, die größten Differenzen bezüglich der Anzahl der tropischen Nächte.

Ein Vergleich der vier betrachteten Zeiträume zeigt eine deutliche Veränderung der jährlichen Anzahl der Klimakenntage bis zum Ende des Jahrhunderts. Während kältebedingte Kenntage eine starke Abnahme verzeichnen, steigt die Anzahl wärmebedingter Kenntage deutlich an, wobei das Modell REMO insgesamt stärkere Veränderungen projiziert.

So könnte die jährliche Anzahl der Eistage im Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Basiszeitraum um 58 % (REMO, B1) bis 75 % (REMO, A2) zurückgehen, sodass nur noch 6 bis 10 Eistage pro Jahr auftreten. Die Anzahl der Frosttage könnte um 40% (WETTREG, B1) bis 64 % (REMO, A2) sinken. Die Abnahmeraten steigen diesbezüglich innerhalb der Szenarien von B1 bis hin zu A2 an (Abb. 2.5.9). Deutliche Zunahmen sind bezüglich der Sommer- und Hitzetage festzustellen. Je nach Modell könnte sich die jährliche Anzahl der Sommertage von 22 bis 30 (1961-1990) auf 37 bis 57 Tage (2071-2100) nahezu verdoppeln. Hitzetage weisen im gleichen Zeitabschnitt Erhöhungen um das Zweifache auf 9 bis 15 Tage auf (Abb. 2.5.10).

Die stärksten Zunahmen sind in der Anzahl der Tropennächte zu erwarten, wobei die Aussagen der Klimamodelle über die Zunahmerate stark divergieren (Abb. 2.5.11).

Während Tropennächte im Zeitraum 1961-1990 alle fünf Jahre auftraten, liegen die durch REMO modellierten Werte bei einem Tag pro Jahr. Insofern sind die modellierten Absolutbeträge mit besonderer Vorsicht zu betrachten.

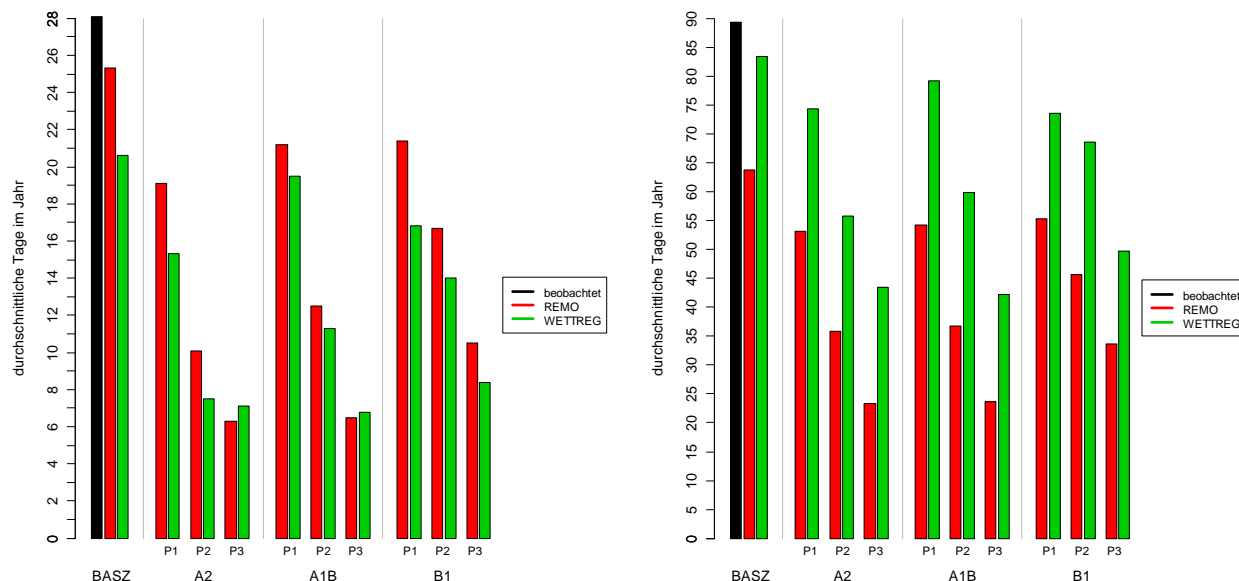
<sup>15</sup> Als Mittelung aller Rasterzellen innerhalb Sachsen-Anhalts, ohne vorherige Mittelung von jeweils neun umliegenden Zellen (siehe Abb. 2.3.2, links).

<sup>16</sup> Als Mittelung der in Sachsen-Anhalt vorkommenden Stationen (siehe Abb. 2.3.1, links)

<sup>17</sup> Stationen Sachsen-Anhalts aus dem Datensatz des Modells STAR unter Verwendung gemessener Werte der Vergangenheit.

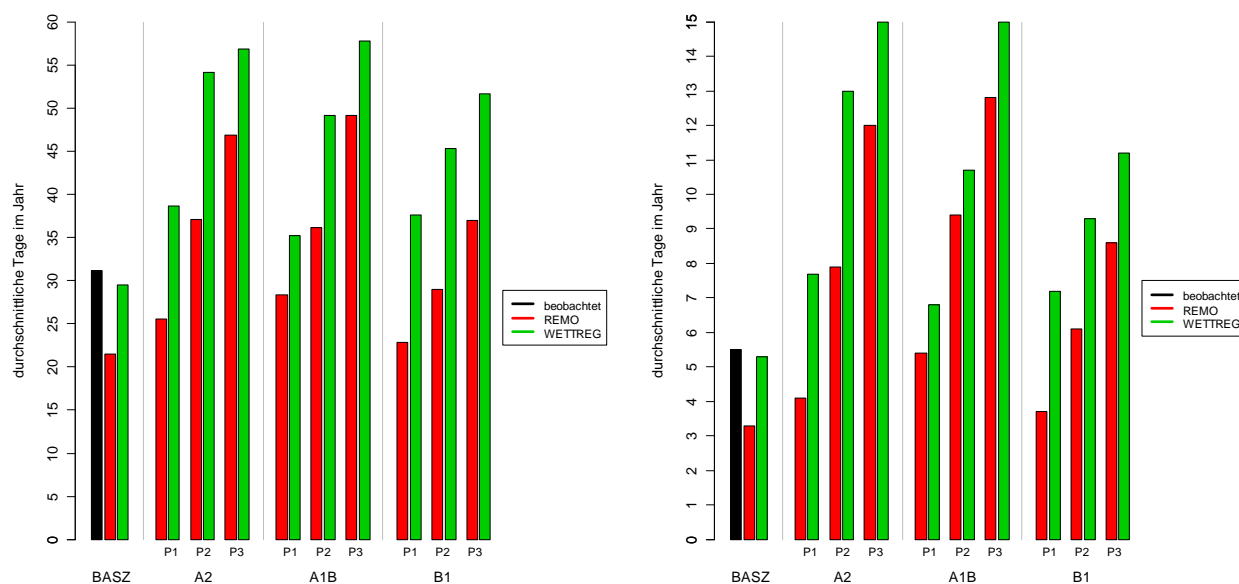


Bei der Interpretation der Daten ist weiterhin zu beachten, dass die Werte über Sachsen-Anhalt gemittelt wurden. Somit kann lokal die absolute Anzahl der jeweiligen Ereignistage sehr stark vom Mittelwert abweichen.



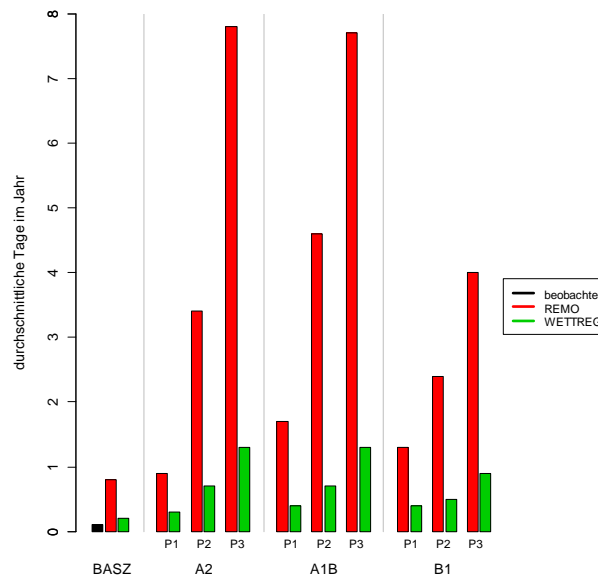
**Abb. 2.5.9: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Anzahl an Eistagen (links) und Frosttagen (rechts) in Sachsen-Anhalt**

nach den Modellen REMO und WETTREG für die Zeiträume 2011-2040 (P1), 2041-2070 (P2), 2071-2100 (P3) unter den Szenarien A2, A1B und B1 mit beobachteten Werten von 1961-1990 (Basiszeitraum)



**Abb. 2.5.10: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Anzahl an Sommertagen (links) und Hitzetagen (rechts) in Sachsen-Anhalt**

nach den Modellen REMO und WETTREG für die Zeiträume 2011-2040 (P1), 2041-2070 (P2), 2071-2100 (P3) unter den Szenarien A2, A1B und B1 mit beobachteten Werten von 1961-1990 (Basiszeitraum)



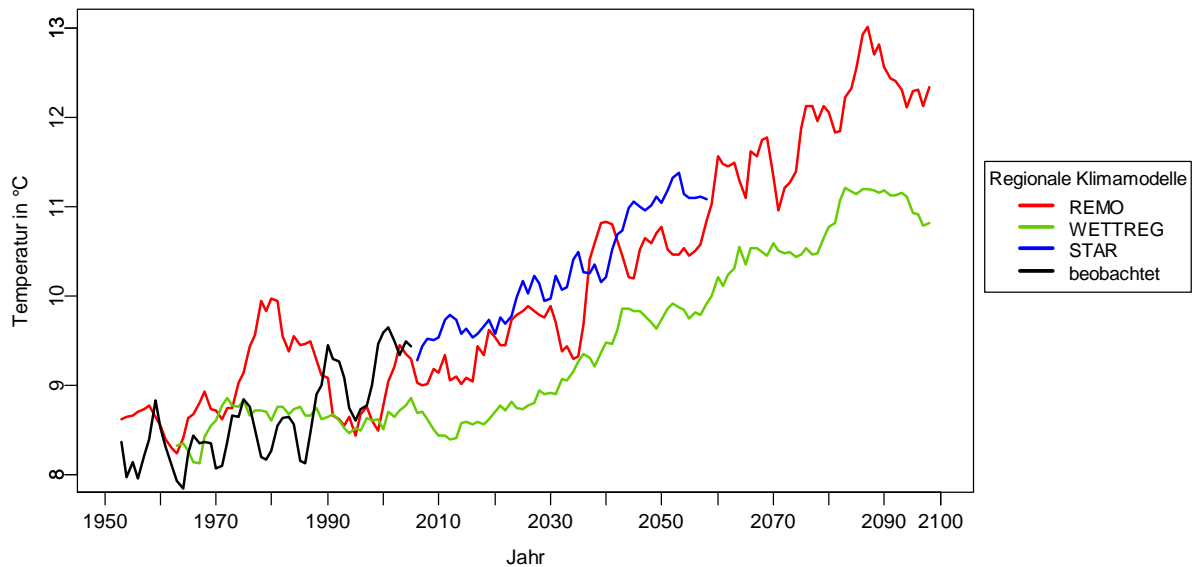
**Abb. 2.5.11: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Anzahl an tropischen Nächten in Sachsen-Anhalt**

nach den Modellen REMO und WETTREG für die Zeiträume 2011-2040 (P1), 2041-2070 (P2), 2071-2100 (P3) unter den Szenarien A2, A1B und B1 mit beobachteten Werten von 1961-1990 (Basiszeitraum)

## 2.6. Vergleich der Klimamodelle WETTREG, REMO und STAR

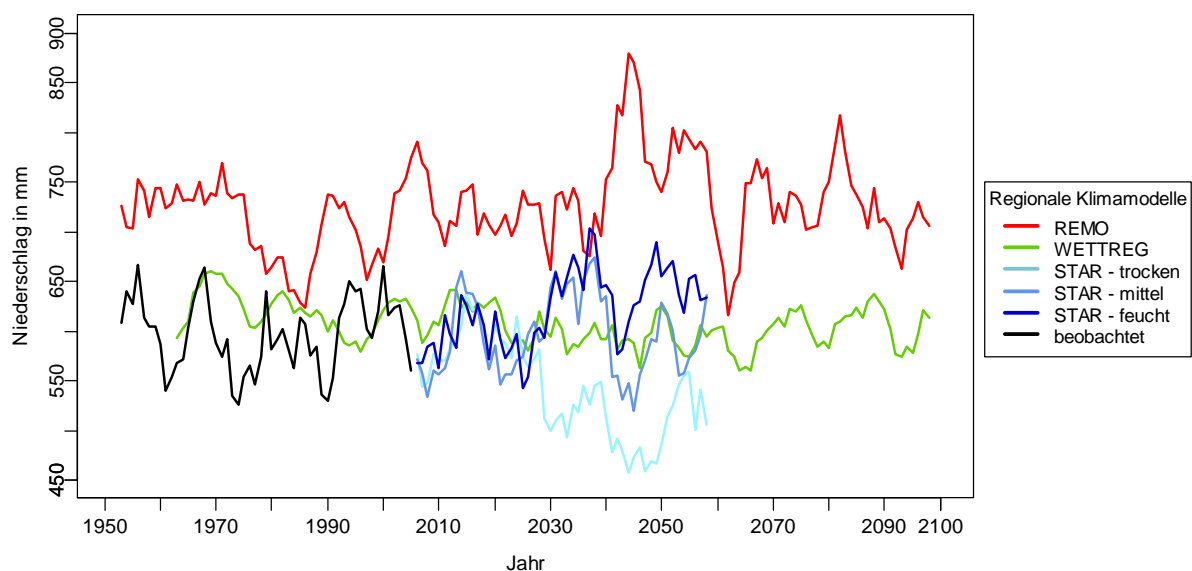
Wie in den vorhergehenden Abschnitten zu erkennen war, unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden verwendeten Modelle zum Teil deutlich. In Abb. 2.6.1 und Abb. 2.6.2 ist ein Vergleich der Modellergebnisse im Jahresgang für Temperatur und Niederschlag aufgezeigt. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Modellen REMO und WETTREG wurden beobachtete Werte sowie die Ergebnisse aus dem Modell STAR in den Vergleich einbezogen.

Der Vergleich der beobachteten Daten mit denen der Modellergebnisse (1951-2006) zeigt für REMO eine durchschnittliche Abweichung von +0,3 K, mit einer deutlich zu hohen Temperaturrepräsentation um 1980. Das Modell WETTREG gibt diesen Zeitraum mit einer durchschnittlichen Abweichung von -0,1 K deutlich besser wieder. Für den Projektionsverlauf liegen die Ergebnisse der Jahresmitteltemperatur von WETTREG deutlich unter denen der beiden anderen Klimamodelle (für eine Übersicht über die durchschnittlichen Abweichungen zwischen den Modellen siehe Tab. 2.6.1).



**Abb. 2.6.1: Vergleich der Jahresmitteltemperatur (als gleitendes 5-Jahresmittel) in Sachsen-Anhalt der regionalen Klimamodelle REMO, WETTREG und STAR<sup>18</sup> mit beobachteten Daten, Szenario A1B**

Bei der Darstellung der Niederschläge fällt auf, dass die Wiedergabe des Zeitraumes 1951-2006 bei REMO deutlich zu hoch ausfällt. Dieser Trend setzt sich über den Szenariozeitraum im Verhältnis zu den anderen Modellen fort. Das Modell WETTREG gibt die gemessenen Werte mit einer Abweichung von +26mm gut wieder, liegt aber im Verlauf des Szenariozeitraums deutlich niedriger als die beiden anderen Modelle.



**Abb. 2.6.2: Vergleich der Jahresniederschläge (als gleitendes 5-Jahresmittel) in Sachsen-Anhalt mit den regionalen Klimamodellen REMO, WETTREG und STAR mit beobachteten Daten, Szenario A1B**

<sup>18</sup> Die simulierten Temperaturwerte von 2006-2060 sind für die drei Realisierungen „trocken“, „mittel“ und „feucht“ und für alle Stationen in Sachsen-Anhalt gemittelt.

Die folgende Tab. 2.6.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Unterschiede zwischen den untersuchten Klimamodellen anhand der Mittelwerte der Jahresmitteltemperatur und des Jahresniederschlags Sachsen-Anhalts.

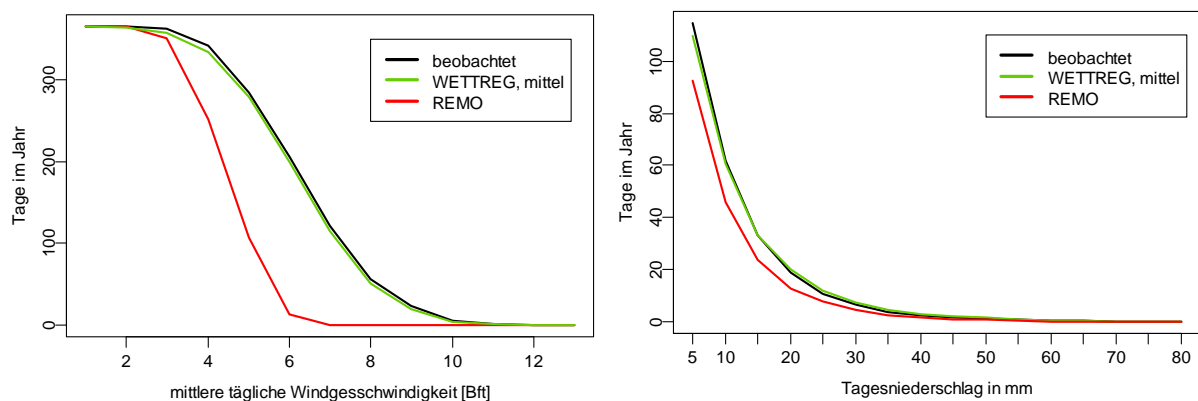
**Tab. 2.6.1: Durchschnittliche Abweichung der Modellergebnisse von REMO und WETTREG für die Variablen Temperatur und Niederschlag**

Klima-modell	Variablenvergleich	Jahresmittel-temperatur (K)	Jahresnieder-schlag (mm)
WETTREG	Im Vergleich zu beobachteten Daten (1961-2006)	-0,1	26
	Im Vergleich zu simulierten Daten mit STAR (2007-2060, trocken/ mittel/ feucht)	1,1	61/4/-21
REMO	Im Vergleich zu beobachteten Daten (1961-2006)	0,3	115
	Im Vergleich zu simulierten Daten mit STAR (2007-2060, trocken/ mittel/ feucht)	-0,4	203/147/121
REMO-WETTREG	Vergleich der simulierten Daten von REMO mit WETTREG (1961-2006)	0,4	89
	Vergleich der simulierten Daten von REMO mit WETTREG (2007-2060)	0,8	142

## 2.7. Die Rolle von extremen Ereignissen im Rahmen der Klimawirkungsanalysen in Sachsen-Anhalt

Extremereignisse haben in der Regel massiven Einfluss auf zivilisatorische Systeme und stehen von daher im besonderen Interesse von Entscheidungsträgern. Allerdings sind sie in Modellszenarien aufgrund teils systemarer und teils spezifischer Eigenschaften nur unzureichend abgebildet. Zudem muss unterschieden werden zwischen „Klimaextremen“, die gemittelte Extreme sind, und Wetterextremen, die singuläre Ereignisse darstellen. Extreme Ereignisse sind per Definition seltene Ereignisse mit einer sehr großen Magnitude und treten zudem oft regional beschränkt auf (z.B. Niederschlag oder eine Spitzenwindgeschwindigkeit). Klimamodelle – vor allem dynamische wie REMO – bilden jedoch räumliche (für die gewählte Gitterauflösung) und zeitliche (für in der Regel 30 Jahre) Mittelwerte ab. Die Frage, wie sich solche Mittelwerte mit einem empirischen Extremwert für Niederschlag oder Windgeschwindigkeit in Zusammenhang bringen lassen, ist Gegenstand der Forschung und noch weitgehend ungelöst (Tebaldi et al. 2007; Tebaldi & Meehl 2008). Existierende Studien vergleichen Klimaextreme (z.B. monatliche Mittelwerte für Extremniederschläge) für Szenarioperioden mit der ebenfalls simulierten Kontrollperiode und empirischen Mittelwerten (Böhm et al. 2004; Semmler & Jacob 2004), die für das tatsächliche tägliche oder stündliche Risikogeschehen einen Anhalt angeben können. Zudem haben nicht alle Extremereignisse die gleiche Natur, so ist es sehr wahrscheinlich, dass bei einer Hitzewelle am Ort A auch am 50 km entfernten Ort B eine ähnliche Temperatur herrscht, aber bei der Betrachtung von Niederschlägen oder Stürmen gilt dies bereits nicht mehr. Niederschläge und starke Windböen können aufgrund ihrer Stochastizität kleinräumig sehr unterschiedlich auftreten. Die Möglichkeiten der Nutzung von Modelldaten zur Bestimmung von Risiken von Extremereignissen sind begrenzt, vor allem wenn stündliche und/oder kleinräumige Ereignisse – also Wetterextreme – analysiert und

mit Werten aus Modellszenarien in Beziehung gesetzt werden sollen. Um dennoch die mögliche Veränderung von Klimaextremen zu modellieren, können Kenntage, wie z.B. Hitze- oder Frosttage, und deren veränderte Häufigkeitsverteilung Hinweise auf die Zunahme von Extremereignissen liefern. Die Definition von Kenntagen geschieht über die Festlegung von Schwellenwerten, über denen intensive Auswirkungen zu erwarten sind bzw. in der Vergangenheit registriert werden könnten. Im Rahmen der Sachsen-Anhalt-Studie wurde beispielsweise in Kap. 3.2 der Einfluss von mittleren Windgeschwindigkeiten auf Winderosion untersucht und dabei auf Winddaten aus den Modellläufen zurückgegriffen.



**Abb. 2.7.1: Häufigkeitsverteilungen der mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten (links) und Tagesniederschläge (rechts) im Zeitraum 1961-1990 an der Station Brocken für beobachtete Werte und simulierte Werte aus den Modellen REMO<sup>19</sup> und WETTREG (mittlere Realisierung)**

Abb. 2.7.1 zeigt die Häufigkeitsverteilungen für die mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten sowie Tagesniederschläge im Zeitraum 1961-1990. Dargestellt sind gemessene Werte der Klimastation Brocken des DWD im Vergleich zu den simulierten Werten aus den Klimamodellen WETTREG und REMO<sup>20</sup>. Wie zu sehen ist, kann das statistische Modell WETTREG die gemessenen Windgeschwindigkeiten und Niederschlagswerte gut wiedergeben. Im Modell REMO hingegen werden beide Variablen deutlich unterschätzt. Für die oben genannte Analyse der Winderosionsgefährdung wurden deshalb Daten des Modells WETTREG verwendet. Im Gegensatz zu den Daten von REMO liegen für WETTREG die Ergebnisse nur als Tagesmittel vor. Als Kompromiss wurden deshalb z.T. niedrigere Schwellenwerte herangezogen<sup>21</sup>.

<sup>19</sup> Ohne vorherige Mittelung von neun umliegenden Zellen

<sup>20</sup> Die Modellwerte für REMO stammen aus der Rasterzelle, in der sich die Station Brocken befindet.

<sup>21</sup> Z.B. Windstärken von 4 bzw. 6 Beaufort zur Analyse der Windwurfgefährdung von Bäumen

## 2.8. Literatur

- Alexander, L. V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. K. Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. R. Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci und J. L. Vazquez-Aguirre (2006): "Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 111(D5): 1-22.
- Arrhenius, S. (1896): "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground." *Philosophical Magazine and Journal of Science* 5(41): 237-276.
- Bernhofer, C., V. Goldberg, J. Franke, M. Surke und J. Adam (2008): "REKLI - Sachsen-Anhalt II, Regionale Klimadiagnose für Sachsen-Anhalt, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt." Institut für Hydrologie und Meteorologie und T. U. Dresden (Hrsg.). Dresden.
- Böhm, U., M. Kucken, D. Hauße, F. W. Gerstengarbe, P. C. Werner, M. Flechsig, K. Keuler, A. Block, W. Ahrens und T. Nocke (2004): "Reliability of regional climate model simulations of extremes and of long-term climate." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4(3): 417-431.
- Chen, J. L., C. R. Wilson und B. D. Tapley (2006): "Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet." *Science* 313(5795): 1958-1960.
- Fischer, E. M., S. I. Seneviratne, P. L. Vidale, D. Lüthi und C. Schär (2007): "Soil Moisture-Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave." *Journal of Climate* 20(20): 5081-5099.
- Fourier, J. (1827): "Mémoire Sur Les Températures Du Globe Terrestre Et Des Espaces Planétaires." *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* 7: 569-604.
- 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.
- Holsten, A., T. Vetter, K. Vohland und V. Krysanova (2009): "Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas." *Ecological Modelling* 220(17): 2076-2087.
- IPCC (2007a): "Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC." Cambridge University Press. Cambridge, UK. 938 S.
- IPCC (2007b): "Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report ". Cambridge University Press. Cambridge, UK. 851 S.
- IPCC (2007c): "Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." 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. 987 S.
- IPCC (2007d): "Summary for Policymakers." In: M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden und C. E. Hanson: "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge, UK, Cambridge University Press: 7-22.
- IPCC (2008): "Klimaänderung 2007 - Synthesebericht." Klimaänderung 2007 - Synthesebericht. Ein Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). L. Bernstein, P. Bosch, O. Canziani et al (Hrsg.). IPCC-Koordinierungsstelle Deutschland Stuttgart, [http://www.de-ipcc.de/\\_media/AR4\\_SynRep\\_Gesamtdokument.pdf](http://www.de-ipcc.de/_media/AR4_SynRep_Gesamtdokument.pdf).
- Jacob, D., H. Göttel und P. Lorenz (2007): "Hochaufgelöste regionale Klimaszenarien für Deutschland, Österreich und die Schweiz." *Mitt. DMG* 1/2007: 10-12.
- Le Quéré, C., M. R. Raupach, J. G. Canadell, G. Marland, L. Bopp, P. Ciais, T. J. Conway, S. C. Doney, R. A. Feely, P. Foster, P. Friedlingstein, K. Gurney, R. A. Houghton, J. I. House, C. Huntingford, P. E. Levy, M. R. Lomas, J. Majkut, N. Metz, J. P.



- Ometto, G. P. Peters, I. C. Prentice, J. T. Randerson, S. W. Running, J. L. Sarmiento, U. Schuster, S. Sitch, T. Takahashi, N. Viovy, G. R. van der Werf und F. I. Woodward (2009): "Trends in the sources and sinks of carbon dioxide." *NATURE Geosciences* 2: 831-836.
- Meinshausen, M., N. Meinshausen, W. Hare, S. C. B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D. J. Frame und M. R. Allen (2009): "Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 degrees C." *Nature* 458(7242): 1158-U96.
- MPI (2009): "Hinweise für REMO - Datennutzer." Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg. Letzter Zugriff am: 09.11.2009, [http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/staff/pfeifersusanne/REMO\\_UBA/REMO-UBA-Hinweise.pdf](http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/staff/pfeifersusanne/REMO_UBA/REMO-UBA-Hinweise.pdf).
- Nakicenovic, N. und R. Swart (2000): "Special Report on Emission Scenarios." N. Nakicenovic und R. Swart (Hrsg.). Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Summary for Policymakers <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>.
- Orlowsky, B., F.-W. Gerstengarbe und P. Werner (2008): "A resampling scheme for 348 regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM." *Theoretical and Applied Climatology* 92: 209-223.
- Parry, M. L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore und G. Fischer (2004): "Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios." *Global Environmental Change* 14: 53-67.
- Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J. M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman und M. Stievenard (1999): "Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica." *Nature* 399(6735): 429-436.
- Rahmstorf, S. (2000): "The thermohaline ocean circulation: A system with dangerous thresholds? An editorial comment." *Climatic Change* 46(3): 247-256.
- Raupach, M. R., G. Marland, P. Ciais, C. Le Quere, J. G. Canadell, G. Klepper und C. B. Field (2007): "Global and regional drivers of accelerating CO2 emissions." *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America* 104(24): 10288-10293.
- Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida und A. Tompkins (2003): "The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description." Max-Planck-Institute for Meteorology. Hamburg.
- Semmler, T. und D. Jacob (2004): "Modeling extreme precipitation events - a climate change simulation for Europe." *Global and Planetary Change* 44(1-4): 119-127.
- Stock, M., F. Badeck, F.-W. Gerstengarbe, T. Hoppmann, T. Kartschall, H. Österle, P. C. Werner und M. Wodinski (2007): "Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinanbau in Deutschland (Klima 2050)." PIK Report No. 106. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam.
- Tank, A. M. G. K., T. C. Peterson, D. A. Quadir, S. Dorji, X. Zou, H. Tang, K. Santhosh, U. R. Joshi, A. K. Jaswal, R. K. Kolli, A. B. Sikder, N. R. Deshpande, J. V. Revadekar, K. Yeleuova, S. Vandasheva, M. Faleyeva, P. Gomboluudev, K. P. Budhathoki, A. Hussain, M. Afzaal, L. Chandrapala, H. Anvar, D. Amanmurad, V. S. Asanova, P. D. Jones, M. G. New und T. Spektorman (2006): "Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 111(D16): 1-8.
- Tebaldi, C., K. Hayhoe, J. M. Arblaster und G. A. Meehl (2007): "Going to the extremes - An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events (vol 79, pg 185, 2006)." *Climatic Change* 82(1-2): 233-234.
- Tebaldi, C. und G. A. Meehl (2008): "Beyond mean climate change: what climate models tell us about future climate extremes. Assessing, modeling and monitoring the impacts of extreme climate events." In: H. F. Diaz und R. J. Murnane: "Climate extremes and society." Cambridge University Press: 99-119.
- Tyndall, J. (1872): "Contributions to molecular physics in the domain of radiant heat. Philosophical Transactions." Longmans Green. London

- Vellinga, M. und R. A. Wood (2002): "Global climatic impacts of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation." *Climatic Change* 54(3): 251-267.
- Vinther, B. M., S. L. Buchardt, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, S. J. Johnsen, D. A. Fisher, R. M. Koerner, D. Raynaud, V. Lipenkov, K. K. Andersen, T. Blunier, S. O. Rasmussen, J. P. Steffensen und A. M. Svensson (2009): "Holocene thinning of the Greenland ice sheet." *Nature* 461(7262): 385-388.

## 3. Analyse ausgewählter Sektoren

### 3.1. Wasser

#### Kernaussagen:

- Es sind bereits Änderungen im Abflussregime der Elbe und deren Nebenflüsse beobachtet worden: Dies zeigt sich in Sachsen-Anhalt durch eine Verschiebung der Abflussspitzen in das zeitige Frühjahr und durch weniger Abfluss im Sommer.
- Für die Elbe, ihre Nebenflüsse und die Weser zeigen die Projektionen unter WETTREG-Klimaszenarien und anderen Studien, dass sich dieser Trend in Zukunft fortsetzen wird. Die Abnahme der Abflüsse in der Elbe und Saale in den Sommermonaten könnte in den nächsten Jahrzehnten besonders ausgeprägt sein, in der Weser fällt sie weniger stark aus. Unter REMO-Klimaszenarien erhöht sich ebenfalls der Abfluss im Winter, im Sommer verändert er sich allerdings kaum oder nimmt noch zu.
- Trotz einer insgesamt zu erwartenden Zunahme an Niederschlägen im Winter können aufgrund der starken Erhöhung der Verdunstung in weiten Regionen Abfluss und Grundwasserneubildung deutlich abnehmen. Dies trifft besonders im Lee der Mittelgebirge, z.B. des Harzes, zu, wo die Niederschläge einen abnehmenden Trend zeigen. Unter REMO-Klimaszenarien steigen die Niederschläge teilweise deutlich, unter diesen Bedingungen kann auch die Grundwasserneubildung in weiten Teilen Sachsen-Anhalts steigen.
- Die zunehmende Erwärmung der Gewässer und die gleichzeitig zu erwartende Abnahme der Abflüsse im Sommer könnten die Einhaltung ökologischer Parameter erschweren und die Kühlwasserverfügbarkeit vermindern.
- Die Entwicklung der Hochwasser ist unsicher, allerdings gibt es Anzeichen, dass die kleinen und mittleren Hochwasser häufiger auftreten können. Für extreme Hochwasser kann keine Aussage getroffen werden.

#### 3.1.1. 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 auf die lokalen klimatischen, naturräumlichen, wirtschaftlichen und auch sozialen Gegebenheiten abgestimmt 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 in Sachsen-Anhalt erfolgte daher in fünf aufeinander aufbauenden Schritten:

- i) Analyse des Ist-Zustandes
- ii) Parametrisierung eines hydrologischen Modells und Modellvalidierung
- iii) Simulation der lokalen Wasserbilanz für Sachsen-Anhalt unter Klimawandel
- iv) Simulation der lateralen Wasserflüsse in ausgewählten Einzugsgebieten
- v) Statistische Auswertung der Ergebnisse.

Dabei müssen zur Betrachtung der Wasserressourcen in Sachsen-Anhalt die hydrologischen Verhältnisse in den Oberliegergebieten von Saale und Elbe einbezogen werden, da beide Flüsse nicht in Sachsen-Anhalt entspringen und daher wasserspezifische Faktoren und Parameter außerhalb Sachsens Einfluss auf regionale Wasserverhältnisse besitzen.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse bauen teilweise auf bereits bestehende Untersuchungen auf, um so eine tiefer gehende Analyse zu erlauben, welche nicht durch die im Projekt vorhandenen Ressourcen geleistet werden konnte. 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 umfangreiche Arbeiten im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführt. Dazu gehören insbesondere:

- die Analyse der Klimafolgen für Simulationen des statistischen regionalen Klimamodells WETTREG als Klimarandbedingung,
- die Analyse der Klimafolgen für Simulationen des dynamischen, regionalen Klimamodells REMO als Klimarandbedingung,
- die Auswertung von Hochwasserereignissen für beide Klimamodellszenarien und
- Analysen über das Jahr 2060 hinaus.

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 Sachsens.

Abschließend ist es wichtig zu erwähnen, dass aufgrund dieser Analyse und der verwendeten Daten nur großräumige und allenfalls regionale Aussagen getroffen werden können. 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.

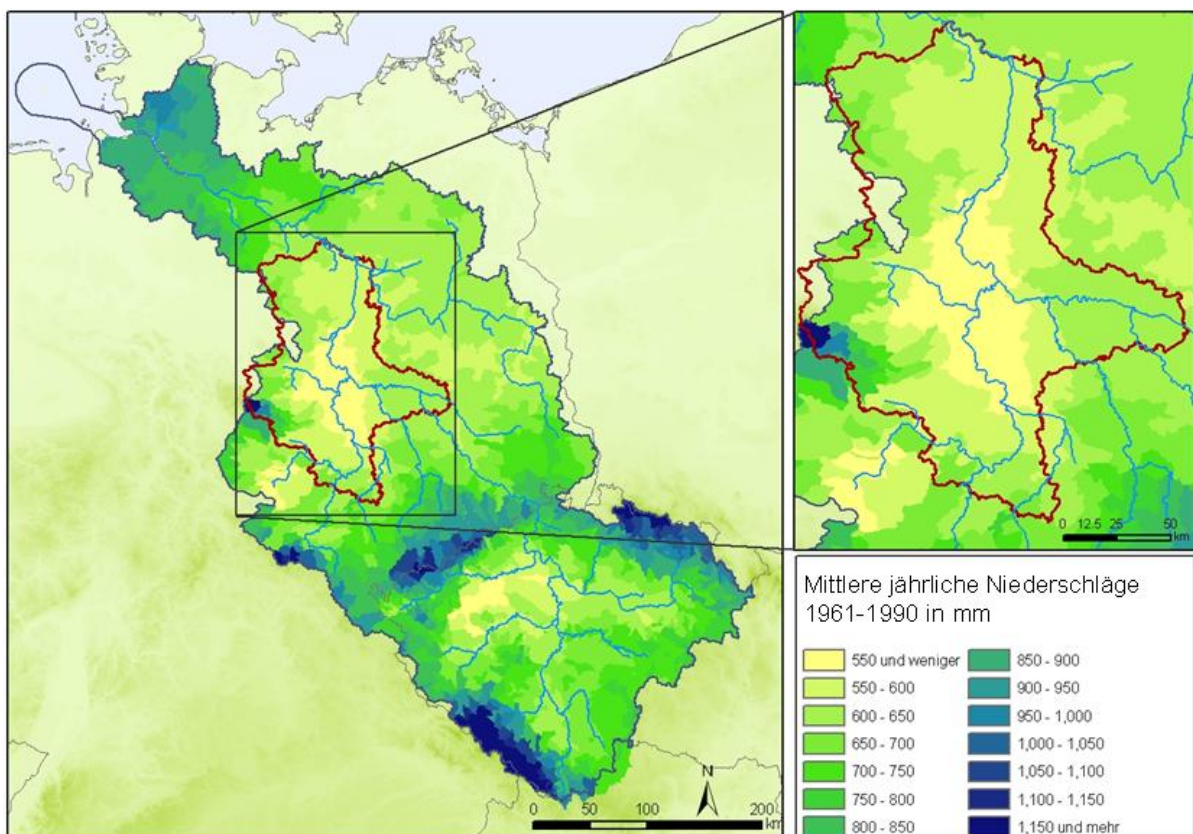
### 3.1.2. Natürliches Wasserdargebot

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 Bördegebieten im Süden von



Magdeburg bis nach Thüringen hinein. Abb. 3.1.1 bis Abb. 3.1.3 zeigen die Werte der mittleren jährlichen Niederschlagssummen, der mittleren jährlichen aktuellen Verdunstung und der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung für den Basiszeitraum 1961–1990 für das Elbegebiet.

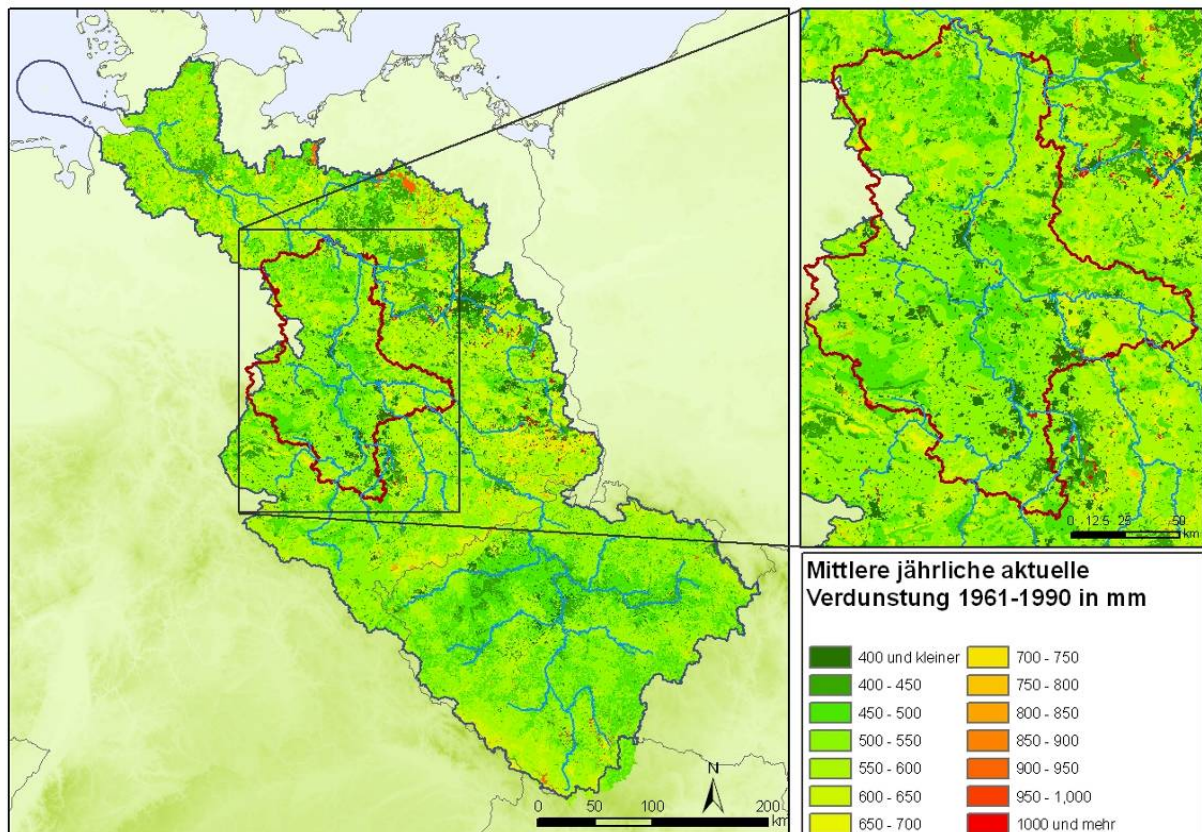
Deutlich kann man in Abb. 3.1.1 den Windschatten des Harzes und die dadurch verursachten niedrigen Niederschläge südlich von Magdeburg und im zentralen Bereich Sachsen-Anhalts erkennen. Besonders hoch ist die aktuelle Verdunstung dort, wo aufgrund der hohen Niederschläge auch das Wasserangebot für die Vegetation hoch ist und die Temperaturen aufgrund der Geländehöhe noch nicht zu unterdurchschnittlich sind (s. Abb. 3.1.2).



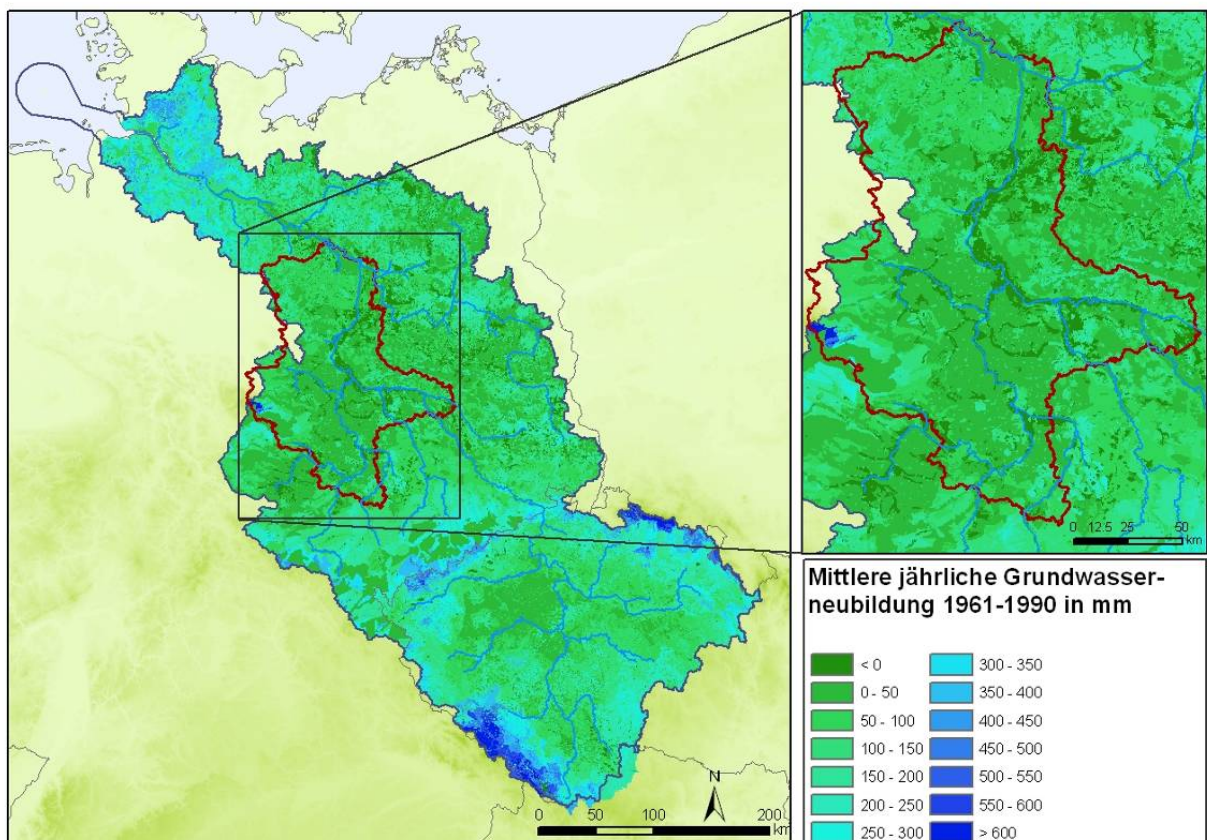
**Abb. 3.1.1: Mittlere jährliche Niederschläge 1961–1990**

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 erreicht, während sie im Bereich des Harzes deutlich höher liegen können (s. Abb. 3.1.3). 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.





**Abb. 3.1.2: Simulierte mittlere jährliche aktuelle Verdunstung 1961-1990**

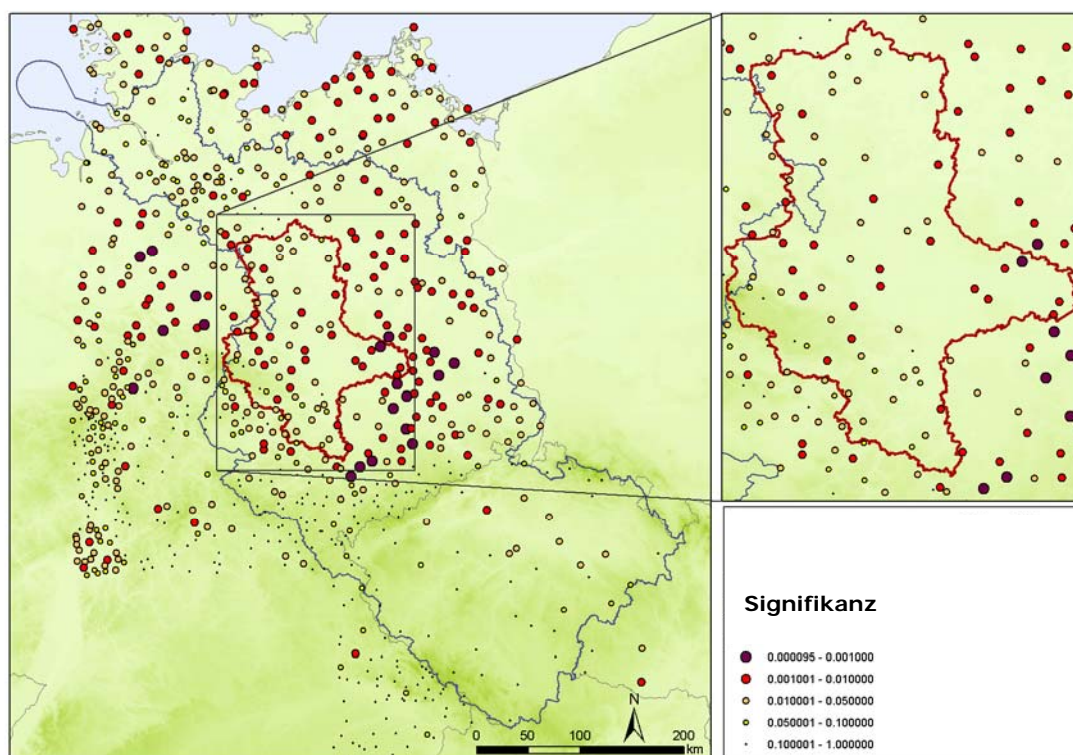


**Abb. 3.1.3: Simulierte mittlere jährliche Grundwasserneubildung 1961-1990**



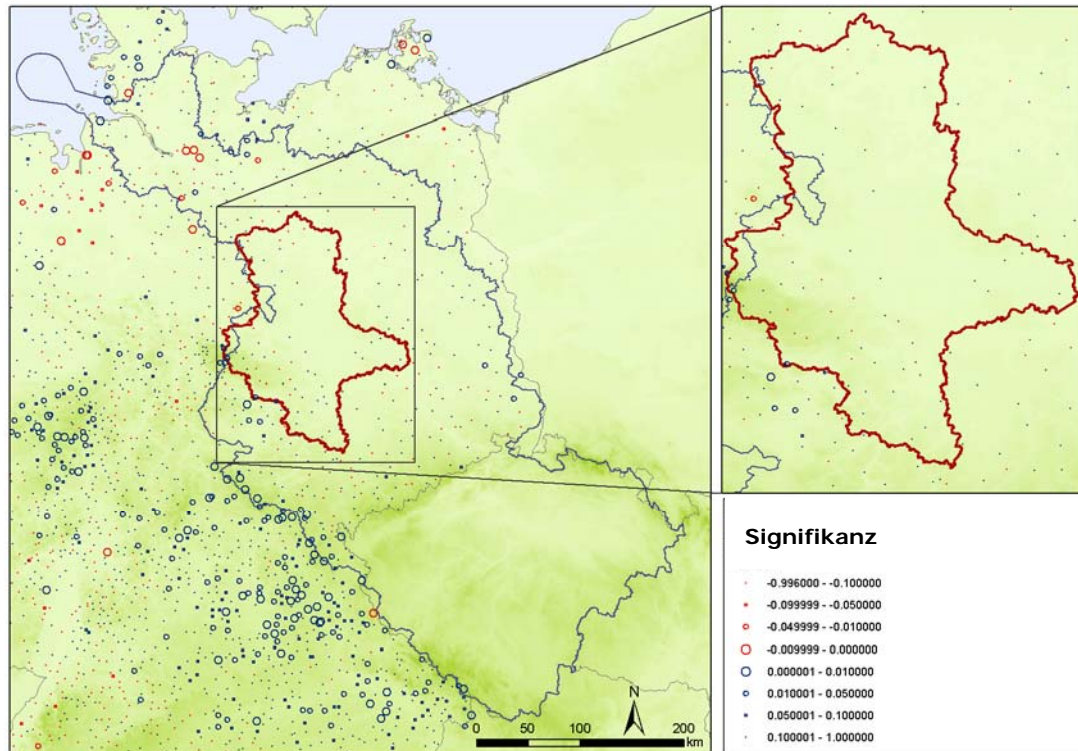
Abb. 3.1.4 zeigt Signifikanzen für Stationstrends zu längeren Trockenperioden (mindestens 20 aufeinander folgende Tage mit Niederschlägen nicht höher als 1 mm pro Tag) im Untersuchungsgebiet über den Zeitraum 1951–2003. Dazu wurden die entsprechenden Perioden pro Jahr aufgezählt, eine diskrete Verteilung 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. Messstationen mit signifikanten Trends zu längeren Phasen ohne Niederschläge liegen im Windschatten des Harzes und an der Grenze zu Sachsen und Thüringen.

Abb. 3.1.5 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) beobachten, also auch in den Quellgebieten der Saale. Im Sommerhalbjahr ist dagegen kein starker Trend oder aber einer zu zurückgehenden Starkniederschlägen zu beobachten.



**Abb. 3.1.4: Signifikanz für eine Zunahme von Trockenperioden im Sommerhalbjahr (Krysanova et al. 2008).**

*Die Signifikanz in der Legende ist mit sogenannten p-Werten angegeben. Diese entsprechen der jeweiligen Wahrscheinlichkeit, dass der beobachtete Trend kein Signal sondern das Ergebnis zufälliger Schwankungen darstellt. Je kleiner der p-Wert, um so sicherer handelt es sich um einen echten Trend.*



**Abb. 3.1.5: Signifikanz für eine Zunahme von Starkniederschlagsereignissen im Winterhalbjahr (Krysanova et al. 2008)**

Die Signifikanz in der Legende ist mit sogenannten *p*-Werten angegeben. Deren Beträge entsprechen der jeweiligen Wahrscheinlichkeit, dass der beobachtete Trend kein Signal sondern das Ergebnis zufälliger Schwankungen darstellt. Je kleiner der *p*-Wert, um so sicherer handelt es sich um einen echten Trend. In rot: Abnahme, in blau: Zunahme.

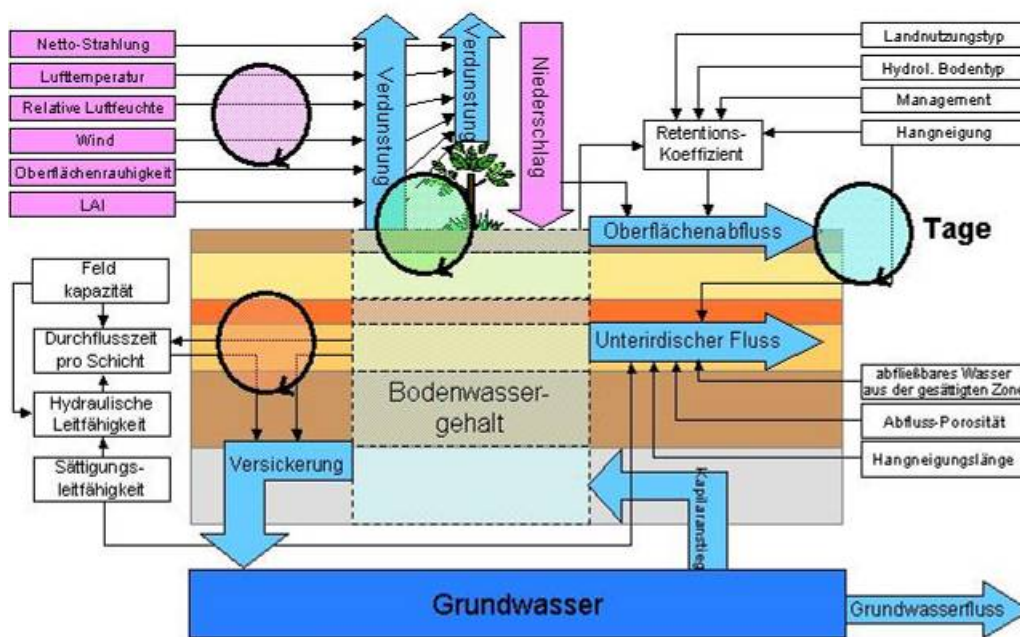
### 3.1.3. Daten und Methoden

#### 3.1.3.1. Das ökohydrologische Modell SWIM

Zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Sachsen-Anhalt 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 einem ersten Schritt das Modell für die hydrologischen Prozesse im Bundesland Sachsen-Anhalt angepasst. Zu weiteren Details zum Modell SWIM s. Box 3.1.1.

**Box 3.1.1: 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 Hydrotopenebene, der aus den Hydrotopen zusammengesetzten Teileinzugsgebietsebene und der alles integrierenden Einzugsgebiete). Die unterste Ebene, die Hydrotopenebene, 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 wieder. Die auf der Hydrotopenebene errechneten vertikalen und lateralen Wasser- und Stoffflüsse werden auf der Teileinzugsgebietsebene aggregiert und durch das Flusssystem zum Gebietsauslass des Einzugsgebietes weiterverschoben. Das hydrologische Modul in SWIM umfasst vier Teilsysteme: die Bodenoberfläche, die Wurzelzone (wobei entsprechend den Bodeninformationen bis zu 12 Bodenschichten unterschieden werden), den oberen und den unteren Grundwasserleiter und das Wasser im Vorfluter.



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

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

$$E_{p_i} = 1.28 * \left( \frac{R_{a_i}}{H_i} \right) * \left( \frac{\delta}{\delta - \gamma} \right). \quad (1)$$

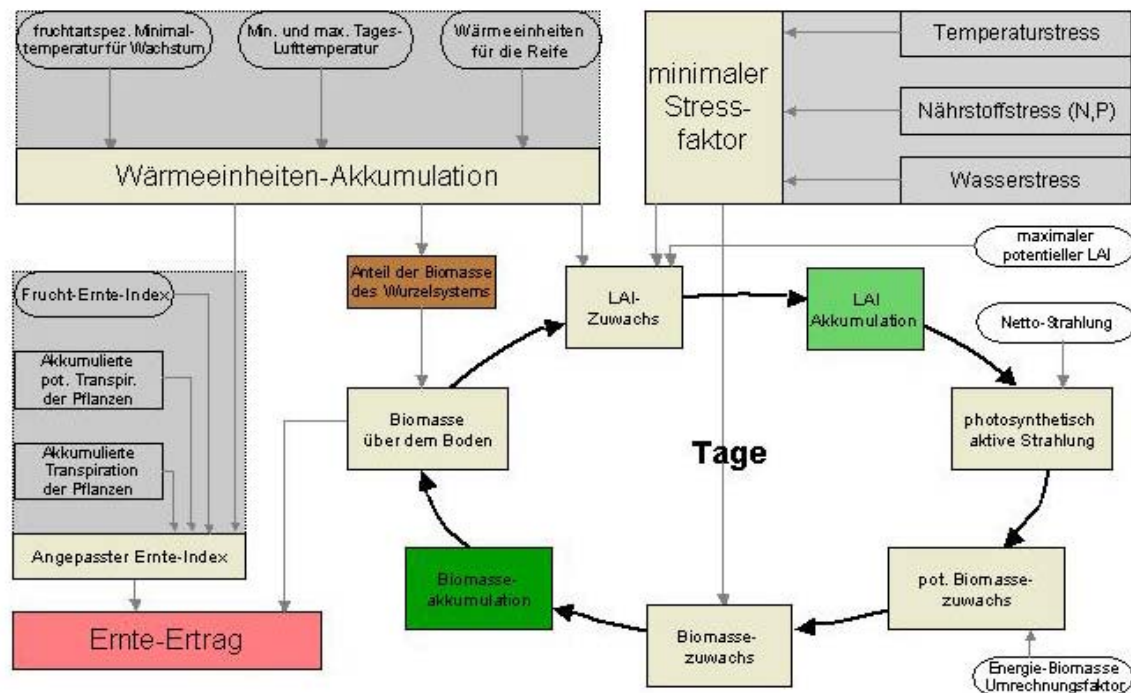
Dabei ist die latente Wärme  $H$  [MJ kg<sup>-1</sup>] eine Funktion der mittleren täglichen Temperatur  $T$  [K],  $\delta$  ist die Steigung der gesättigten Dampfdruckkurve [kPa C<sup>-1</sup>] und  $\gamma$  die Psychrometerkonstante [kPa C<sup>-1</sup>].

SWIM modifiziert die hiermit erhaltenen, potentiellen Verdunstungswerte hydrotopgenau 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 Phänolo-



gie 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.



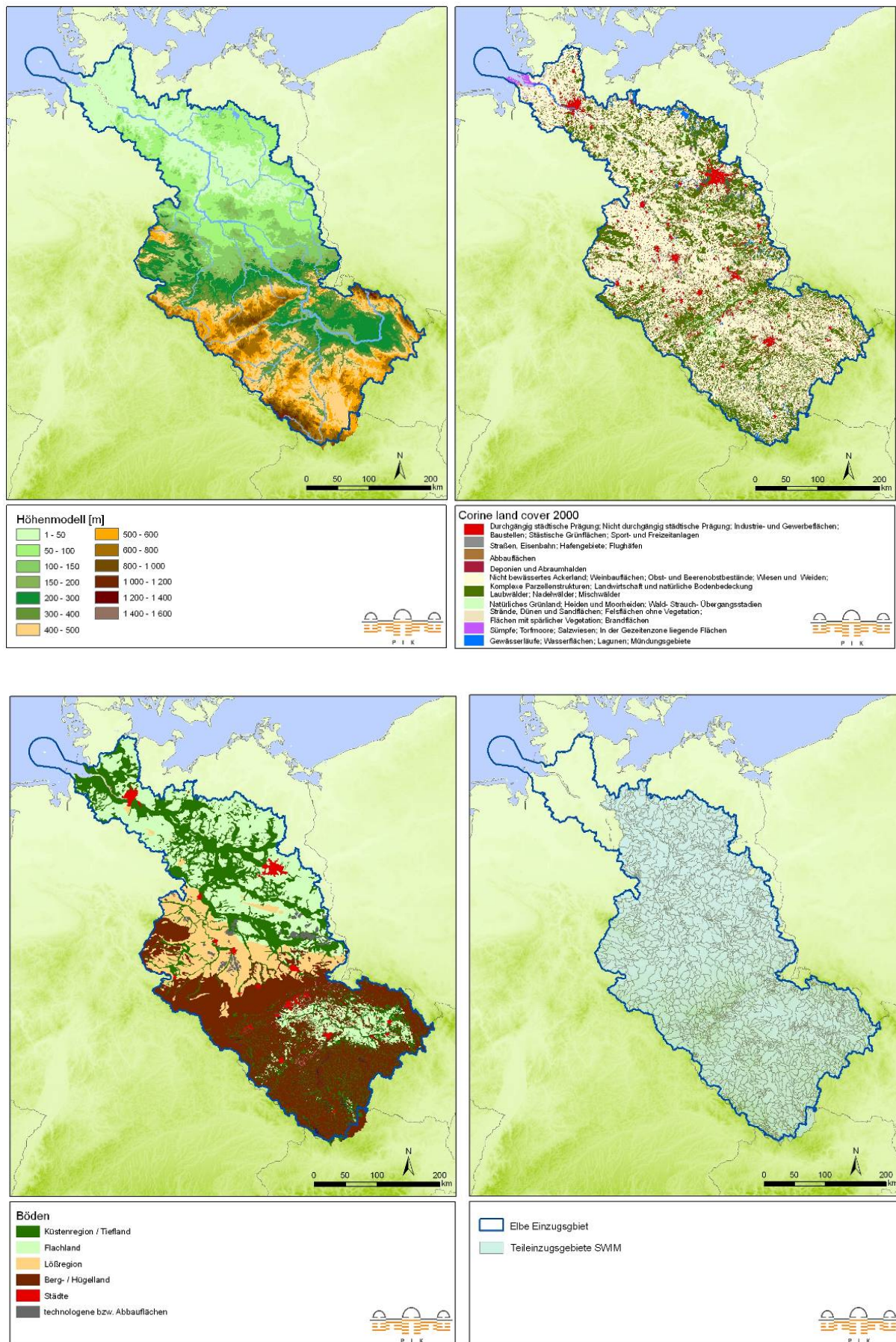
**Schematische Darstellung der in SWIM abgebildeten Pflanzenwachstumsprozesse**

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>.

### 3.1.3.2. Datengrundlage

Als Datengrundlage zur Abbildung der räumlichen Heterogenität in Sachsen-Anhalt im Modell SWIM dienten hauptsächlich Informationen zu den Boden- und Landnutzungsparametern und zur Topografie (Geländeoberfläche, Flussläufe); zur Abbildung der Klimavariabilität dienten Niederschläge, Temperaturen und Globalstrahlung von täglicher Auflösung. Da die Flüsse in Sachsen-Anhalt teilweise ihren Ursprung in anderen Bundesländern haben, diese aber in der Einzugsgebietsmodellierung mit abgebildet werden mussten, wurden aus Konsistenzgründen hauptsächlich deutschlandweit verfügbare Datengrundlagen zur Modellierung genutzt. Dies war auch die Voraussetzung, um auf die Modellimplementierung des Projektes GLOWA-Elbe zurückgreifen zu können.



**Abb. 3.1.6: Verwendete räumliche Informationen für die hydrologischen Simulationen**

Alle räumlichen Daten (Landnutzungs- und Bodeninformationen, Teileinzugsgebietsgrenzen und digitales Geländemodell) wurden 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> (2268 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. 2.3.1. und Kap. 2.3.2.). 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 geeignetsten 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.

Für den tschechischen Teil des Elbeeinzugsgebietes wurde auf räumliche Datengrundlagen des Joint Research Center ISPRA und tschechische Quellen zurückgegriffen. Diese Daten wurden entsprechend für die Modellierung zusammen mit tschechischen Experten aufbereitet (Kosková et al. 2007). Die WETTREG-Stationen und Gittermittelpunkte des Modells REMO, die in die Analysen eingehen sind in Kap. 2, Abb. 2.3.1., rechts, und Abb. 2.3.2., rechts, dargestellt.

Als Klimarandbedingung für die Projektionen in die Zukunft bis zum Jahr 2100 dienten die unter Kapitel 2 beschriebenen Ergebnisse der regionalen Klimamodelle WETTREG und REMO bezüglich ihres Niederschlages und der in Box 3.1.1 beschriebenen Klimavariablen.

### 3.1.3.3. Modellierungsstrategie

Die simulierten Abflüsse des Modells SWIM wurden an verschiedenen Pegeln mit den beobachteten Abflüssen verglichen, von denen einige allerdings außerhalb von Sachsen-Anhalt liegen (für die später im Fokus stehenden Flüsse Saale, Bode und Elbe s. die Ergebnisse in Kapitel 3.1.4). Für die Weser müssen Ergebnisse aus einer anderen Studie und Analogieschlüsse herangezogen werden (s. Kapitel 3.1.4.6).

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 aus (Hattermann et al. 2008) verglichen. Für die langjährige Abflussspende stimmen die Werte auch in der räumlichen Verteilung gut überein.

Zur Untersuchung der Klimawirkungen auf den Wasserhaushalt wurden die durch WETTREG simulierten zwanzig Klimarealisationen pro Szenarium durch das Modell SWIM in Änderungen der hydrologischen Größen transformiert (Verdunstung, Grundwasserneu-

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

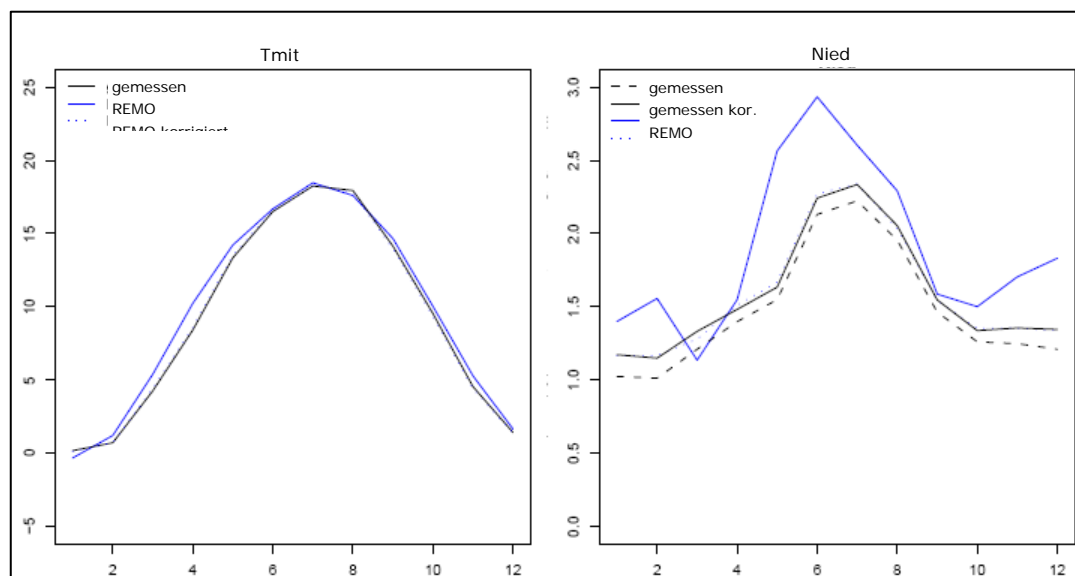
<sup>2</sup> CORINE Land Cover 2000, Umweltbundesamt, DLR-DFD 2004

<sup>3</sup> Einzugsgebiete des DLM1000 W (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Umweltbundesamt), Version: Juni 2004



bildung, Gebietsabfluss etc.). Da auf diese Weise alle Klimarealisierungen auch in der hydrologischen Analyse genutzt wurden, hat man ebenso zwanzig mögliche Realisationen der Klimafolgen auf den Wasserhaushalt. Diese wurden genutzt, um zusätzlich Aussagen über die Robustheit der Simulationsergebnisse machen zu können. Der Ergebnisteil stellt diese Bandbreite an möglichen zukünftigen Gebietsabflüssen dar und erläutert sie. Außerdem sollte das in REMO simulierte Klimaszenario durch SWIM genutzt werden, um so die durch die Anwendung der WETTREG-Ergebnisse simulierten Klimaänderungssignale besser einordnen zu können. Zusätzlich ist anzunehmen, dass REMO als physikalisch basiertes, dynamisches regionales Klimamodell neue Extreme wie Starkregenereignisse besser abbilden kann als ein statistisches Modell. Eine weitere Konsistenzprüfung erfolgte mit Ergebnissen aus dem Projekt GLOWA-Elbe.

Das Modell WETTREG gibt die statistischen Kennwerte des Klimas des Basiszeitraumes 1961–1990 sehr gut wieder (Spekat et al. 2007). Dagegen wird durch REMO im Referenzzeitraum der Niederschlag von Region zu Region unterschiedlich stark unter- bzw. überschätzt, während die Temperaturen ebenfalls recht gut wiedergegeben werden (s. Abb. 3.1.7). Insgesamt werden für den Basiszeitraum die Niederschläge im Vergleich zu den gemessenen und um den Messfehler korrigierten Werten um ca. 100 mm überschätzt (ca. 150 mm höher als die unkorrigierten, gemessenen Werte). Es wurde daher mit dem Auftraggeber abgesprochen, dass eine Biaskorrektur für die *mittleren saisonalen* klimatischen Ergebnisse aus REMO durchgeführt werden soll, um sie so vergleichbar mit den WETTREG-Szenarien zu machen. Da aber die Extremwerte nicht korrigiert werden konnten (zu wenige Ereignisse für eine Biaskorrektur), wurden diese ohne Korrektur zur Berechnung der Hochwassertrends herangezogen. Die Biaskorrektur wurde in Anlehnung an (Früh et al. 2006) durchgeführt. Dazu wurde nach Vergleich der mittleren monatlichen Werte von 1951–2003 der Bias für jeden Monat errechnet (für eine tägliche Korrektur waren z.B. die Niederschlagsdaten zu variabel) und die Szenarienergebnisse wurden um diesen Bias korrigiert.



**Abb. 3.1.7: Korrektur der REMO-Daten einer ausgewählten Rasterzelle in Sachsen-Anhalt**  
Links ist die mittlere Temperatur dargestellt (Tmit), rechts der Niederschlag (Nied)(kor: korrigiert)

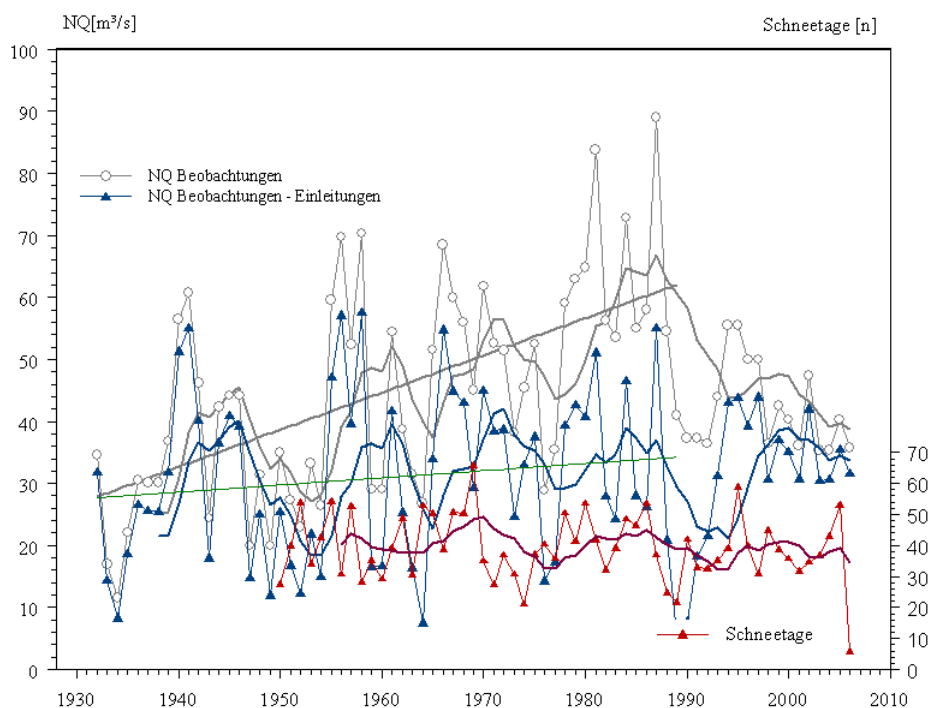
Die beobachteten Klimawerte wurden zunächst um den Messfehler korrigiert (Niederschläge), dann für jeden Tag auf die REMO-Gitterzellen interpoliert und am Ende mit den REMO-Werten verglichen und die Abweichungen ermittelt.

Verglichen wurden für die in den folgenden Kapiteln dargestellten Analysen immer die jeweiligen Simulationsergebnisse unter WETTREG- und REMO-Klima für die Szenarienperioden 2011–2040, 2041–2070 und 2071–2100 gegen die hydrologische Dekade 1961–1990 als Referenzzeitraum.

### 3.1.4. Ergebnisse

#### 3.1.4.1. Kalibrierung und Parametrisierung für den Referenzzeitraum

Zur Simulation der hydrologischen Verhältnisse in Sachsen-Anhalt mussten zunächst die entsprechenden Beobachtungsdaten für die Modellierung aufbereitet werden. Dabei wurde bei den Klimadaten darauf geachtet, dass nur solche Stationen in die Simulationen eingehen, für die später auch eine Realisation des regionalen Klimamodells WETTREG vorlag. Dadurch soll vermieden werden, dass man das Modell an einer besseren Datengrundlage eingestellt hat, als später in der Szenarienperiode vorliegt, und sich Unterschiede im Vergleich der Perioden ergeben, weil die Stationsdichte abweichend ist, und nicht etwa weil es einen Klimatrend gibt.



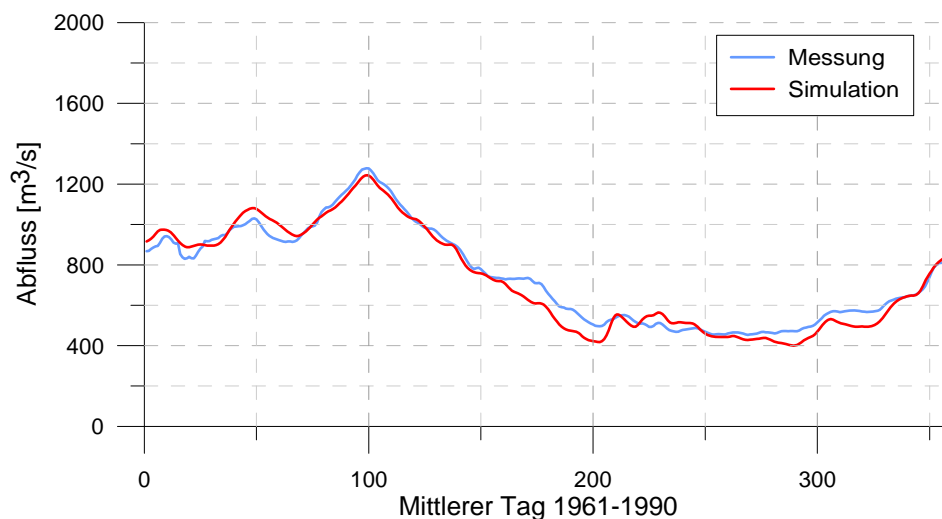
**Abb.3.1.8: Beobachteter Niedrigwasserabfluss am Saalepegel Calbe, um den Einfluss von anthropogenen Zuleitungen bereinigter Niedrigwasserabfluss und Schneetage im Saalegebiet ((Wechsung et al. 2009) in Bearbeitung) (NQ - Niedrigwasser).**

**Neben den Beobachtungswerten sind siebenjährige gleitende Mittel (dicke Kurvenlinien) und für die Niedrigwasserabflüsse Regressionsgeraden für die Zeit bis 1989 eingezeichnet.**

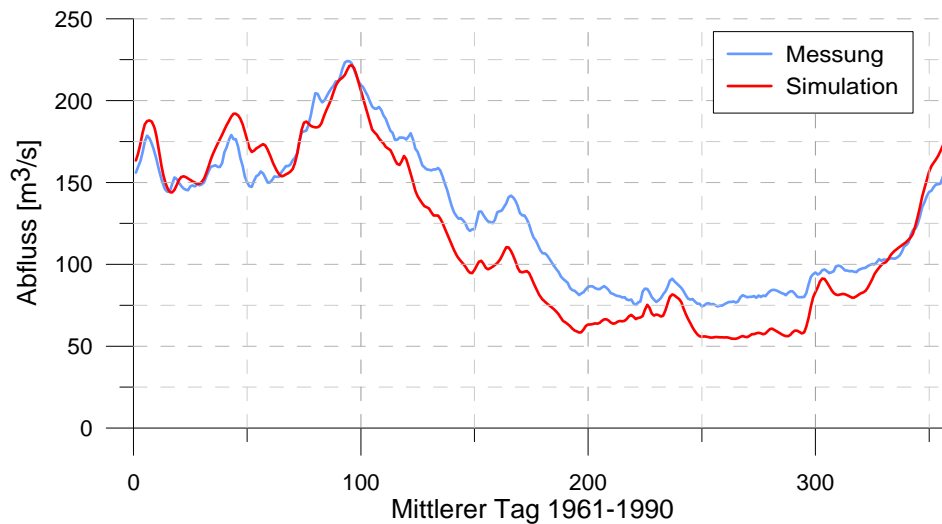
Außerdem mussten die Abflussdaten, an denen das Modell eingestellt wurde, umfangreich auf anthropogene Einflüsse untersucht werden. Grund dafür ist, dass in dieser Studie nur die Änderungen in der natürlichen Abflussbildung untersucht werden sollten und gewährleistet werden musste, dass anthropogenes Management nicht in die Parametrisierung für den Referenzzeitraum einfließt. Abb.3.1.8 zeigt den gemessenen Abfluss für die Saale am Pegel Calbe und die Änderungen, falls man z.B. den Einfluss der Salzlaststeuerung und die Hebung von Wasser im mitteldeutschen Braunkohlerevier herausrechnet, welche speziell den Trockenwetterabfluss im Sommer stark erhöht haben.

Wie man in Abb. 3.1.9 und Abb. 3.1.10 sieht, ist das Modell in der Lage, die beobachteten saisonalen Abflüsse im Referenzzeitraum gut wiederzugeben. Die Unterschätzung der Sommerabflüsse in der Saale ist wie oben beschrieben beabsichtigt, da die gemessenen Sommerabflüsse aufgrund der Zuleitungen erhöht waren.

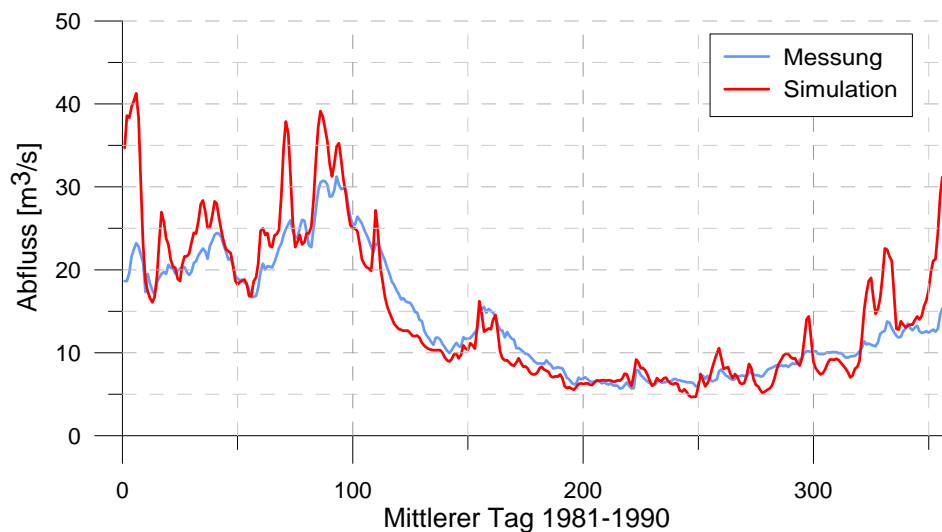
Ebenfalls auf anthropogene Eingriffe, hier Talsperrensteuerung, ist der Unterschied in der Varianz der Abflüsse in der Bode am Pegel Hadmersleben zu erklären: Durch die Talsperrenkaskade in der oberen Bode werden gerade Hochwässer in ihrem Scheitelabfluss „gekappt“, und die resultierende Abflussganglinie wird dadurch weniger dynamisch, also optisch „glatter“. Um aber mögliche Hochwasserspitzen unter Klimawandel nicht zu unterschätzen, wurden auch hier für die Studie die natürlichen Abflüsse simuliert.



**Abb. 3.1.9: Simulierter und beobachteter Abfluss am Pegel Neu Darchau (Elbe) 1961–1990**



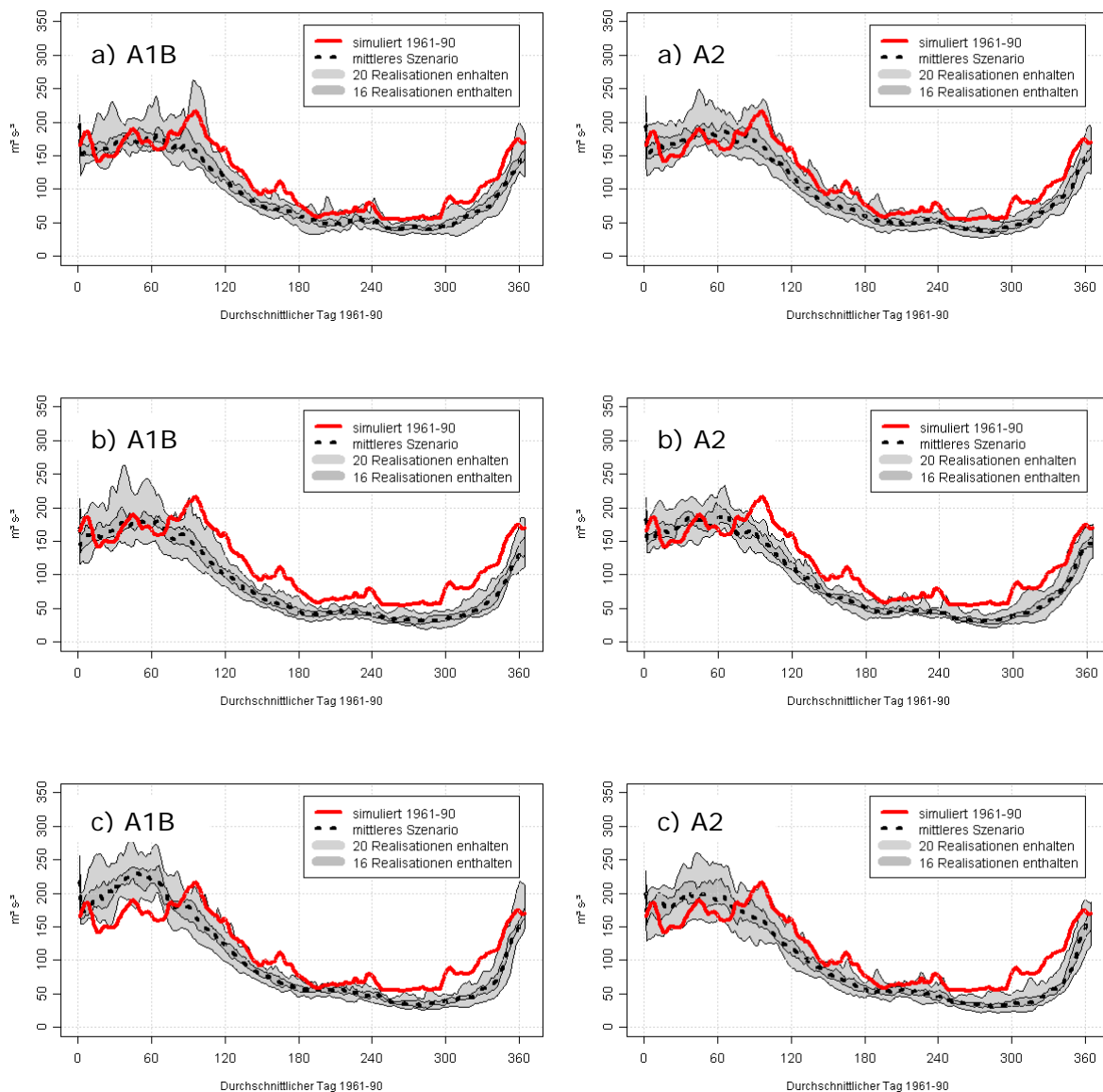
**Abb. 3.1.10: Simulierter und beobachteter Abfluss am Pegel Calbe (Saale) 1961–1990**



**Abb. 3.1.11: Simulierter und beobachteter Abfluss am Pegel Hadmersleben (Bode) 1981–1990**

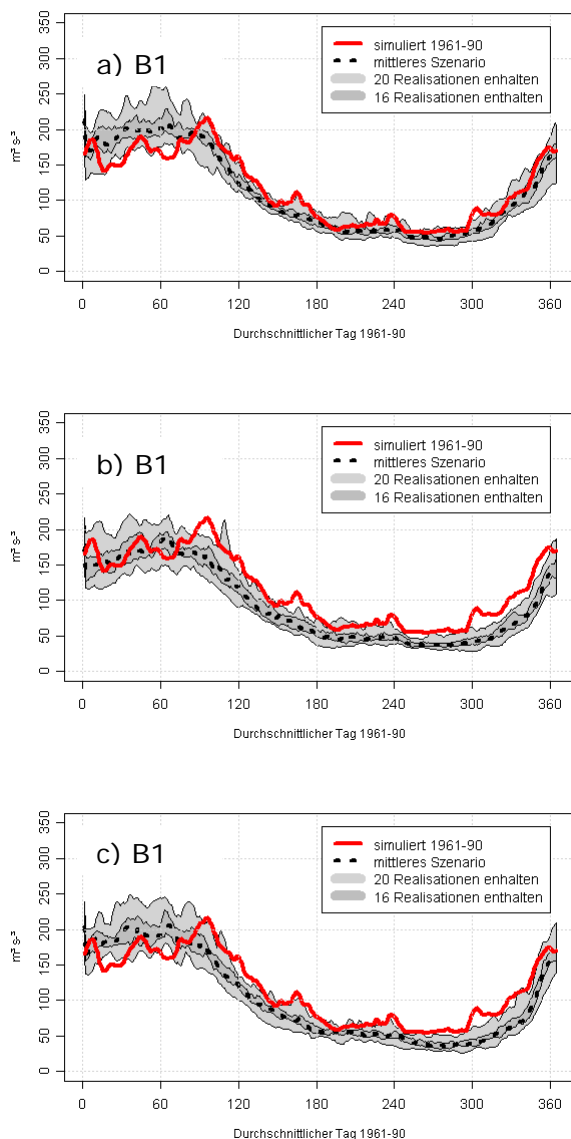
### 3.1.4.2. Klimafolgen für den Wasserhaushalt (WETTREG-Klimaszenarien)

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Klimafolgen für die wichtigsten Flüsse in Sachsen-Anhalt (Elbe, Saale, Bode), berechnet durch das Modell SWIM unter WETTREG- und REMO-Szenarienbedingungen, jeweils als Unterschied der mittleren täglichen Abflüsse der Jahre 1961–1990 und 2011–2040, 2041–2070 und 2071–2100.



**Abb. 3.1.12: Abflussentwicklung der Saale**

Änderungen der durch SWIM simulierten, mittleren täglichen Abflüsse der Saale im Jahresverlauf am Pegel Calbe unter Szenarienbedingungen, als a) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961–1990 und der Szenarienperiode 2011–2040 (WETTREG, 20 Realisationen), b) Vergleich mit der Szenarienperiode 2041–2070 und c) Vergleich mit der Szenarienperiode 2071–2100. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für das Szenario A1B, auf der rechten für das Szenario A2 dargestellt.



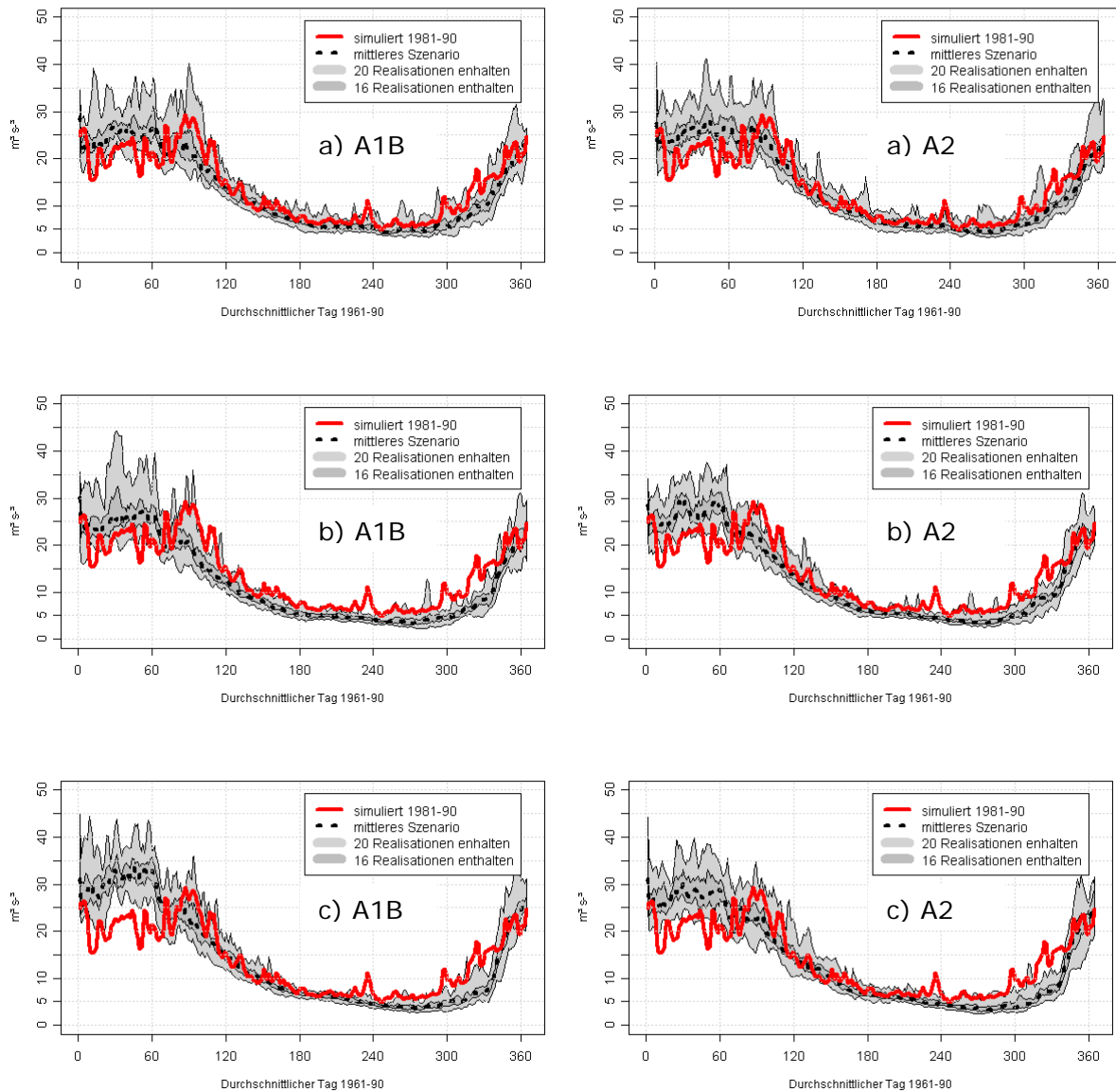
**Abb. 3.1.13: Abflussentwicklung der Saale**

**Änderungen der durch SWIM simulierte mittleren täglichen Abflüsse der Saale im Jahresverlauf am Pegel Calbe unter Szenarienbedingungen (hier Szenario B1), als a) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961–1990 und der Szenarienperiode 2011–2040 (WETTREG, 20 Realisationen), b) Vergleich mit der Szenarienperiode 2041–2070 und c) Vergleich mit der Szenarienperiode 2071–2100.**

Im Einzugsgebiet der Saale zeigt sich auch unter den unterschiedlichen WETTREG-Szenarien dieselbe Entwicklung (Abb. 3.1.12 bis Abb. 3.1.13): Über die Szenarienperioden verschiebt sich die winterliche Abflussspitze immer mehr in den Winter hinein. Die Abflüsse fallen entsprechend früher im zeitigen Frühjahr, sobald die Vegetationsperiode beginnt, und sie fallen tiefer unter die mittleren Werte des Referenzzeitraumes 1961–1990. Am stärksten sinkt der sommerliche Abfluss in der zweiten Szenarienperiode und steigt gegen Ende des Jahrhunderts wieder leicht an. Insgesamt sieht man in allen Szenarien die starken und signifikanten Niedrigwasserabflüsse im Sommer, wobei das Szenario B1 die geringsten Änderungen zeigt. Trotzdem sind auch in diesem Szenario die Trends signifikant und alle 20 Realisationen liegen im Sommer unter dem Durchschnitt

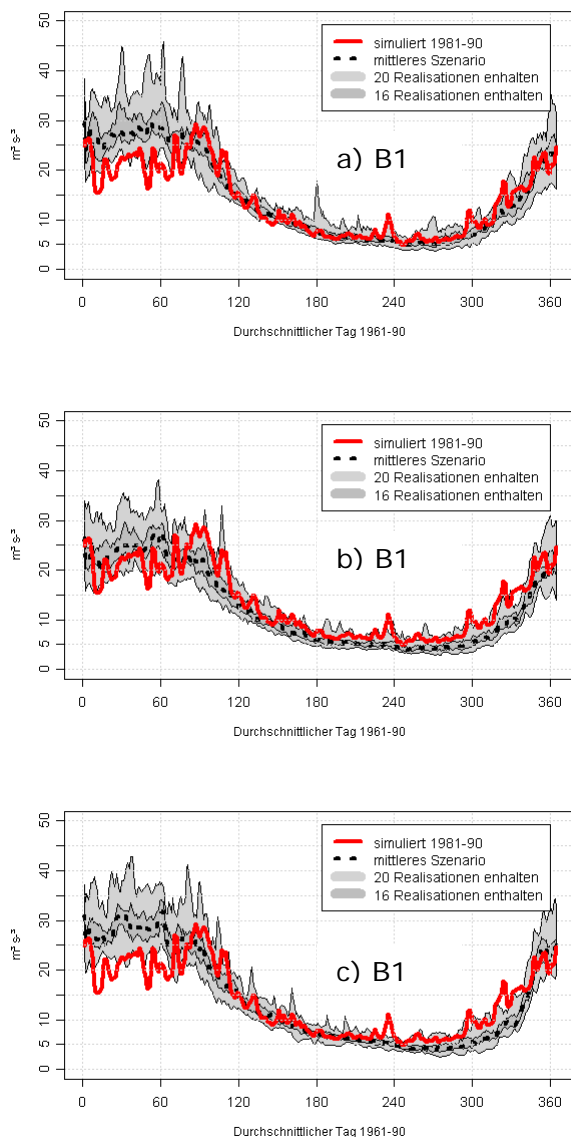


für den Referenzzeitraum. Mit dem Rückgang der Abflüsse einher geht ein Rückgang der Grundwasserneubildung im Sommer, während im Winter die Grundwasserneubildung zeitweise ansteigen kann. Allerdings schrumpft unter diesen Szenarienbedingungen die zeitliche Phase im Winter, in der Grundwasserneubildung stattfindet.



**Abb. 3.1.14: Abflussentwicklung der Bode**

Änderungen der durch SWIM simulierten mittleren täglichen Abflüsse der Bode im Jahresverlauf am Pegel Hadmersleben unter Szenarienbedingungen, als a) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961–1990 und der Szenarienperiode 2011–2040 (WETTREG, 20 Realisationen), b) Vergleich mit der Szenarienperiode 2041–2070 und c) Vergleich mit der Szenarienperiode 2071–2100. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für das Szenario A1B, auf der rechten für das Szenario A2 dargestellt.

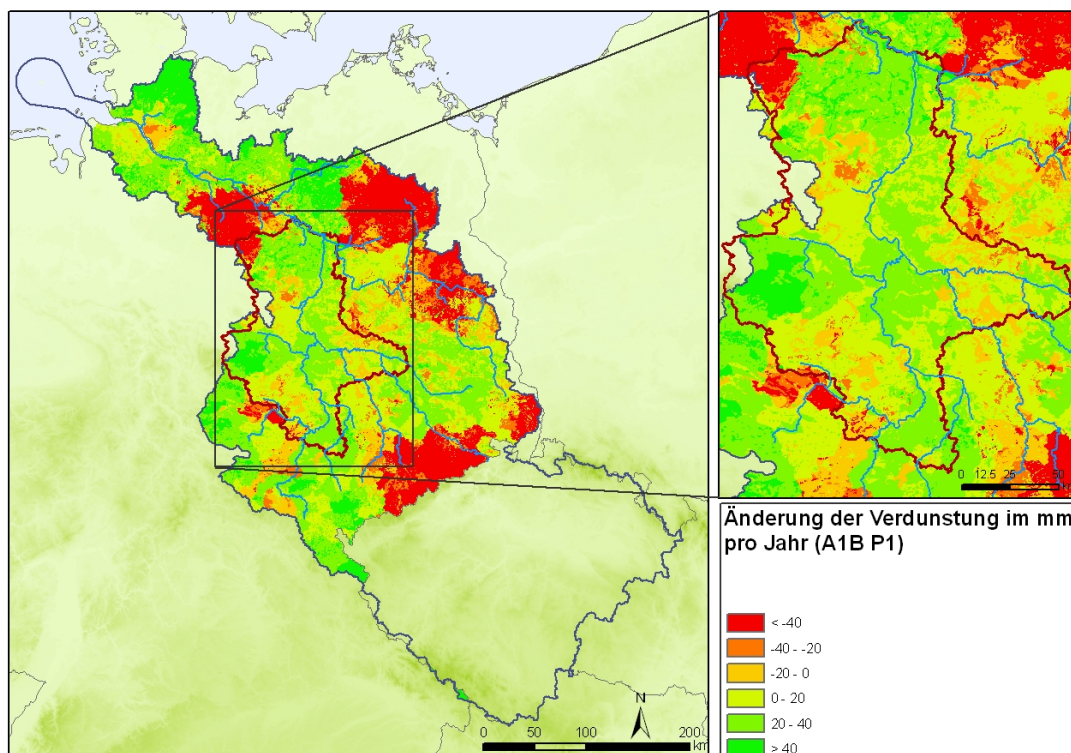


**Abb. 3.1.15: Abflussentwicklung der Bode**

**Änderungen der durch SWIM simulierte mittleren täglichen Abflüsse der Bode im Jahresverlauf am Pegel Hadmersleben unter Szenarienbedingungen (hier Szenario B1), als a) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961–1990 und der Szenarienperiode 2011–2040 (WETTREG, 20 Realisationen), b) Vergleich mit der Szenarienperiode 2041–2070 und c) Vergleich mit der Szenarienperiode 2071–2100.**

Für die Bode, welche das nördlichste Teileinzugsgebiet der Saale bildet, weichen die Ergebnisse unter Szenarienbedingungen etwas von den Ergebnissen für die Saale ab (Abb. 3.1.14 und Abb. 3.1.15). Die Bode entspringt im Nordostharz und profitiert hier im Winter von den steigenden Niederschlägen, so dass es in der ersten Szenarienperiode nicht zu so starken Rückgängen der sommerlichen Abflüsse kommt, während im Winter insbesondere unter A2 und B1-Klimabedingungen schon in der ersten Szenarienperiode stärkere Abflüsse im Winter generiert werden. Der Trend zu stärkeren Abflüssen mit einer Verschiebung in den Winter hinein verstärkt sich dann in der zweiten und dritten Szenarioperiode. Wie auch in der Saale, ist zu erkennen, dass die dritte Szenarioperiode wie-

der etwas feuchter wird als die zweite, trotzdem sind insbesondere im Herbst die Abflüsse geringer als im Referenzzeitraum.

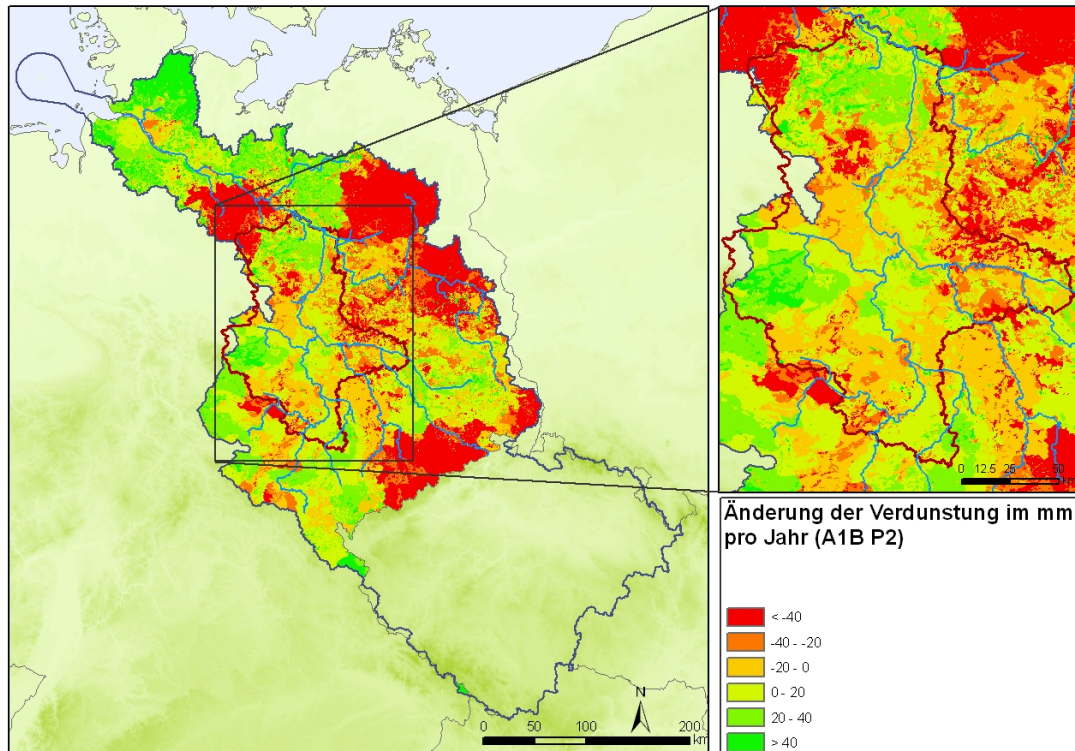


**Abb. 3.1.16: Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 1, Szenario A1B**  
(Mittel der 20 simulierten Werte für die Jahre 2011–2040, auf Basis von Klimadaten des Modells WETTREG minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)

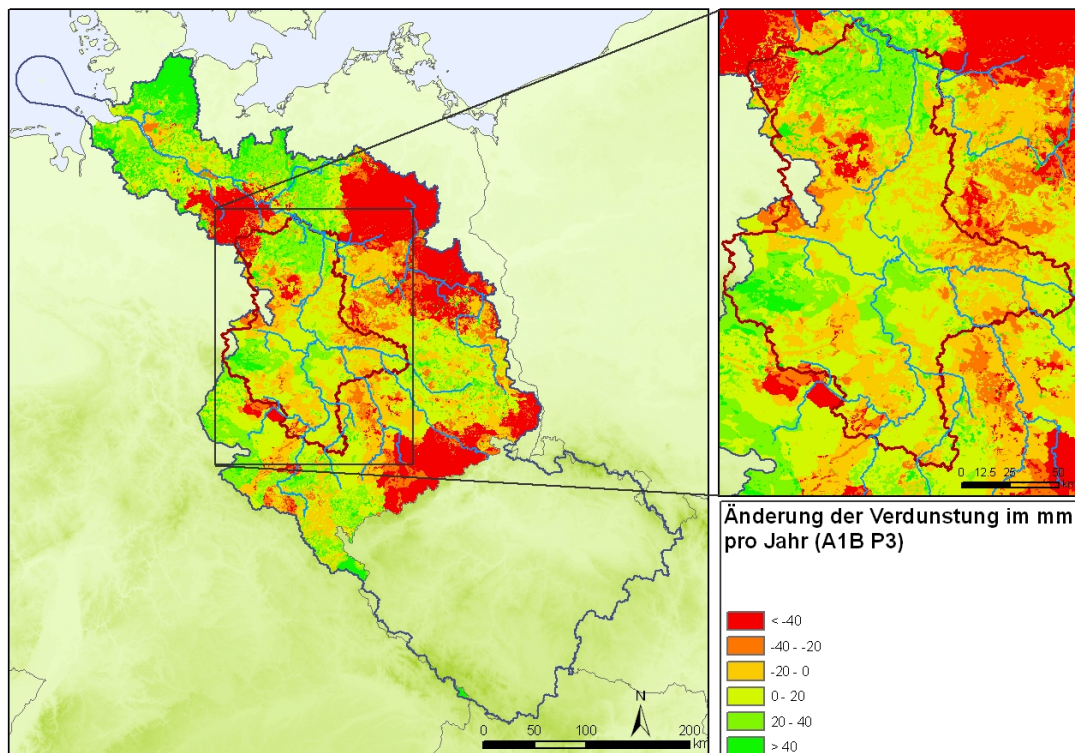
Die Abb. 3.1.16 bis Abb. 3.1.18 zeigen die Änderung in der realen Verdunstung im Vergleich der drei Szenarienperioden zum Referenzzeitraum in Form von Karten (Szenario A2 und B1 siehe Anhang 3.1). Wie man sieht, steigt die Verdunstung in der ersten Periode in fast allen Regionen des Landes Sachsen-Anhalt an. Allerdings fällt dieser Anstieg dort geringer aus, wo aufgrund der rückläufigen Niederschläge das Wasserdargebot fällt und damit insgesamt weniger Wasser für die Verdunstung zur Verfügung steht. In der zweiten und dritten Szenarienperiode sinkt aufgrund der geringeren Niederschläge sogar die Verdunstung in einigen Landesteilen, z.B. im Raum der Magdeburger Börde (Abb. 3.1.18).

Abnehmende reale trotz höherer potentieller Verdunstungen bedeuten zunehmenden Trockenstress für die Vegetation. Da die Wasserverfügbarkeit in weiten Teilen Sachsen-Anhalts den limitierenden Faktor für die landwirtschaftlichen Erträge darstellt, ist ein Absinken der Ertragspotentiale nicht unwahrscheinlich. Siehe hierzu auch das Kapitel „Landwirtschaft“.



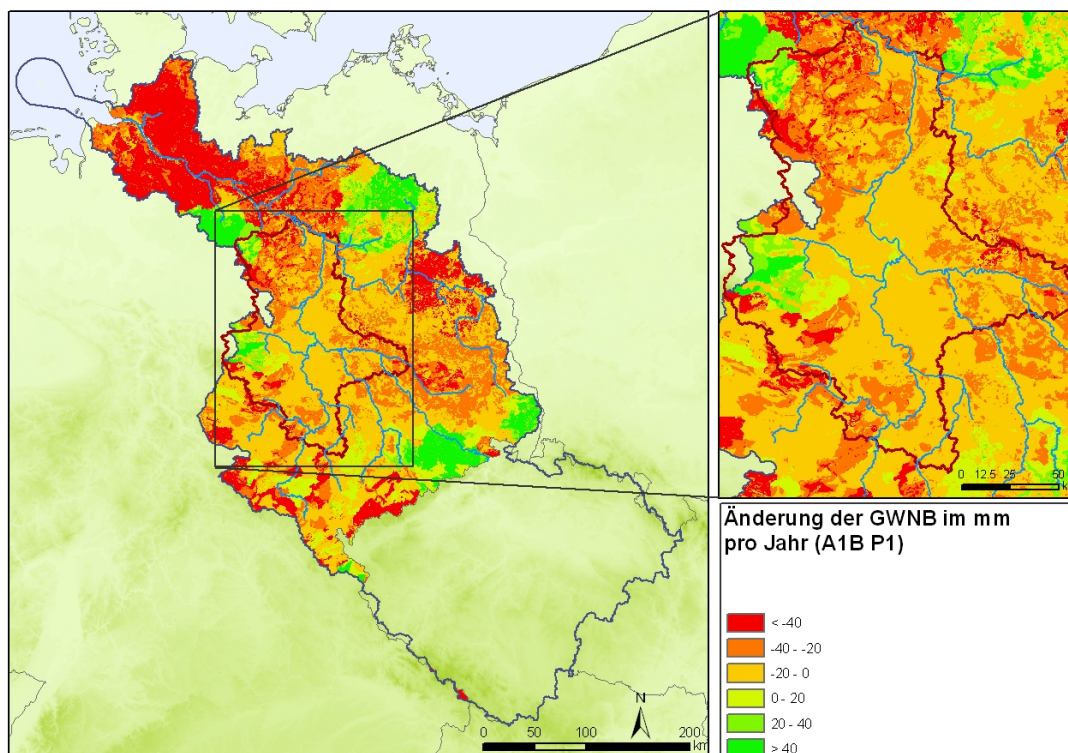


**Abb. 3.1.17:** Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 2, Szenario A1B  
(Mittel der 20 simulierten Werte für die Jahre 2041–2070, auf Basis von Klimadaten des Modells WETTREG minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)



**Abb. 3.1.18:** Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 3, Szenario A1B  
(Mittel der 20 simulierten Werte für die Jahre 2071–2100, auf Basis von Klimadaten des Modells WETTREG minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)

Die Ergebnisse für die anderen WETTREG Szenarien ähneln sich hier sehr stark und sind daher im Anhang wiedergegeben.

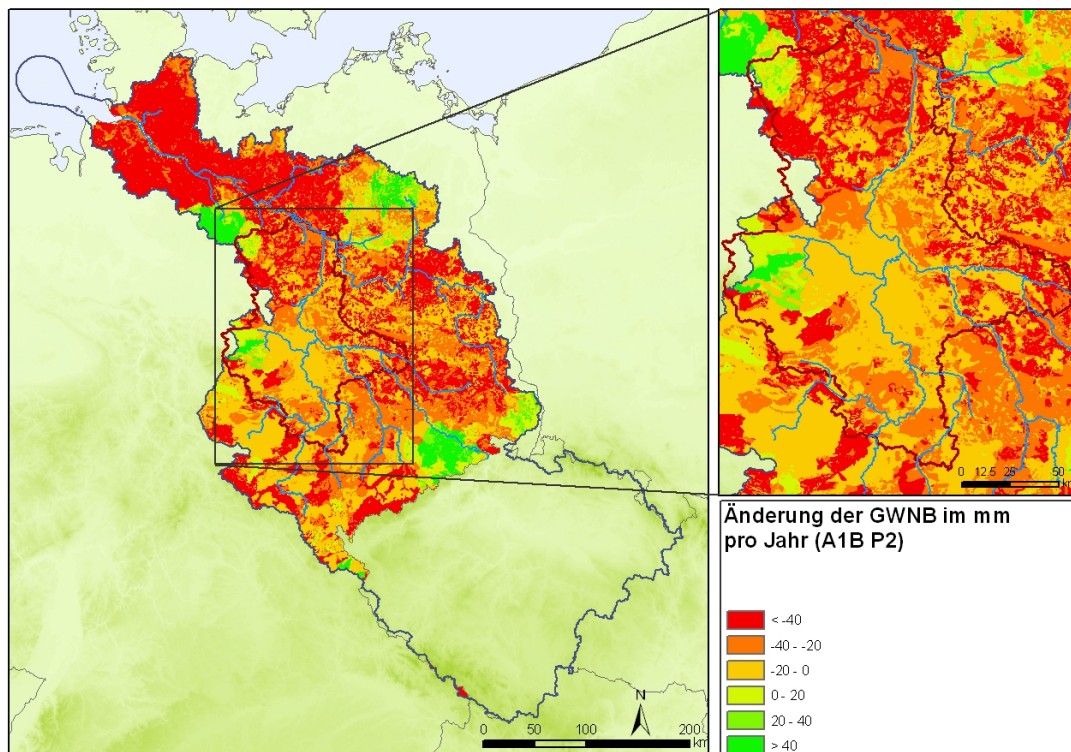


**Abb. 3.1.19: Änderung in der Grundwasserneubildung (GWN), Szenarioperiode 1, Szenario A1B**

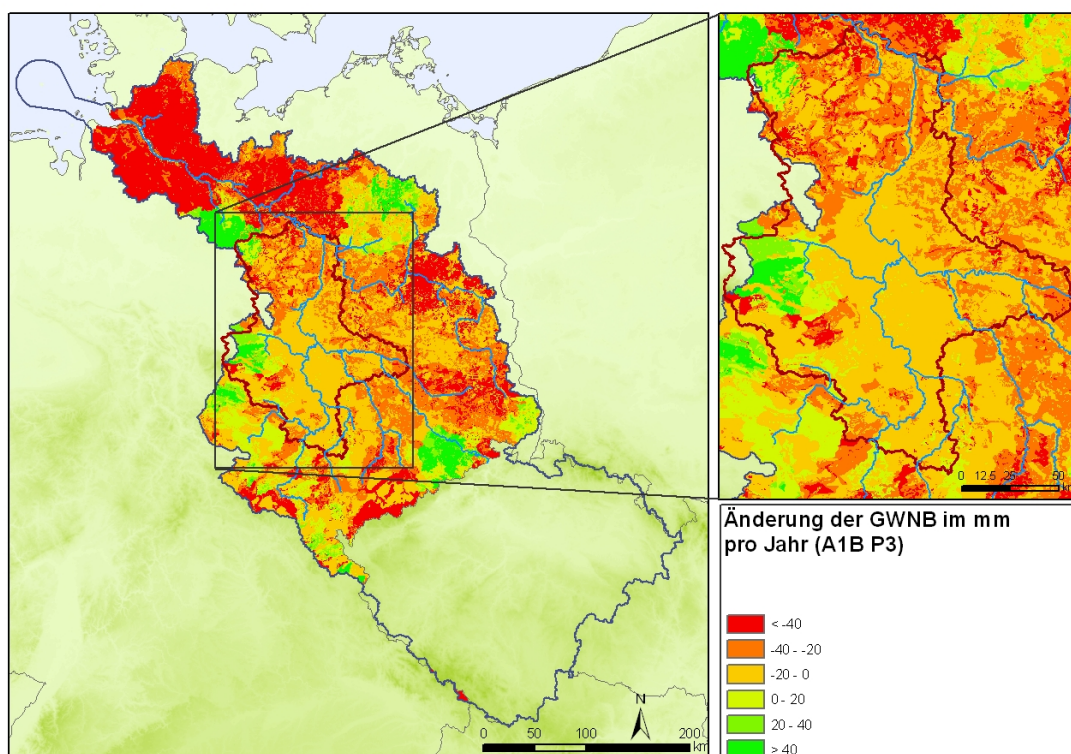
*(Mittel der 20 simulierten Werte für die Jahre 2011–2040, auf Basis von Klimadaten des Modells WETTREG minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)*

Grundwasserneubildung ist das Restglied der lokalen Wasserbilanz und als solche besonders sensitiv gegenüber Änderungen im Niederschlag oder in der Verdunstung. Die Grundwasserneubildung fällt in fast allen Regionen in Sachsen-Anhalt. Nur dort, wo insgesamt mehr Niederschlag fällt, z.B. im Bereich der Mittelgebirge, steigt die Grundwasserneubildung etwas (Abb. 3.1.19 bis Abb. 3.1.21). Besonders stark ist der Rückgang in der zweiten Szenarioperiode, dagegen steigt die Grundwasserneubildung gegen Ende des Jahrhunderts wieder etwas, ist aber trotzdem noch deutlich unter dem Niveau des Referenzzeitraumes. Auch hier sind die Ergebnisse für die anderen WETTREG-Szenarien im Anhang wiedergegeben.





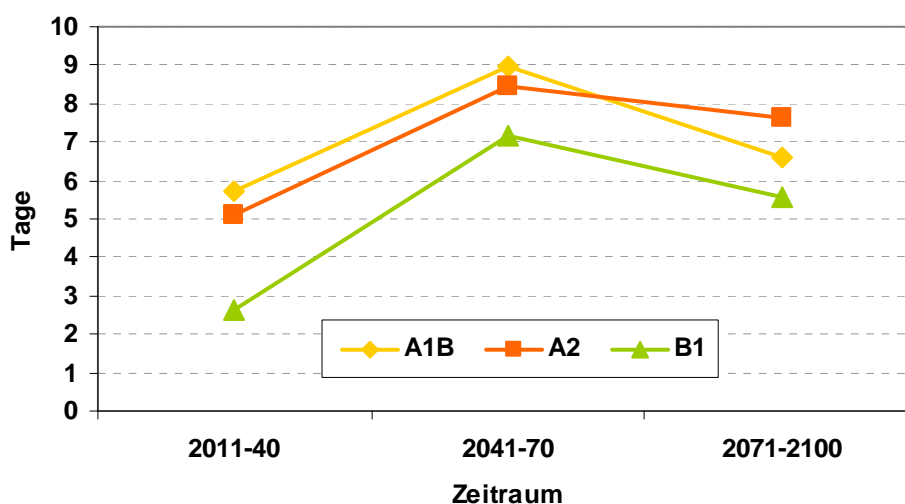
**Abb. 3.1.20:** Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 2, Szenario A1B (Mittel der 20 simulierten Werte für die Jahre 2041–2070, auf Basis von Klimadaten des Modells WETTREG minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)



**Abb. 3.1.21:** Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 3, Szenario A1B (Mittel der 20 simulierten Werte für die Jahre 2071–2100, auf Basis von Klimadaten des Modells WETTREG minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)



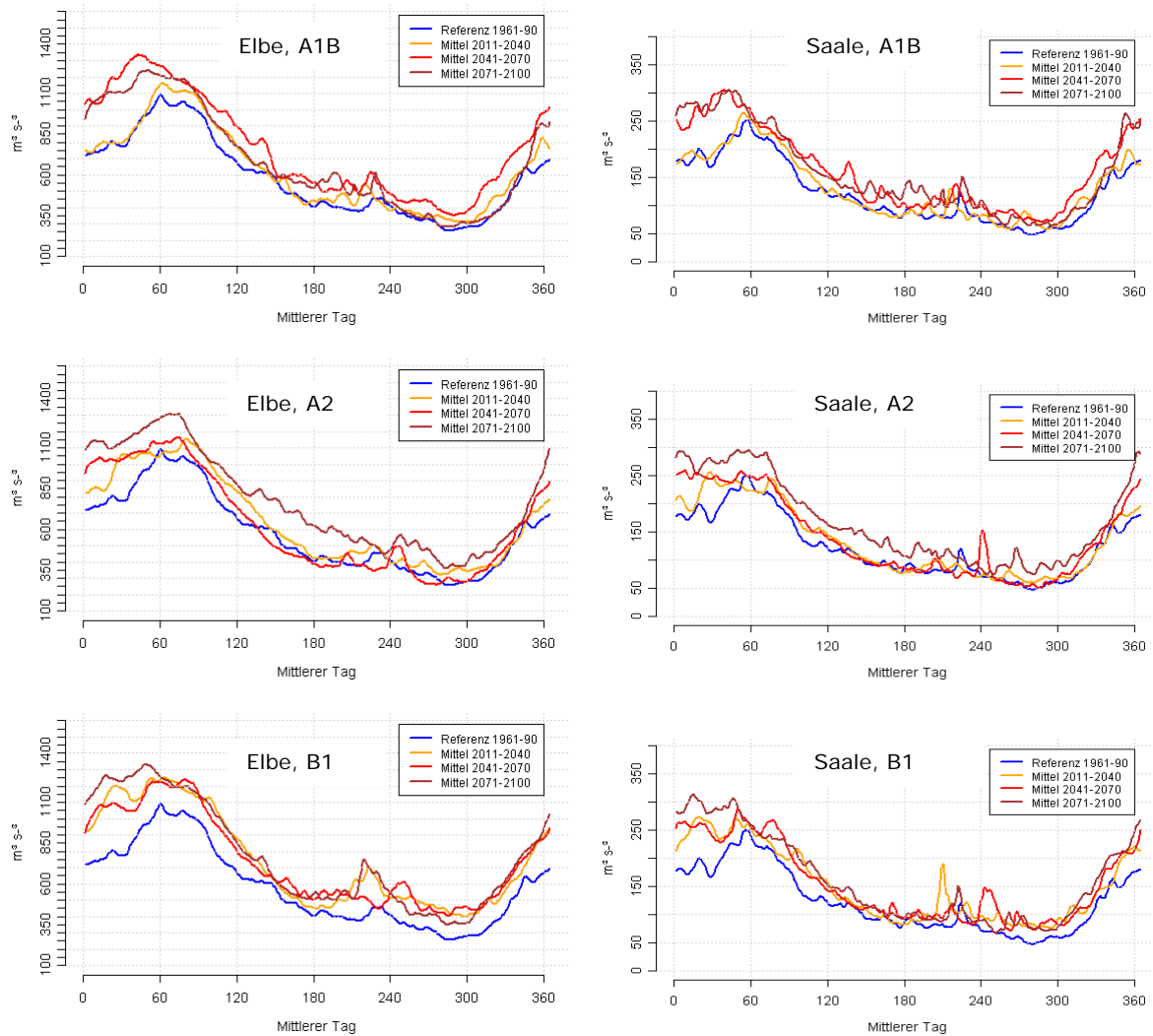
Abb. 3.1.22 zeigt eine verdichtete Auswertung der Szenarienergebnisse für die Saale: Für jede Szenarienperiode und für jedes Szenario wurde die Anzahl der Tage mit mittleren Abflüssen von unter  $20 \text{ m}^3$  pro Sekunde errechnet. Deutlich wird, dass dieser Indikator für die Niedrigwasserabflüsse von der ersten zur zweiten Szenarienperiode in allen Szenarios stark ansteigt, aber zur dritten Szenarienperiode wieder abfällt. Dies liegt ebenfalls an den durch WETTREG generierten Klimadaten, welche gegen Ende des Jahrhunderts wieder mehr Niederschläge ausweisen.



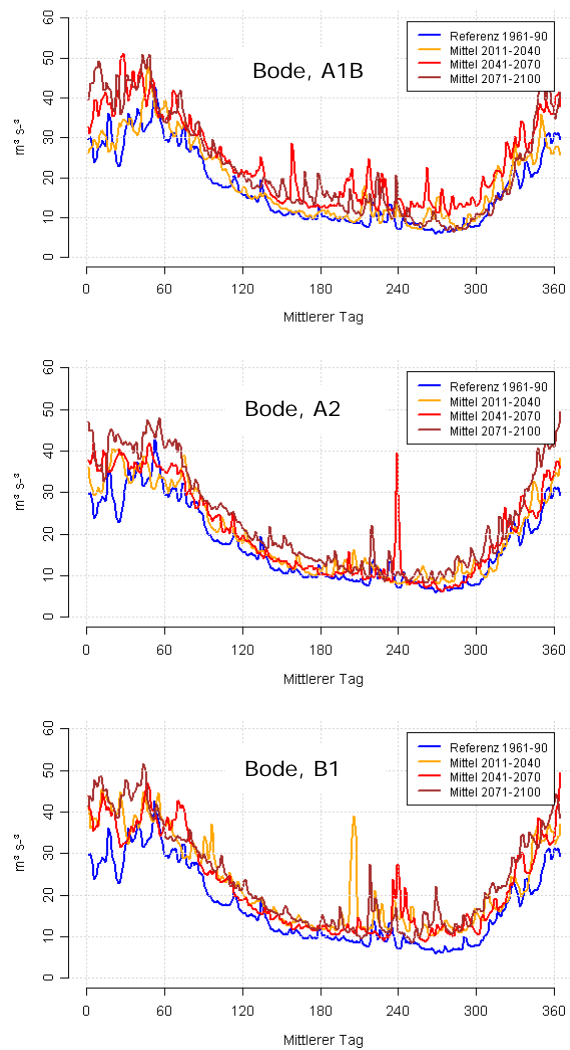
**Abb. 3.1.22:** Anzahl der Tage mit weniger Abfluss als durchschnittlich  $20 \text{ m}^3$  pro Sekunde für die drei Zeitscheiben und drei WETTREG-Szenarien

### 3.1.4.3. Klimafolgen für den Wasserhaushalt (REMO-Klimaszenarien)

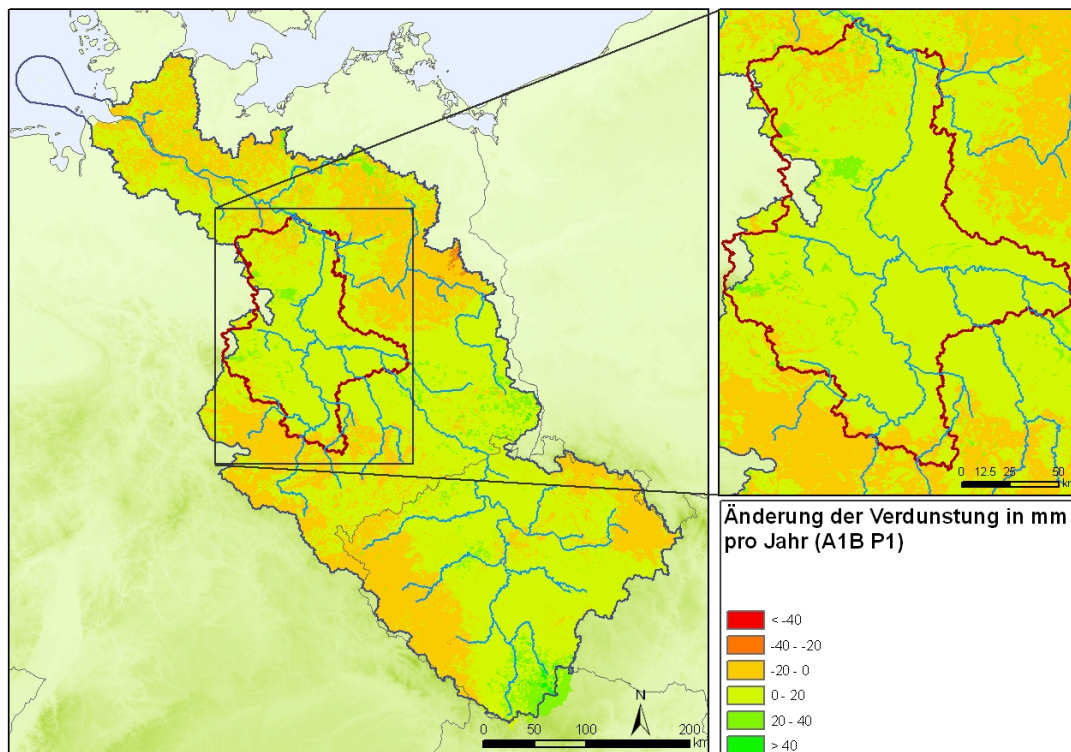
In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse für den Wasserhaushalt unter REMO-Szenariobedingungen dargestellt. Insgesamt fallen die Abflüsse hier höher aus und steigen teilweise sogar von Szenarienperiode zu Szenarienperiode. In den Ergebnissen für die Flüsse Elbe, Saale und Bode fällt auf, dass die winterlichen Abflüsse einen stärkeren Trend zu zunehmenden Abflüssen zeigen als die sommerlichen, wo die Zunahme der Verdunstung zu einer geringeren oder überhaupt keiner Zunahme führt. Die Amplitude zwischen sommerlichen und winterlichen Abflüssen steigt also. Der Anstieg der Abflüsse ist im B1-Szenario am stärksten und im A2-Szenario am geringsten.



**Abb. 3.1.23:** Änderung der Abflüsse unter REMO-Klima für die Elbe am Pegel Neu Darchau (links) und für die Saale am Pegel Calbe (rechts) unter den Klimaszenarien A2, A1B, und B1



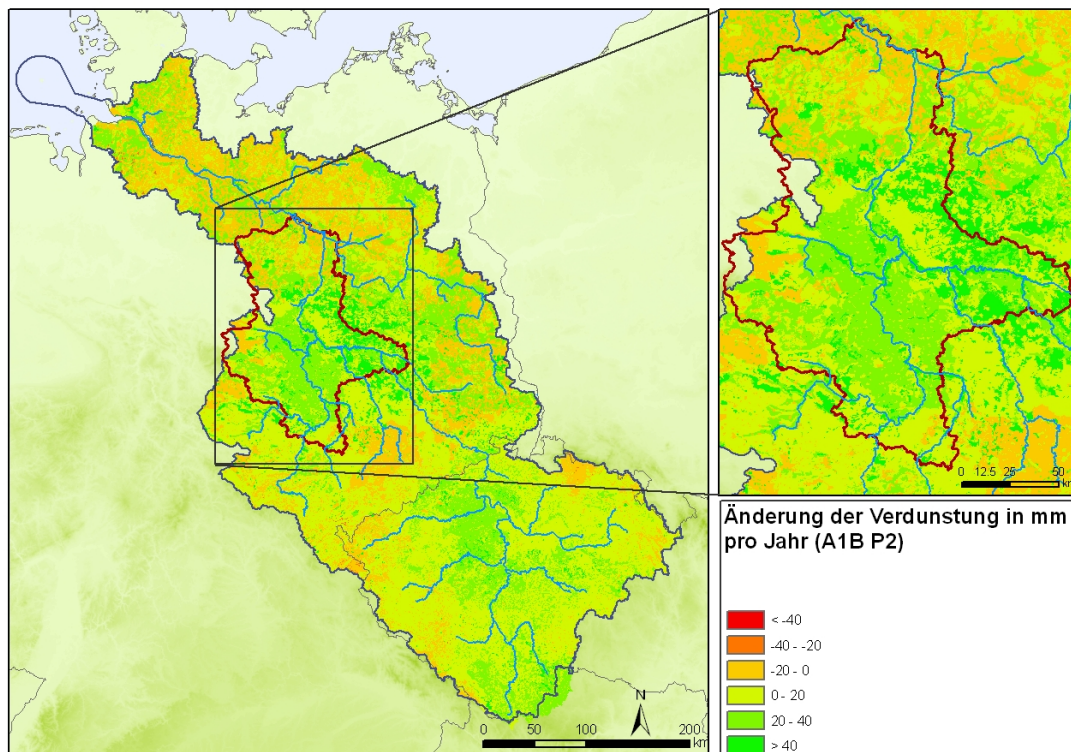
**Abb. 3.1.24:** Änderung der Abflüsse unter REMO-Klima für die Bode am Pegel Hadmersleben unter den Klimaszenarien A2, A1B, und B1



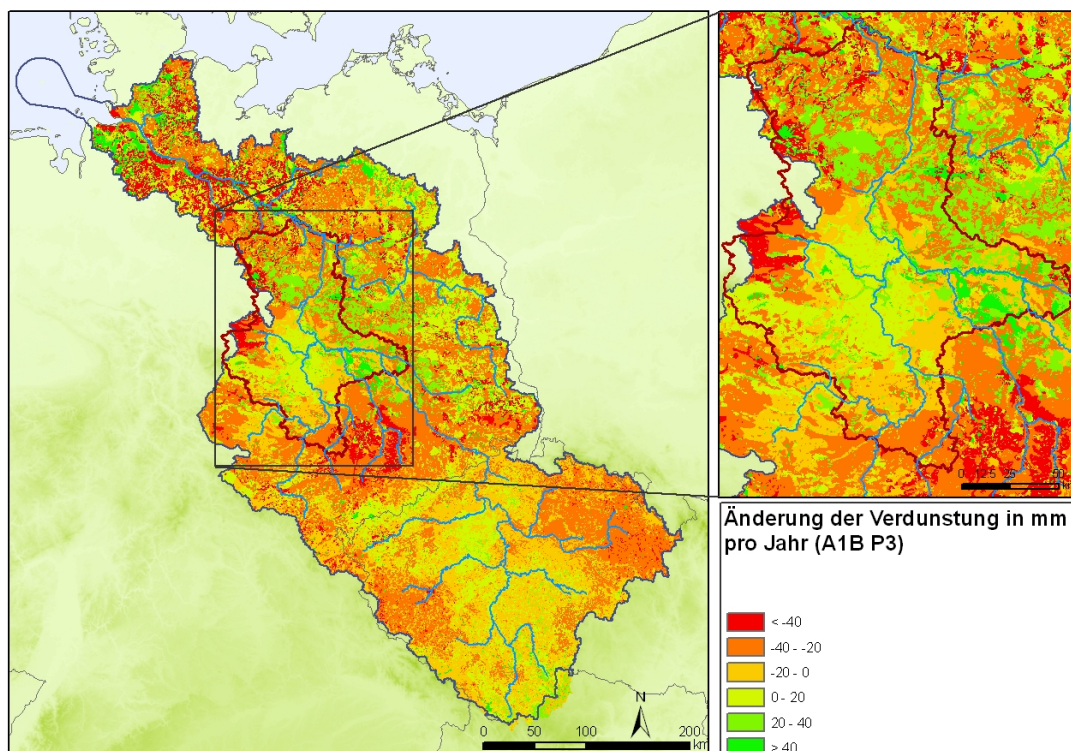
**Abb. 3.1.25: Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 1, Szenario A1B**  
*(Mittel der simulierten Werte für die Jahre 2011–2040, auf Basis von Klimadaten des Modells REMO minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)*

Die räumliche Verteilung der Änderung in den Wasserhaushaltsgrößen unter REMO-Szenario A1B ist in Abb. 3.1.25 bis Abb. 3.1.30 dargestellt. Man sieht, dass in den meisten Gebieten in Sachsen-Anhalt die Verdunstung zunimmt. Die Grundwasserneubildung nimmt in den Bördegebieten und im Windschatten des Harzes zunächst ab, steigt aber in den anderen Regionen des Bundeslandes. In der zweiten Szenarienperiode steigt die Grundwasserneubildung allerdings in fast ganz Sachsen-Anhalt an, besonders stark in den Mittelgebirgslagen.



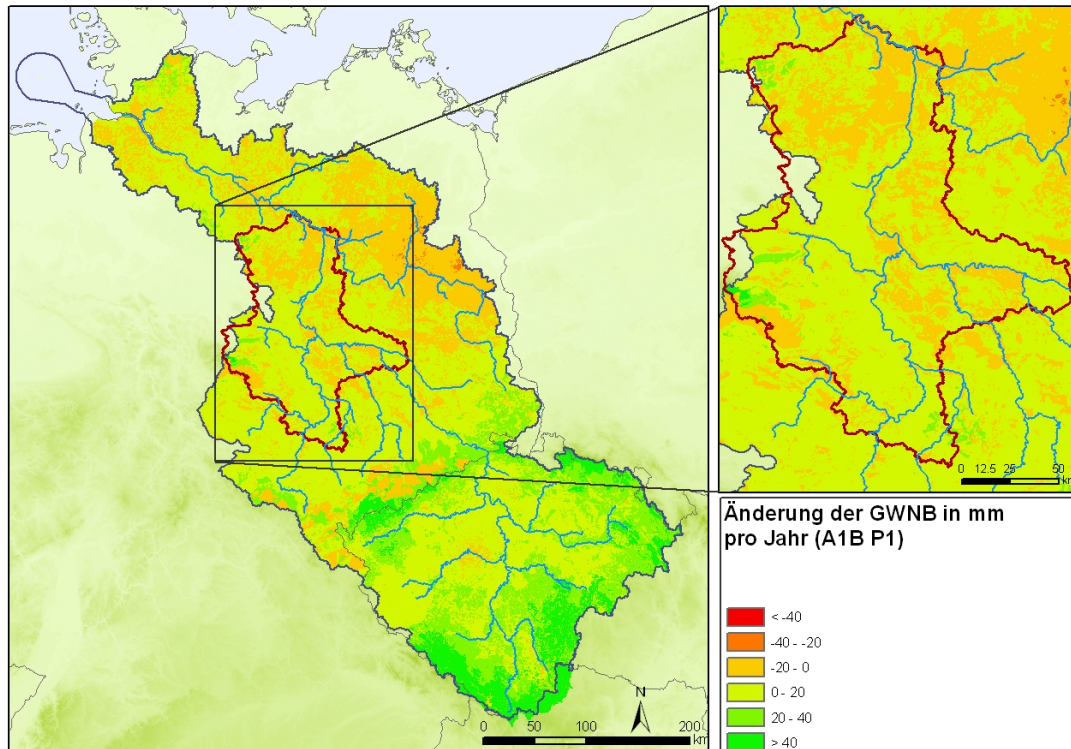


**Abb. 3.1.26:** Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 2, Szenario A1B  
(Mittel der simulierten Werte für die Jahre 2041–2070, auf Basis von Klimadaten des Modells REMO minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)

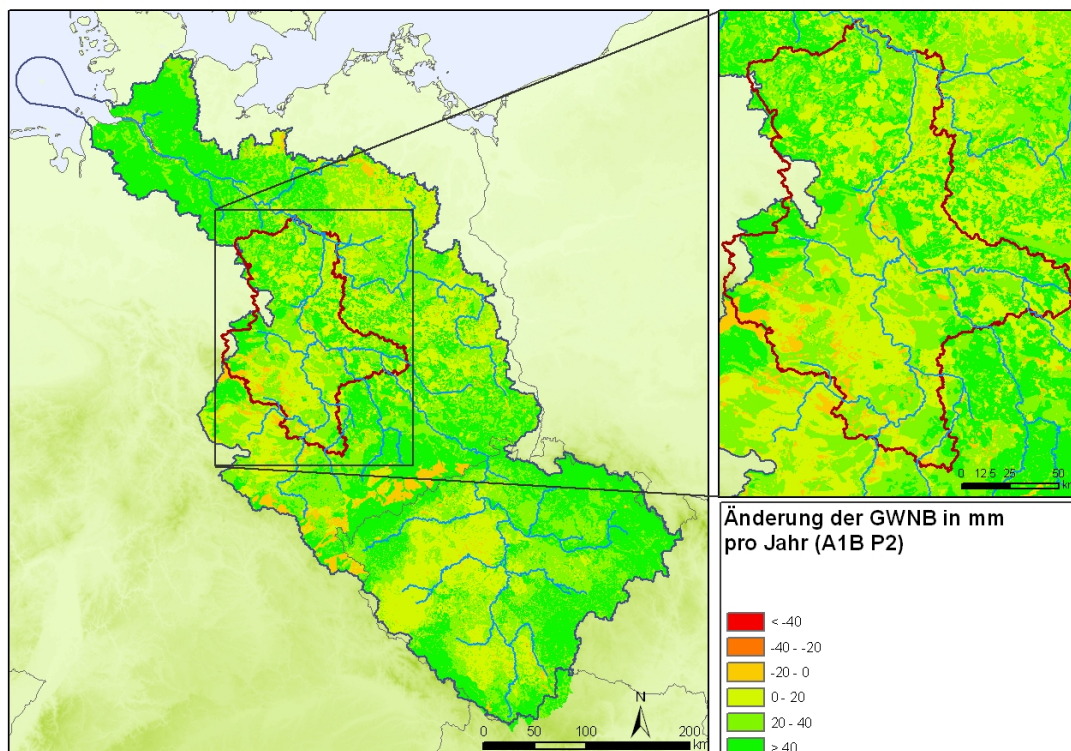


**Abb. 3.1.27:** Änderung in der realen Verdunstung Szenarioperiode 3, Szenario A1B  
(Mittel der simulierten Werte für die Jahre 2071–2100, auf Basis von Klimadaten des Modells REMO minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)



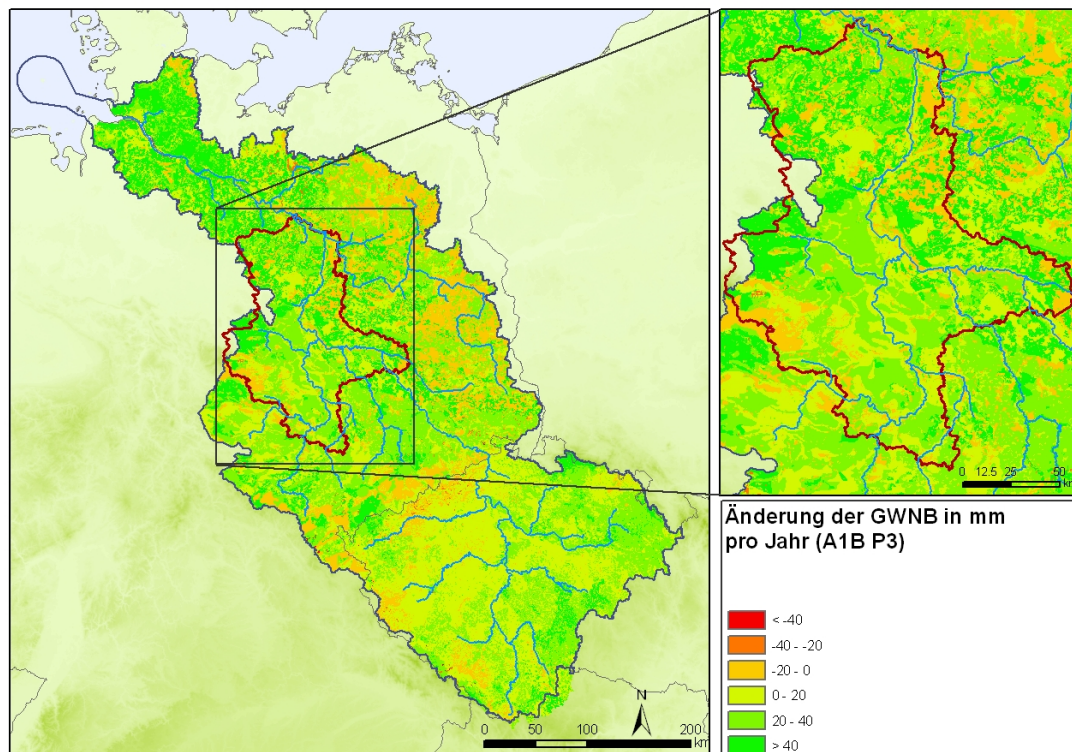


**Abb. 3.1.28: Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 1, Szenario A1B**  
(Mittel der simulierten Werte für die Jahre 2011–2040, auf Basis von Klimadaten des Modells REMO minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)

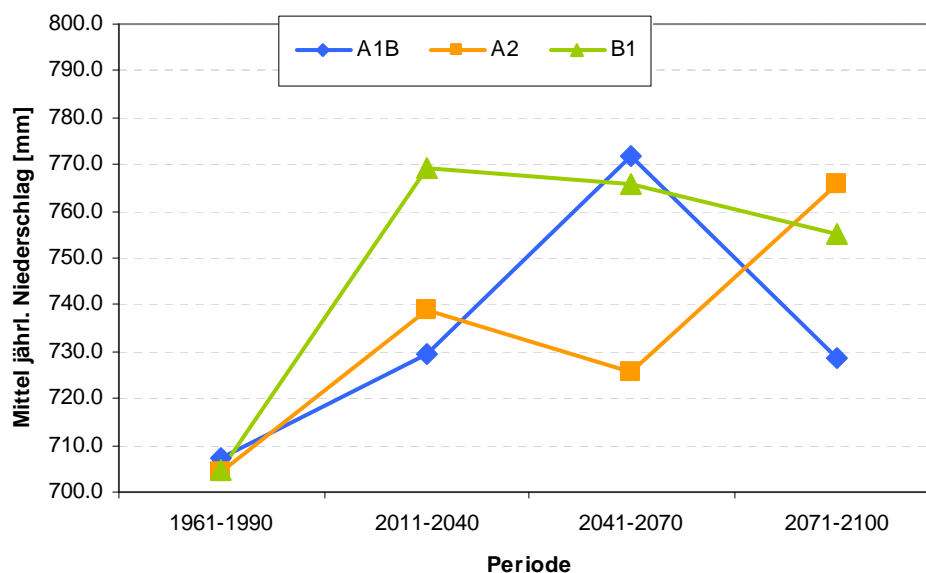


**Abb. 3.1.29: Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 2, Szenario A1B**  
(Mittel der simulierten Werte für die Jahre 2041–2070, auf Basis von Klimadaten des Modells REMO minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)





**Abb. 3.1.30: Änderung in der Grundwasserneubildung Szenarioperiode 3, Szenario A1B (Mittel der simulierten Werte für die Jahre 2071–2100, auf Basis von Klimadaten des Modells REMO minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961–1990)**



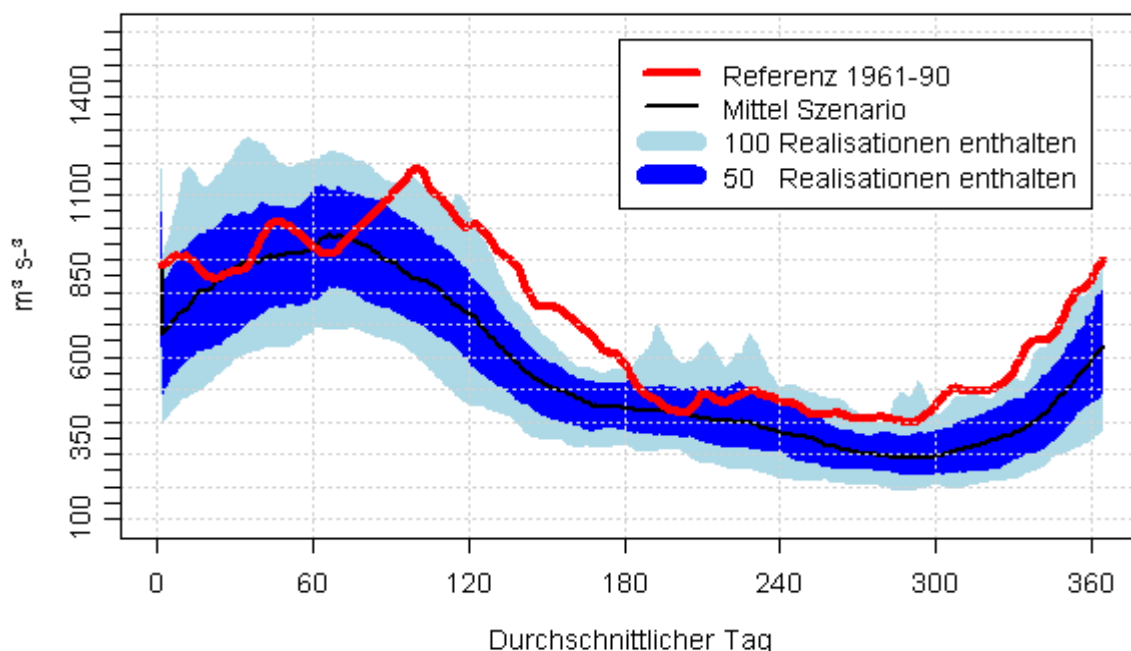
**Abb. 3.1.31: Änderung der Niederschläge, simuliert durch das regionale Klimamodell REMO**

Der Grund für die teilweise ansteigenden Abflüsse sind die ebenfalls relativ stark ansteigenden Niederschläge in den REMO-Szenarien. Abb. 3.1.31 zeigt den Trend in den Niederschlägen, aber im Gegensatz zu den Auswertungen im Klimawandelkapitel hier als Durchschnitt für das gesamte Elbeinzugsgebiet. Man sieht, dass die Niederschläge im

Durchschnitt um bis zu 70 mm steigen, besonders stark unter den Bedingungen des B1-Klimawandelszenarios.

### 3.1.4.4. Vergleich mit den Ergebnissen aus anderen Studien und Projektionen

Im Folgenden werden die bisher erlangten Ergebnisse noch mit Resultaten anderer Studien verglichen, insbesondere mit solchen aus dem Projekt GLOWA-Elbe, in welchem dasselbe hydrologische Modell (SWIM), aber ein anderes regionales Klimamodell (STAR, Orlowsky et al. 2008) angewandt wurde. Durch das statistische regionale Klimamodell STAR wurden im Projekt GLOWA 100 Realisationen des möglichen Klimawandels unter A1B-Szenarienbedingungen erstellt und dann ebenfalls durch SWIM in Änderungen der regionalen Abflussbildung transformiert. Abb. 3.1.32 stellt die Ergebnisse dar (Hattermann et al. 2008).



**Abb. 3.1.32: Änderung der mittleren Abflussbildung in der Elbe unter STAR-Szenariobedingungen (A1B) für den Zeitraum 2046-2055 (Hattermann et al. 2008)**

Es wird deutlich, dass auch unter den Szenarienbedingungen, wie sie durch STAR generiert werden, die geänderten Abflüsse ein ähnliches Verhalten wie unter WETTREG-Klimabedingungen zeigen: Die Abflussspitzen erscheinen früher im Jahr und die Abflüsse fallen dann im zeitigen Frühjahr schneller ab und steigen erst später im Herbst wieder an. Hier zeigt sich aber eine größere Bandbreite der zukünftigen Ergebnisse, da im Gegensatz zu den 20 Realisationen aus WETTREG in dieses Ergebnis 100 Realisationen aus STAR eingingen.

Karten der mit STAR ermittelten räumlichen Verteilung der Abflussspenden und deren Veränderung in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts sind im Anhang zu Kapitel 3.1 wiedergegeben; auch diese entsprechen weitgehend den mit WETTREG erhaltenen Verteilungen.

Eine weitere Untersuchung, die sich auf die Einzugsgebiete der Querne/Weida und der Wipper konzentriert (Wurbs 2005) kommt zu ähnlichen Ergebnissen: Die Abflussmittel im Szenarienzeitraum 2001–2050 sinken gegenüber der Referenzperiode 1951–2000 um bis zu zwei Dritteln und die Grundwasserneubildung geht um 82 % zurück. Diese Ergebnisse beruhen auf Klimaszenarien der Modelle STAR und MAGICC/SCENGEN, von denen letzteres dynamisches und statistisches Herunterskalieren globaler Klimatrends kombiniert. Der Autor hatte auch REMO in die Untersuchung einbezogen, beurteilt es aber als zu unsicher, um die damit gewonnenen Ergebnisse zu berücksichtigen.

Insgesamt werden also die Ergebnisse dieser Studie gestützt, soweit es die Aussagen bezogen auf die Klimafolgen, wie sie unter WETTREG-Klimaten generiert werden, betrifft.

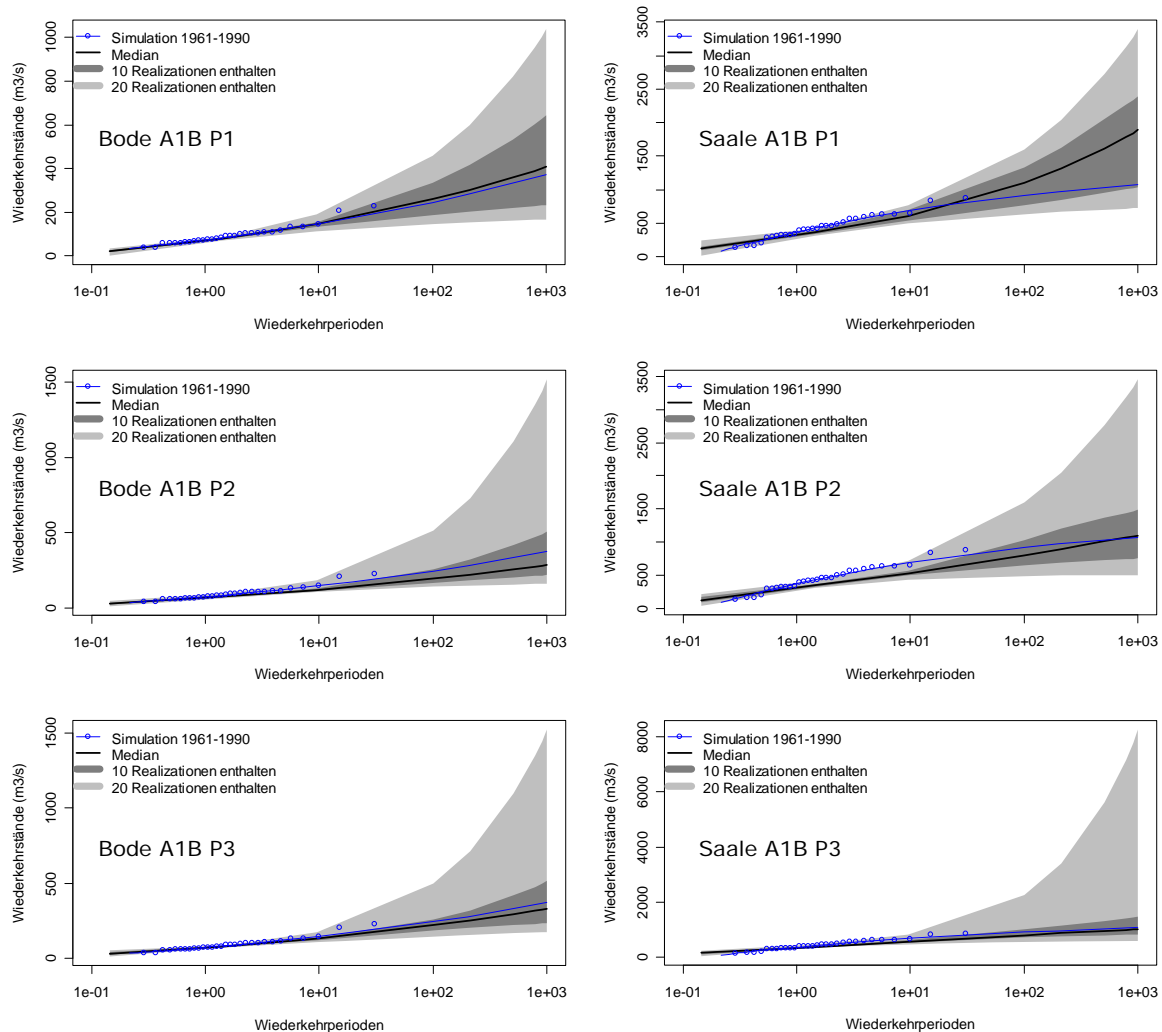
### **3.1.4.5. Klimafolgen für die Entwicklung von Hochwassern**

Für die Untersuchung der Entwicklung der Hochwasserabflüsse wurden die Wiederkehrintervalle für entsprechende Spitzenabflüsse unter WETTREG- und REMO-Klima für die drei Szenarienzeiträume im Vergleich mit den simulierten für die Jahre 1961–1990 verglichen. Es muss dabei angemerkt werden, dass das Modell nicht speziell für die beobachteten Hochwässer kalibriert wurde, da wiederum natürliche Abflüsse simuliert werden sollten, die Abflüsse an den bekannten Pegeln aber durch Talsperren beeinflusst sind (siehe Abflüsse der Bode am Pegel Hadmersleben). Auch für zukünftige Hochwässer ist das Speichermanagement unklar. Es können also nur relative Vergleiche gemacht werden. Außerdem ist insgesamt die Simulation von Niederschlägen noch immer eine unsichere Größe in den regionalen Klimamodellen. Dies gilt insbesondere für intensive oder starke Niederschlagsereignisse, die zur Generierung von Hochwässern führen.

Da durch das regionale Klimamodell WETTREG insgesamt 20 Realisationen pro Szenario gerechnet wurden, kann auch hier wieder die Spannweite der möglichen Entwicklung im Vergleich zum Referenzzeitraum abgebildet werden (s. Abb. 3.1.33). Es zeigt sich, dass für die erste Szenarienperiode in der Saale der Median der zukünftigen Hochwässer leicht über den für den Referenzzeitraum und den daraus extrapolierten liegt (diese Extrapolation erfolgte auf der Basis einer Generalisierten Extremwertverteilung).

Für die anderen Zeiträume ist kein starker Unterschied zwischen dem Median der Hochwässer für den Referenzzeitraum und der Szenarienperioden zu erkennen. Der hinterliegende Unsicherheitsbereich (grau in Abb. 3.1.33) zeigt aber eine deutliche Schiefe zu höheren Hochwasserspitzen unter Szenariobedingungen, und dies für die Saale besonders ausgeprägt in der dritten Szenarienperiode. Ebenfalls sehr auffällig ist der relative Anstieg der Unsicherheit mit steigendem Wiederkehrintervall der Hochwasser.

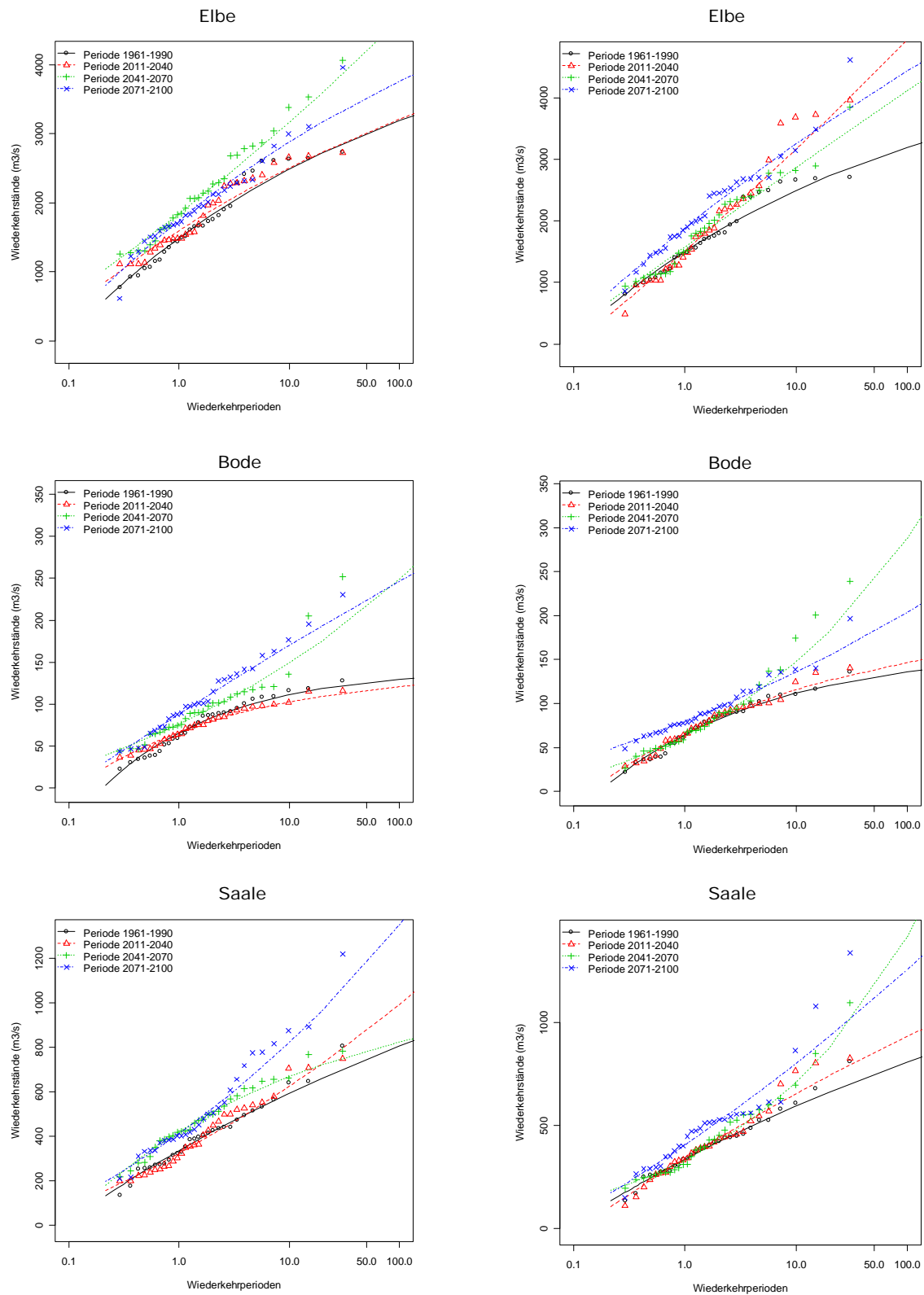
Für die Bode zeigt sich in der ersten Szenarienperiode kein starker Trend im Median der Spitzenabflüsse, und für die zweite und dritte Szenarienperiode zeigt sich kaum ein Unterschied zwischen Median und Referenz. Allerdings zeigt in der Bode in allen drei Szenarienperioden der im Hintergrund dargestellte Unsicherheitsraum eine starke Verschiebung zu höheren Abflusswerten. Für die Bode steigt wiederum die Unsicherheit mit größer werdendem Wiederkehrintervall.



**Abb. 3.1.33: Mögliche Entwicklung der Hochwässer für bestimmte Wiederkehrintervalle unter WETTREG-Klimaszenarien**

*Auf der linken Seite für die Bode und die drei Szenarienzeiträume, auf der rechten Seite entsprechend für die Saale*

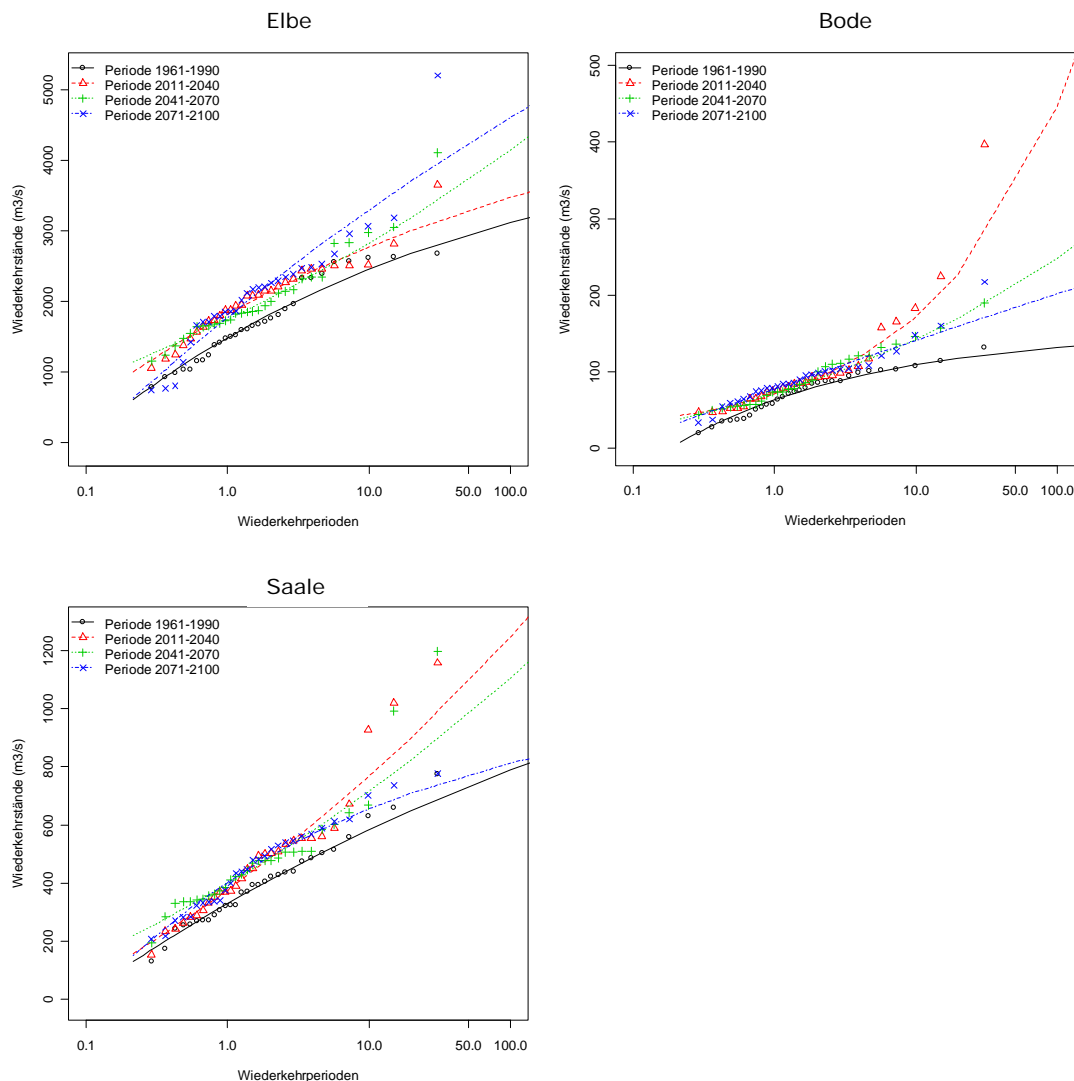
Die Ergebnisse für die Wiederkehrintervalle der Hochwasser unter REMO-Klima und für die verschiedenen Szenarien sind für die Elbe, Saale und Bode in Abb. 3.1.34 und Abb. 3.1.35 dargestellt. Die entsprechenden Auswertungen konnten auch für die Gesamtelbe gemacht werden, da die REMO-Szenarien im Gegensatz zu denen aus WETTREG auch den tschechischen Teil des Elbeinzugsgebietes mit einbezogen. Verschiedene Autoren argumentieren, dass dynamische Klimamodelle neue Hochwasserereignisse besser wiedergeben können als statistische (IPCC 2007).



**Abb. 3.1.34: Mögliche Entwicklung der Hochwasser für bestimmte Wiederkehrintervalle unter REMO-Klima (links Szenario A1B, rechts Szenario A2)**

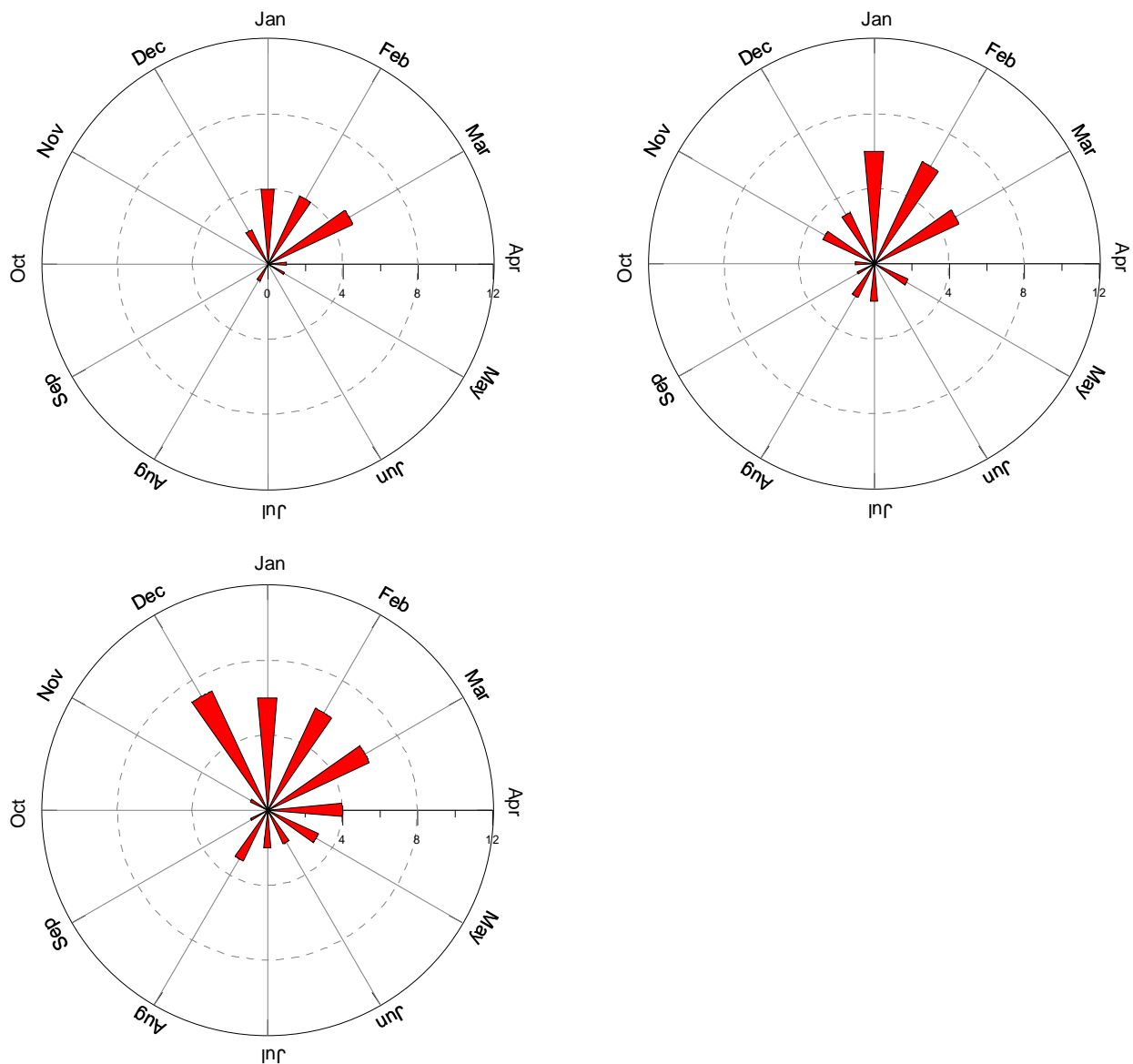


Es wird deutlich, dass die mittleren Hochwasser unter Szenarienbedingungen höher ausfallen als im Referenzzeitraum. Allerdings liegen die höchsten Hochwasser in der Elbe und Bode eher in der zweiten Szenarienperiode, während sie in der Saale in der dritten und damit letzten Periode am höchsten sind. Die Zunahme der mittleren Hochwasser spiegelt die Zunahme der Niederschläge unter REMO-Klimaten wieder (s. Kapitel 2.5.3.2 und Abb. 2.6.2). Besonders stark fällt die Zunahme der Hochwasser in der Bode und unter A1B-Klima aus, so dass unter diesen Szenarienbedingungen ein früheres 30-jähriges Hochwasser zu einem zukünftig 5-jährigen Hochwasser werden kann. Aber auch in der Elbe und der Saale könnten sich die Wiederkehrintervalle stark zu kürzeren Perioden verschieben. Es muss allerdings noch einmal betont werden, dass gerade kurzfristige Extremereignisse noch immer schwer durch die Klimamodelle reproduziert werden können, und damit die Unsicherheit der Ergebnisse hoch ist. Man kann also nur von generellen und nicht gut abgesicherten Trends sprechen.



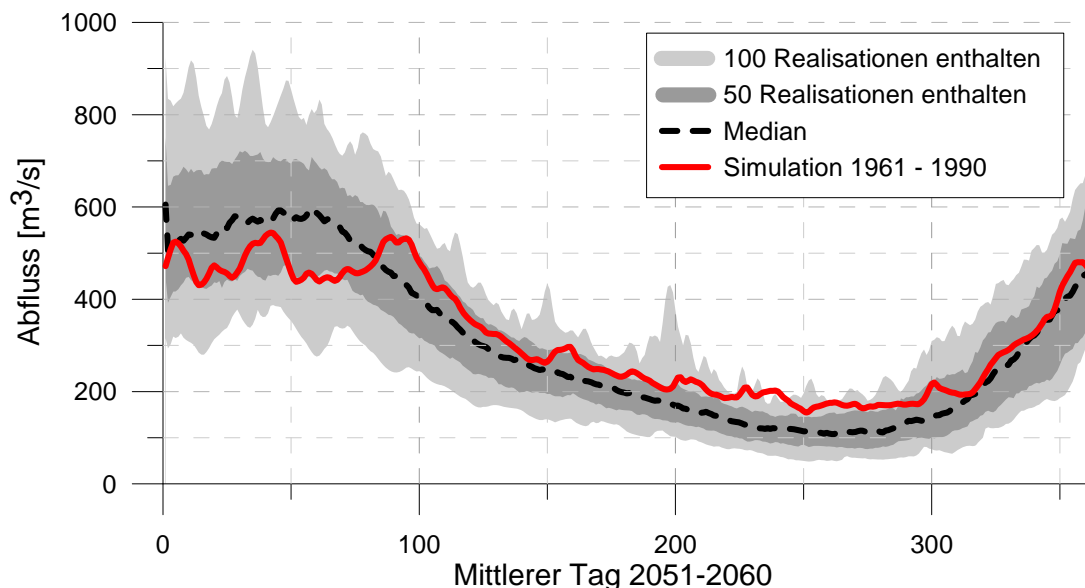
**Abb. 3.1.35:** Mögliche Entwicklung der Hochwasser für bestimmte Wiederkehrintervalle unter REMO-Klima (B1) in der Elbe, Bode und Saale

Abb. 3.1.36 zeigt das jahreszeitliche Auftreten der Hochwasser für drei Zeitscheiben (1951–2000, 2001–2050 und 2051–2100) und das A1B-Klima. Wie man deutlich sieht, verlagert sich das Maximum der Hochwasseraktivität immer früher in den Winter und dann sogar in den Dezember. Es ist hier fraglich, ob es eine so starke Verschiebung der Hochwasserspitzen geben wird. Allerdings hat es in der Vergangenheit häufigere Sturm und Hochwasserereignisse im Frühwinter gegeben, auch wenn es noch keinen signifikanten Trend gibt. Insgesamt müssen an diesem Punkt aber weitere Studien folgen, durch die gerade die Hochwasserproblematik besser untersucht werden muss.



**Abb. 3.1.36: Mögliche Entwicklung des jahreszeitlichen Auftretens der Hochwasser bestimmter Höhe unter dem Klima des Modells REMO (A1B) für die Periode 1951–2000 (oben links), 2001–2050 (oben rechts) und 2051–2100 (unten links).**

### 3.1.4.6. Projektionen für die Weser



**Abb. 3.1.37:** Änderung der mittleren Abflussbildung in der Weser unter STAR-Szenariobedingungen (A1B) für den Zeitraum 2046–2055 (Huang et al. 2009)

Abb. 3.1.37 zeigt die Änderungen in den Abflüssen, wie sie für die Weser am Pegel Intschede ebenfalls unter STAR-Klimaten durch SWIM simuliert werden (Huang et al. 2009). Man sieht, dass auch unter diesen Bedingungen eine Erhöhung des Abflusses im Winter und ein Rückgang im Sommer berechnet werden. Auch die Grundwasserneubildung im Sommer würde zurückgehen und damit der Grundwasserhaushalt belastet werden. Allerdings ist der Rückgang nicht so signifikant wie in der Elbe (s. Abb. 3.1.32). Dies stimmt mit der Beobachtung überein, dass im Westen Deutschlands die Niederschläge sogar zunehmen, während sie im Osten im Beobachtungszeitraum abnehmen. Die Weser liegt räumlich im Übergangsbereich dieser beiden Extreme.

Weiter kann man für Änderungen im Wasserhaushalt der Weser unter WETTREG-Klimaten im Analogieschluss annehmen, dass in der oberen Weser die Änderungen im Wasserhaushalt sehr ähnlich denen in der Bode verlaufen werden, während sie in der Aller ähnlich stark wie in der Altmark ausfallen würden.

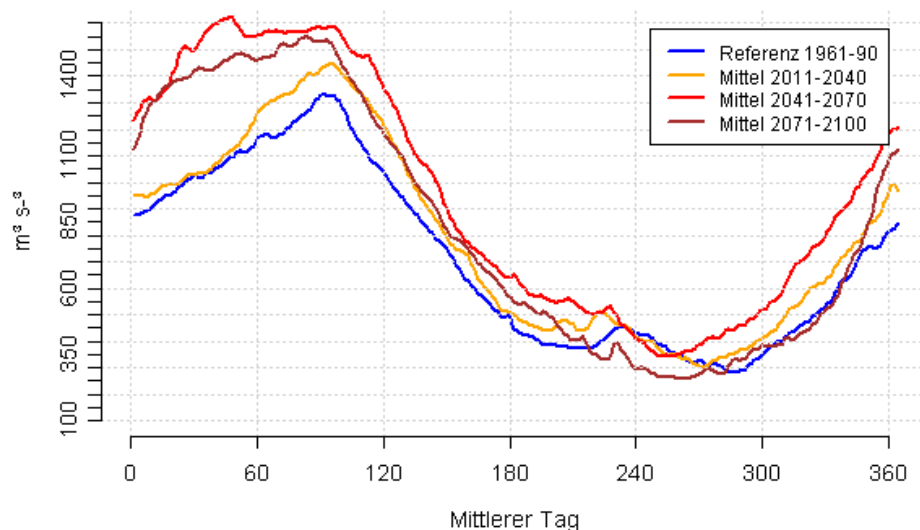
### 3.1.4.7. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf

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 Land Sachsen-Anhalt 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 Sachsen-Anhalt wichtigen Flüssen wie der Elbe und der Saale untersuchen zu können, musste deren gesamtes Einzugsgebiet, welches größtenteils nicht in Sachsen-Anhalt liegt, im Modell abgebildet werden. Das hatte zur Folge, dass auch überregionale Datenquellen für den Modellaufbau verwendet wurden, obwohl für Sachsen-Anhalt selbst teilweise Daten in besserer Auflösung vorhanden wären (z.B. die Bodenkarte). Die Kombination dieser Datenquellen hätte zu inkonsistenten Ergebnissen geführt. Es muss also beachtet werden, dass die in diesem Kapitel gemachten Aussagen immer für eine Region stehen, und keinesfalls als sehr lokale Planungsgrundlage dienen können.

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. Zur Simulation von Hochwasserereignissen, und hier insbesondere im Falle sogenannter Sturzfluten, welche durch sehr intensive Niederschläge in kurzer Zeit hervorgerufen werden, ist eine tägliche Auflösung der Niederschläge unzureichend. Überhaupt sind Aussagen zum Hochwasser schwer zu treffen, da diese per Definition sehr seltene Ereignisse sind und auch durch die regionalen Klimamodelle bisher nur unzureichend wiedergegeben werden können. Als relativ robustes Signal kann die Zunahme der kleinen und mittleren Hochwasser besonders im Winter gelten. Zu Hochwasserextremen kann keine Aussage gemacht werden.

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 die Ergebnisse entgegen, die mit REMO als Klimamodell errechnet wurden, wo zwar die Varianz der Abflüsse steigt, aber die Abflüsse im Sommer kaum oder gar nicht abnehmen. Hier muss gesagt werden, dass die Korrektur der REMO-Daten zwar mit der nötigen Sorgfalt und auch gemäß der in der Literatur dokumentierten Praxis durchgeführt wurde, aber es trotzdem zweifelhaft ist, ob die für die Vergangenheit errechneten Korrekturparameter für die Zukunft gelten.



**Abb. 3.1.38: Änderung der Abflüsse unter REMO-Klima (A1B) für die Elbe am Pegel Neu Darchau unter Berücksichtigung einer intensivierten Landwirtschaft**

Eine weitere Unsicherheit stellt die mögliche Entwicklung in der zukünftigen Landnutzung dar: Abb. 3.1.38 zeigt beispielhaft die Entwicklung der Abflüsse in der Elbe, falls die landwirtschaftliche Bearbeitung intensiviert wird. Unter Klimawandel wird es z.B. möglich, zweimal Ackerfrüchte im Jahr zu kultivieren. Dadurch wächst die Wasseraufnahme durch die Pflanzen. Unter diesen Bedingungen würden unter REMO-Klimaten die Abflüsse im Sommer nicht mehr steigen, sondern teilweise sogar fallen.

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 und wurden nur hier exemplarisch betrachtet. Insgesamt kann man sagen, dass die hier diskutierten Landnutzungsänderungen die Wasserressourcen im Sommer eher stärker beanspruchen würden und dadurch zu einer geringeren Grundwasserneue- und Abflussbildung führen würden.

### 3.1.5. 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 Sachsen-Anhalt 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 Sachsen-Anhalt wichtige Folgerungen ableiten:

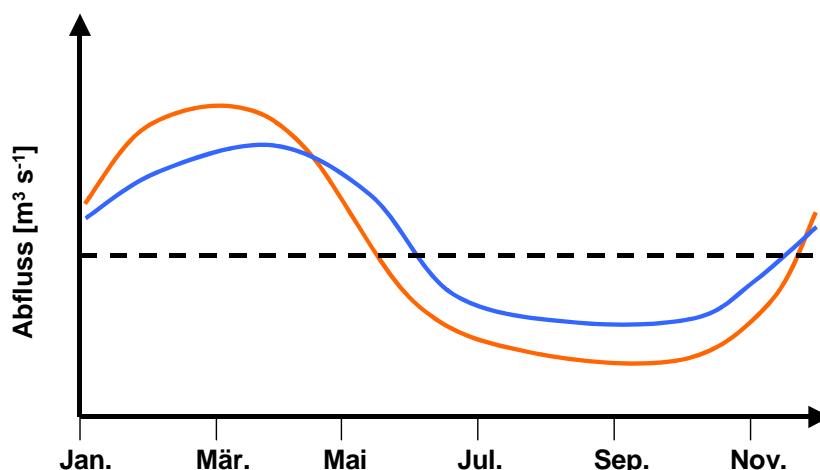
- Durch die steigenden Temperaturen wird die Evapotranspiration in Zukunft stimuliert, und zwar sowohl durch den direkten Energieinput, als auch durch die gesteigerte Vegetationsaktivität.
- Auch in Gebieten, in denen insgesamt der Niederschlag nicht abnimmt oder sogar leicht zunimmt, kann dadurch trotzdem 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 & Schellnhuber 2004). Auch die Niederschlagsintensität im Bereich des Südharzes ist im Beobachtungszeitraum gestiegen, allerdings muss auf weitergehende Analysen im Projekt ExUS (Extremwertuntersuchung Starkregen) verwiesen werden (s. Box 3.1.4).
- Durch die höhere Niederschlagsintensität kann es zu stärkeren Hochwassern kommen. Allerdings sind die Ergebnisse hierzu mit hoher Unsicherheit behaftet.
- Die Auswirkungen der REMO-Szenarien auf den Wasserhaushalt sind teilweise widersprüchlich zu denen der WETTREG-Szenarien, da durch die teilweise starke Niederschlagszunahme unter REMO-Randbedingungen die simulierten Abflüsse bis auf wenige Ausnahmen steigen.

Für die Analyse der Klimawandelfolgen auf die Wasserressourcen in Sachsen-Anhalt wurden die Ergebnisse zweier regionaler Klimamodelle, des statistischen Modells WETTREG und des dynamischen Modells REMO, als Randbedingung für den Klimawandel genutzt. Die zur Verfügung stehenden Klimaszenarien und deren Parameter (Temperatur und Niederschlag) sind in Kapitel 2.1–2.5 beschrieben. Beide gehen von einem weiteren Anstieg der Temperatur aus.

Abb. 3.1.39 zeigt schematisch die möglichen Änderungen im Abflussregime eines mittteleuropäischen Flusses unter Klimawandel, wie sie auch in Sachsen-Anhalt 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 orographischen Verhältnissen kann der Winterabfluss durch die frühere Schneeschmelze insgesamt ansteigen, was einen Anstieg der kleinen bis mittleren Hochwasser zur Folge haben würde. Dies ist z.B. deutlich im Abfluss der Bode zu beobachten. Danach fällt der Abfluss relativ schnell, da der Schneespeicher aufgezehrt ist.



**Abb. 3.1.39: 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 Saale 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 für Sachsen-Anhalt projiziert werden, der Hydrograph für die Zukunft insgesamt zu höheren Abflüssen verschoben werden.

**Box 3.1.2: 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 Sachsen-Anhalt 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 deshalb 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.

### 3.1.6. 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 WETTREG und 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 früherer 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 Saaleeinzugsgebiet in einigen Gebieten verbunden mit deutlich häufigeren Niedrigwasserereignissen im Sommer bis in den frühen Herbst hinein.
- Abnahme der Grundwasserneubildung und des Gesamtabflusses in den Leelagen des Harzes.
- Die Entwicklung der Hochwasserspitzen ist unsicher, es zeigen sich aber Tendenzen zu höheren Abflussmengen und kürzere Wiederkehrintervalle für kleine und mittlere Hochwasser.

Verschiedene Maßnahmen zur Anpassung der Wasserwirtschaft an die oben gelisteten Folgen des Klimawandels werden international (Leipprand et al. 2008) und national (siehe MUNLV 2007) diskutiert. Auch für Sachsen-Anhalt gibt es entsprechende Dokumente (MLU 2009). 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 ist dabei, dass:

- i) die verschiedenen Akteure und Maßnahmen in ein Gesamtkonzept integriert werden, welches
- ii) auch über staatliche Grenzen hinaus auf eine Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes oder einer gesamten Region abzielt.

Eine solche integrierte Betrachtung auf überregionaler Einzugsgebietsebene wird z.B. durch die europäische Wasserrahmenlinie und die europäische Hochwassermanagementrichtlinie gefordert. Zur Formulierung einer weitergehenden Sachsen-Anhalt-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 umgestellt werden, sobald sich diese als robus-

te 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 die Generierung von Hochwasser eindämmen und darüber hinaus helfen, Trockenperioden entgegenzuwirken. Flächenentsiegelung könnte dazu beitragen, eine zu schnelle Konzentration von Abflüssen bei Starkregenereignissen zu verhindern. Sie unterstützt die Infiltration von Wasser und damit die Sickerwasserbildung. Es kommt zu einer höheren Grundwasserneubildung. Zusätzliche Außenbereiche 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 Saale, 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 3.1.4).

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 3.1.4) und „ExUS – Extremwertuntersuchung Starkregen zu erwarten, s. Box 3.1.4). 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 3.1.4 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.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die größten Änderungen und damit der größte Anpassungsdruck gemäß der Szenarienergebnisse räumlich in den Leelagen der Mittelgebirge und für Sachsen-Anhalt insbesondere des Harzes entsteht. Im Rahmen von möglichen Anpassungsoptionen kann nach eher technisch als auch eher infrastrukturell orientierten Maßnahmen unterschieden werden. Eine technische Anpassungsmöglichkeit sind z.B. mobile Schutzwände gegen Hochwasser, dagegen wäre eine infrastrukturelle Maßnahme die Verbesserung der Hochwasservorhersage. In Box 3.1.3 sind die wichtigsten technischen und infrastrukturellen Maßnahmen aufgelistet.

#### *Box 3.1.3: Anpassungsempfehlungen zum Wassersektor*

Technische Maßnahmen und infrastrukturelle Managementstrategien zur Anpassung an den Klimawandel (Leipprand et al. 2008)

##### **Hochwasservorsorge**

- technischer Hochwasserschutz (z.B. Deicherhöhung, Speicherbecken, Abflussmanagement, Anpassungen in den kommunalen Kanalnetzen etc.)
- Erhöhung des landschaftlichen Rückhalts und Schaffung von Retentionsflächen (z.B. Reaktivierung von Überflutungsgebieten (Auen, Altarme), Erhöhung der Infiltrationskapazität der Oberböden durch angepasste Landnutzung)
- Einschränkung der Besiedlung in Gefahrengebieten
- Baurecht allgemein (z.B. in Bezug auf Oberflächenversiegelung, Begrünung etc.)
- Verbesserung von Vorhersage und Informationsmanagement
- Verbesserung und Anpassung von Versicherungsangeboten
- Einzugsgebietsweites Management von Hochwasserereignissen

##### **Vorsorge gegen Niedrigwasser und Dürre**

- Technische Maßnahmen zur Stützung des Mindestabflusses und zur Schadensminderung in Dürreperioden (z.B. Speichermanagement auf unterschiedlichen Skalen, künstliche Grundwasseranreicherung, Wassertransfers etc.)
- Weitere Effizienzsteigerung in der Wassernutzung (z.B. Modernisierung von Rohrnetzen, Wiedernutzung von Brauchwasser, effizientere Bewässerungsmethoden etc.)
- Ökonomische Anreize (z.B. über die Wasserpreise)
- Einschränkung der Wassernutzung
- Maßnahmen in der Landschaftsplanung und im Landnutzungsmanagement (z.B. Waldumbau, Entsiegelung)
- Verbesserung des Monitorings, der mittelfristigen Vorhersage und der Informationsweitergabe
- Verbesserung und Implementierung von Versicherungsmodellen
- Vernetztes Management wasserbezogener Nutzungen und Sektoren übergreifendes Management

##### **Generelle Empfehlungen**

- Steigerung des Bewusstseins für Klimafolgen, Informationskampagnen
- Bildung finanzieller Rücklagen
- Einbeziehung des Klimawandels und dessen Folgen auf den Wasserhaushalt in die einzugsgebietsweiten Bewirtschaftungspläne der Wasserrahmenrichtlinie und der Hochwassermanagementrichtlinie

*Box 3.1.4: 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 (Hattungen) 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)

### 3.1.7. 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." 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. 987 S.
- 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* 53(3): 519-537.
- 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).  
[http://www.climate-water-adaptation-berlin2007.org/documents/Climate\\_water\\_report\\_final\\_for\\_website.pdf](http://www.climate-water-adaptation-berlin2007.org/documents/Climate_water_report_final_for_website.pdf).
- MLU (2009): "Entwurf der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel." Fach- und ressortübergreifende Arbeitsgruppe „Anpassung an den Klimawandel". Magdeburg, Ministerium für Landwirtschaft Umwelt Sachsen-Anhalt (MLU). 81 S.
- Orlowsky, B., F.-W. Gerstengarbe und P. Werner (2008): "A resampling scheme for 348 regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM." *Theoretical and Applied Climatology* 92: 209-223.
- 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., Espíñeira, 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.
- Wechsung, F., F. W. Gerstengarbe, P. Lasch und A. Lüttger (Hrsg.) (2009): "Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel." PIK-Report. PIK. Potsdam. 93 S.
- 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." 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.

## 3.2. Boden

### Kernaussagen

- Der Klimawandel kann Standortbedingungen wie Bodentemperatur und Bodenwasserhaushalt verändern. Davon abhängige Bodenfunktionen und -prozesse sowie das Ökosystem und die Stoffkreisläufe des Bodens werden damit beeinflusst. Bodenorganismen sind relevant für die Bodenqualität durch die Lockerung und Durchmischung des Bodens, die Zersetzung von organischer Substanz und damit der Nährstoffmobilisierung.
- Veränderungen des Bodenkohlenstoffkreislaufs wirken sich durch zusätzliche Bindung oder Freisetzung von Kohlenstoffdioxid im Klimaschutz und durch Veränderung der Bodeneigenschaften in den Klimafolgen aus.
- Beeinträchtigungen der Bodenqualität, beispielsweise ein Rückgang des pflanzenverfügbaren Bodenwassers, beeinflussen das Pflanzenwachstum, was sich negativ auf die Erträge Land- und Forstwirtschaft sowie feuchtesensitive Lebensräume, wie Moore und Feuchtbiopte, auswirken kann.
- Wasser- und Winderosion stellen eine potenzielle Gefährdung für Böden dar. Das Gefährdungsmaß ist u.a. abhängig von den Bodeneigenschaften, der Orographie sowie klimatischen Rahmenbedingungen.
- Starkniederschlagsereignisse begünstigen die Wassererosion. Die Tage mit Starkniederschlag im Jahr zeigen für die Zukunft einen leicht zunehmenden Trend. Dadurch steigt das Wassererosionsrisiko gegenüber dem Status quo. Von dieser Entwicklung besonders betroffen sind die Bodenregionen der Paläozoischen Mittelgebirge und Bergländer sowie Mesozoische Berg- und Hügelländer mit Löss.
- Das Winderosionsrisiko wird durch trockene Bedingungen, Wind und sensitive Bodenarten gefördert. Innerhalb des Jahres sind die Ackerflächen in Sachsen-Anhalt vor allem im Dezember-Januar, Mai-Juli sowie im September-Oktober, bei fehlender schützender Vegetationsbedeckung potentiell gefährdet. Die Gefährdung der Ackerflächen durch Winderosion ist vor allem in den Altmoränenlandschaften sowie Regionen der Löss- und Sandlösslandschaften mittel bis sehr hoch.

Der Boden ist definiert als „[...] die obere Schicht der Erdkruste, [...] einschließlich der flüssigen-Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten.“ (BBodSchG<sup>1</sup>, §2, Abs. 1). Somit umfasst er einen großen Teil der gesamten Erdoberfläche und ist von Relevanz für verschiedenste anthropogene und natürliche Systeme. Er entsteht durch die Wechselwirkung von physikochemischer Verwitterung und der Aktivität der Bodenflora und -fauna (Scheffer & Schachtschabel 2002). Darüber hinaus erfüllen Böden verschiedene wichtige natürliche Funktionen (BBodSchG 1998, §2, Abs.2), deren Erhalt von großer Bedeutung ist. Mögliche nega-

<sup>1</sup> "Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214) geändert worden ist", Stand: Zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 9.12.2004 I 3214, <http://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/>

tive Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenfunktionen und -qualität können deshalb weitreichende Folgen für natürliche und anthropogene Systeme haben. Der Boden und seine Funktionen können jedoch nicht nur vom Klimawandel beeinträchtigt werden, sondern der Boden ist als weltweit zweitgrößter Kohlenstoffspeicher selbst ein zentraler Faktor im Klimaschutz. In den Böden der EU 27 sind ca. 75 Mrd. Tonnen Kohlenstoff gespeichert, demgegenüber betrug die Kohlenstoffemission der EU 27 in 2006 nur ca. 1,5 Mrd. Tonnen (Schils et al. 2008). Global gesehen werden ca. 1/3 aller anthropogen emittierten Treibhausgase durch Landnutzungsänderungen (z.B. Abholzung, landwirtschaftliche Produktionsmethoden) bedingt.

Schulp et al. (2008) untersuchten die europaweiten Veränderungen der Kohlenstoffvorräte vor dem Hintergrund des Landnutzungswandels basierend auf den IPCC SRES Szenarien A2, A1, B1 und B2. Ihren Ergebnissen nach wird die terrestrische Biosphäre der EU 27 in 2030 zwischen 90 und 111 Tg<sup>2</sup> C year<sup>-1</sup> binden, entsprechend 6,5-8% der projizierten anthropogenen Emissionen. Unterschiede in der Veränderung der Größe der Kohlenstoffsinken zwischen den Szenarien weisen auf die Bedeutung des Landnutzungswandels für die zukünftige Kohlenstoffbindung in der terrestrischen Biosphäre hin. Unter unveränderter Landnutzung werden die Raten der Kohlenstoffbindung in 2030 um 4 % im Vergleich zu 2000 sinken. Unter dem Landnutzungswandel des Szenarios A2 wird diese Rate um weitere 2 % zurückgehen. (Die Thematik Kohlenstoffhaushalt der Böden und Klimawandel wird im Kapitel 3.2.1.3 ausführlicher besprochen.)

Die Wechselwirkungen zwischen dem Klimawandel und Veränderungen in den Böden sind komplex und Gegenstand von Untersuchungen, welche zumeist eher qualitative als quantitative Aussagen ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen jedoch bereits auf, dass der Klimawandel einen Einfluss auf die Böden haben wird (Swift et al. 1998; Ayres et al. 2008; Schils et al. 2008). Die Richtung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenfunktionen und Bodenorganismen eines spezifischen Bodenstandortes auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse ist schwierig abzuschätzen, da die regionalen und lokalen Prozesse noch unzureichend bekannt sind (Yadav & Malanson 2007). Hinzu kommen Unsicherheiten der Klimaprojektionen und Wechselwirkungen von bodenbeeinflussenden Faktoren, einschließlich des menschlichen Verhaltens. Untersuchungen zur Klärung der Zusammenhänge zwischen Boden und Klimawandel als Grundlage für zielgerichtetes Handeln sind jedoch in den vergangenen Jahren vermehrt durchgeführt worden und Gegenstand von Forschungsprogrammen.

Schröter et al. (2005) diskutieren eine Veränderung des organischen Bodenkohlenstoffs in der EU zwischen 1990 und 2080 von bis zu - 5,9 Tg 10<sup>3</sup> C für Ackerflächen, von + 1,5 bis - 2,8 Tg 10<sup>3</sup> C für Grassland sowie von + 0,7 bis - 3,6 Tg 10<sup>3</sup> C für Wälder. Des Weiteren sind einzelne Beziehungen zwischen klimatischen Bedingungen und Bodenverhältnissen bereits gut erforscht und können regional angewandt werden. So hängt die Wind- und Wassererosion maßgeblich von der Bodenfeuchte und den Wind- bzw. Niederschlagsbedingungen ab (Scheffer & Schachtschabel 2002).

Im folgenden Kapitel wird zunächst ein Überblick über die Wechselwirkungen von Böden und Klima gegeben. Nach der Einführung der sektorübergreifenden Relevanz von Böden wird der Stand der Forschung bezüglich der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenfunktionen und Bodenorganismen dargelegt sowie die komplexe Beziehung

<sup>2</sup> 1 Terragramm (10<sup>12</sup> Gramm bzw. 10<sup>6</sup> Tonnen) Kohlenstoff pro Jahr





zwischen Bodenkohlenstoffhaushalt und Klimaveränderungen erläutert. Auf diesen allgemeinen Überblick folgt eine detaillierte Analyse der möglichen Auswirkungen von veränderten Klimabedingungen auf die Wind- und Wassererosion in Sachsen-Anhalt.

### **3.2.1. Wechselwirkungen von Böden und Klima**

#### **3.2.1.1. Sektorübergreifende Relevanz des Bodens**

Boden und Bodenqualität sind von hoher sektorübergreifender Relevanz und grundsätzlich ein wesentlicher bestimmender Faktor für Wasser-, Land- und Forstwirtschaft (vgl. Kap. 3.1, 3.3 und 3.4). Auf veränderte Klimabedingungen zurückzuführende Beeinträchtigungen der Bodenqualität können negative Auswirkungen auf diese Wirtschaftsbereiche haben. Beispielsweise kann der Anstieg der Hochwassergefahr durch Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr die abflussregulierende Wirkung des Bodens übersteigen, sodass Siedlungs- und Landwirtschaftsflächen von Hochwasser betroffen sind (UBA 2008). Darüber hinaus beeinflussen Trockenphasen den Bodenwasserhaushalt (Jasper et al. 2006; Holsten et al. 2009; MLU 2009), was Pflanzenwachstum (Lindroth et al. 1998), und damit landwirtschaftliche Erträge, sowie die Grundwasserneubildung verringern kann.

Dem Naturschutz kommt beim Erhalt von Bodenfunktionen eine große Bedeutung zu. Zum Beispiel kann die Sicherstellung einer Vegetationsbedeckung als Schutz der obersten Bodenschicht vor Witterungseinflüssen, den Bodenabtrag und Nährstoffverluste vermindern sowie eine Abnahme der Wasserspeicherkapazität durch Verfestigung und Verkrustung der Bodenoberfläche, und damit negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum und die Erträge, verringern (Schlesinger et al. 1990; Oldeman et al. 1991; Oldeman 1992).

#### **3.2.1.2. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenfunktionen und Bodenorganismen**

Böden erfüllen wichtige Funktionen, wie die Lebensraumfunktion (z.B. für Menschen und Bodenorganismen), die Regelungsfunktion (z.B. als Abbau- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen), oder die Nutzungsfunktion (z.B. Bereitstellung von Flächen für Siedlung, Erholung, Land- und Forstwirtschaft) (BBodSchG 1998, §2, Abs.2).

Bodenfunktionen werden von einer Reihe von Faktoren beeinflusst, bei denen die klimatischen Bedingungen eine wesentliche Rolle spielen (Scheffer & Schachtschabel 2002). Da Bodenprozesse stark von der Temperatur und der Wasserverfügbarkeit abhängig sind, können veränderte Klimabedingungen bedeutende Auswirkungen auf Bodenprozesse und -funktionen haben (Blum 2005; Nortcliff 2009).

Die Erhöhung der Temperatur und die veränderte Niederschlagsverteilung können sich auch auf die Regelungsfunktion des Bodens, z.B. auf den Wasser-, Nähr- und Schadstoffhaushalt in Böden auswirken (z.B. verstärkte Stoffauswaschung und Wassererosion) (UBA 2008). Insgesamt sind steigende Temperaturen (vgl. Kap. 2.4) relevant für die Bodenfeuchte. Simulationen des Elbeinzugsgebiets in Brandenburg (Holsten et al. 2009) und in Kleineinzugsgebieten Sachsen-Anhalts (Wurbs 2005) zeigen beispielsweise, dass im Zusammenhang mit dem Klimawandel deutliche Rückgänge des verfügbaren Bodenwassers in den nächsten Jahrzehnten zu erwarten sind. Neben negativen Auswirkungen

auf das Pflanzenwachstum kann verringerte Bodenfeuchte außerdem sommerliche Hitze-  
wellen durch Reduzierung der Evapotranspiration und latenten Kühlung verstärken  
(Brabson et al. 2005; Fischer et al. 2007).

Die Bereitstellung von Wasser für das Pflanzenwachstum zählt zu den wichtigen Funktio-  
nen des Bodens. Höhere Temperaturen können die Pflanzenaktivität steigern, was zu ei-  
ner verstärkten Evapotranspiration führt. Infolgedessen kann es auch in Regionen mit  
projizierten Niederschlagszunahmen zu einem sinkenden Wasserdargebot kommen, wenn  
die Zunahme der Evapotranspiration die des Niederschlages übersteigt (Hattermann et  
al. 2007). Durch verstärkte Nährstoffauswaschung aufgrund höherer Niederschlagssum-  
men, zunehmender Wassererosion durch häufigere Starkniederschläge und sinkende Bo-  
denfeuchte sind weitere wesentliche Bodenfunktionen potenziell durch den Klimawandel  
gefährdet (Blum 2005). Aussagen über Richtung und Intensität dieser Einflüsse des Kli-  
mawandels lassen sich jedoch für die regionale Ebene nicht verallgemeinernd treffen. Im  
Regionalen müssen die verschiedenen Böden, ihre Prozesse und Bestandteile, das regio-  
nale Klima vor Ort und die anthropogenen Nutzungen eingehender betrachtet werden  
(Blum 2005).

Der Boden ist einer der vielfältigsten Lebensräume und eines der wertvollsten Reservoirs  
für die Biodiversität. In der obersten Bodenschicht kommen die meisten Bodenorganis-  
men sowohl in der Arten- als auch in der Individuenzahl vor, beispielsweise Bakterien,  
Actinomyceten, Pilze und Regenwürmer (Breure 2004; Blum 2005; Gardi et al. 2009).  
Diese Bodenorganismen spielen eine wesentliche Rolle bei der Entstehung und Bewah-  
rung der Bodenqualität, beispielsweise durch die Auflockerung und Durchmischung von  
Böden, die die Wasserleitfähigkeit und -speicherkapazität unterstützt (Dunger 1998).  
Gleichzeitig beeinflussen die Bodenorganismen durch ihre Düngewirkung maßgeblich das  
Nährstoffangebot (Pieper & Weigmann 2009; Roithmeier & Pieper 2009). Für das Vor-  
kommen und die Leistung der Bodenorganismen sind standortspezifische Bedingungen  
wie Bodentyp, Bodendichte, Bodenluft, Bodenfeuchtigkeit, Bodentemperatur, Boden-pH-  
Wert sowie Mikroorganismen und Pflanzenreste oder Bodenbearbeitung und Fruchtfolge  
entscheidend (Larink & Schrader 2003; Jopp & Pieper 2008; Roithmeier & Pieper 2009).  
Folglich sind Bodenorganismen und die durch sie beeinflussten Bodenfunktionen durch  
Veränderungen der Umweltbedingungen beeinflussbar und potentiell gefährdet (Gardi et  
al. 2009). Der Klimawandel kann die Standortbedingungen wie Bodenfeuchte und Boden-  
temperatur beeinflussen, so dass die Biodiversität der Bodenorganismen durch den Kli-  
mawandel aufgrund von Erwärmung und zunehmender Trockenheit gefährdet sein kann  
(Ruess et al. 1999; Blum 2005). Dies kann durch die enge Verknüpfung von Ökosystem-  
funktionen mit Bodenorganismen (Gardi et al. 2009) wiederum Auswirkungen auf die  
grundlegenden Bodenfunktionen haben. Insgesamt sind Bodenorganismen und ihre Re-  
aktionen auf klimatische Stimuli noch unzureichend erforscht (Fitter et al. 2000; Yadav &  
Malanson 2007). Nach Weigel et al. (2006) gibt es jedoch Hinweise darauf, dass Spring-  
schwänze (*Collembola*) und Kleinringelwürmer (*Enchytraeidae*) in Agrarökosystemen in  
ihrer Leistung und Artenvielfalt durch eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen positiv be-  
einflusst werden könnten. Ursache hierfür könnte ein durch CO<sub>2</sub>-Düngung stimuliertes  
Wurzelwachstum sowie eine Erhöhung der Bodenfeuchte sein (Wardle et al. 1998). Für

andere Organismen, wie z.B. Bakterien, Pilze und Mikroorganismen könnten Klimaveränderungen jedoch negative Auswirkungen haben (Ruess et al. 1999).

### **3.2.1.3. Mögliche Veränderungen des Kohlenstoffhaushaltes von Böden unter Klimawandel**

Bezüglich der Größe der Veränderungen der Kohlenstoffbestände im Boden bestehen große Unsicherheiten, so dass die Angabe einer jährlichen Kohlenstoffakkumulation in den Böden der EU von 1-100 Mio. Tonnen lediglich eine Schätzung ist (EC 2009; EC 2009). Die Kohlenstoffbilanz im Boden ist ebenfalls sowohl für die Vergangenheit (Van-Camp et al. 2004; Schils et al. 2008) als auch für die Zukunft in Europa noch nicht vollständig geklärt (Fang & Moncrieff 2001; Smith et al. 2005; Schaphoff et al. 2006; IPCC 2007).

Die Wechselbeziehung zwischen klimarelevanten Gasen wie das  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2\text{O}$  und der Ressource Boden ist sehr eng, so dass diese durch die Freisetzung oder Bindung dieser Gase beispielsweise in bzw. aus organischer Bodensubstanz Einfluss auf das Klima hat (Billen & Angenendt 2008). Organische Bodensubstanz spielt eine essentielle Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf, denn 80% der terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte (Schimel et al. 1994) sind in Böden, insbesondere Feuchtgebieten, gebunden. Etwa ein Sechstel der Kohlendioxidmenge, die sich in der Luft befindet, passiert die Ökosysteme jedes Jahr. Daher kann die Veränderung des Verhältnisses zwischen Photosynthese und Respiration signifikante Schwankungen des Kohlenstoffdioxidgehalts in der Atmosphäre hervorrufen (Trumbore 2006). Bei konstanter Vegetation existiert ein Gleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz. Daher stellt sich ein charakteristischer, den Umweltbedingungen entsprechender Humusgehalt ein (Scheffer & Schachtschabel 2002). Umweltveränderungen, wie die Klimaerwärmung, führen zu einer Veränderung dieses Gleichgewichts und Böden können dann verstärkt entweder als Kohlenstoffquelle oder -senke wirken (Van-Camp et al. 2004).

Eine Veränderung des globalen Kohlenstoffkreislaufs unter den Bedingungen des Klimawandel gilt als wahrscheinlich (IPCC 2007; Schils et al. 2008). Schulp et al. (2008) und Schröter et al. (2005) diskutieren Rückgänge der Kohlenstoffbindung, angetrieben von Landnutzungs- und Klimawandel. So verstärkt bei ausreichender Bodenfeuchte ein Anstieg der Bodentemperatur die heterotrophe Respiration<sup>3</sup> (Schlesinger & Andrews 2000; Ninisto et al. 2004; Davidson & Janssens 2006) (Kap. 3.4.2.7.). Sinkende Niederschläge und eine damit abnehmende klimatische Wasserbilanz könnten diese Wirkungsbeziehung abschwächen. Zudem kann sich mit steigendem  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre die Nettoprimärproduktion (Schaphoff et al. 2006) und damit die Menge der anfallenden organischen Reste erhöhen (IPCC 2007; Schils et al. 2008). (vgl. Kap. 3.4.2.7.). Allerdings führt ein höheres Kohlenstoffangebot durch die steigende Nettoprimärproduktion wiederum zu verstärkter Bodenrespiration (Mosier 1998). Analysen des Einflusses des Klima-

---

<sup>3</sup> Organismen können hinsichtlich des Energie- und Stoffwechsels u.a. anhand der Kohlenstoffquelle klassifiziert werden. Die heterotrophe Bodenatmung (heterotrophe Respiration) wird durch heterotrophe Bodenmikroorganismen, z.B. die meisten Bakterien, verursacht. Sie verwenden zur Energiegewinnung organische Stoffe, z.B. Pflanzenreste, welche sie zersetzen. Während dieses Abbaus wird aufgrund der Atmung der Bodenorganismen ein Teil des organisch gebundenen Kohlenstoffdioxids wieder an die Atmosphäre abgegeben. (Kuntze et al. 1994a; Bick 1999)

wandels und des Landnutzungswandels auf die Bodenkohlenstoffgehalte in Europa zeigen folgende Tendenzen. Die Trockenlegung von Mooren ist die Hauptursache für die Verluste des Bodenkohlenstoffes (ca. 20-40 Tonnen pro Hektar und Jahr) und kann zur Degradation und Verlusten des Bodens führen (EC 2009; EEA 2009). Während Forstböden eher als Kohlenstoffsенke fungieren sowie Ackerland als -quelle, können Graslandböden unter Klimawandel einen leichten Kohlenstoffgewinn in Europa verzeichnen (Schils et al. 2008). Ein besseres Verständnis der Folgen des Klimawandels und der Landnutzungsänderung auf den Bodenkohlenstoffgehalt ist Voraussetzung für ein gezieltes Management zur Erhaltung der Bödenfunktionen und des Klimaschutzes. Bereits deutlich ist das Erfordernis der Erhaltung vorhandener Kohlenstoffsенken in Mooren und anderen Böden mit hohem Kohlenstoffgehalt zum Schutz des Klimas und zur Erhaltung der Wasser- und Nährstoffspeicher in diesen Böden (EEA 2009).

Der potentielle Kohlenstoffverlust wurde im Raum Sachsen-Anhalt analysiert und im europäischen Vergleich als mittel (Endmoränenlandschaften) bzw. gering (Harzvorland) eingestuft (Stolbovoy et al. 2008). Der organische Kohlenstoffgehalt der Acker- bzw. Graslandböden im Tiefland Sachsen-Anhalts könnte zwischen 1990 und 2080 allein anhand der klimatischen Änderung um mehrere  $\text{t C ha}^{-1}$  sinken. (Post et al. 2008) schätzt in seiner Klimawandel-Modellstudie den Anstieg des Kohlenstoffflusses in die Atmosphäre ausgehend von Ackerböden im Einzugsgebiet der Elbe auf zusätzliche  $40 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  für den Zeitraum bis 2055. Steigende Nettoprimärproduktion und technologischer Fortschritt könnte dieser Entwicklung entgegenwirken (Smith et al. 2005). Für die untersuchten Waldstandorte ergaben die Analysen dieser Studie (Kapitel 3.4.2.7), dass unter dem Einfluss des Klimawandels für die meisten von Fichten und Kiefern dominierten Regionen in den nächsten Jahrzehnten mit einem Anstieg der ober- und unterirdischen Kohlenstoffspeicherung zu rechnen ist, während Rückgänge für Buchenbestände simuliert wurden. Abschließend ist festzuhalten, dass der Klimawandel die Kohlenstoffvorräte der Böden auf längere Sicht beeinflusst, kurzfristig gesehen hat er jedoch weniger Auswirkungen als Landnutzung, Landnutzungswandel oder Bodenmanagement. Aufgrund des großen  $\text{CO}_2$ -Austausches zwischen der Atmosphäre und den Bodenkohlenstoffvorräten könnten bereits geringe Veränderungen als Folge von Landnutzung, Landnutzungswandel, Bodenmanagement und Klima zu signifikanten Auswirkungen auf das Klima führen (EC 2009). Andererseits kann ein gezieltes Management der genannten Einflussfaktoren Bödenfunktionen stabilisieren und negative Auswirkungen auf das Klima eindämmen oder verhindern.

### **3.2.2. Abschätzung der potenziellen Bodenerosionsgefährdung durch den Klimawandel**

Erosion bezeichnet „die Ablösung und den (Ab-)transport von Bodenteilchen von der Bodenoberfläche“, die Transportmedien hierfür sind Wasser und Wind (Scheffer & Schachtschabel 2002). Bereits heute sind die Böden in Sachsen-Anhalt Erosionsprozessen ausgesetzt (Helbig 2008). Durch den Klimawandel könnten sich jedoch spezifische, bereits existierende Erosionsprozesse verstärken. Die potenzielle Gefährdung der Böden durch Wasser- und Winderosion hängt unter anderem ab von:

- Bodeneigenschaften (insb. strukturschwache, schluffige und feinsandige Böden sind gefährdet),
- den orographischen Gegebenheiten (z.B. Hangneigung)
- der Bodenbearbeitung (z.B. Bearbeitung mit oder ohne Pflug)
- dem Klima (z.B. insb. Starkniederschlag, Trockenheit und Windbedingungen) (Scheffer & Schachtschabel 2002).

Die Bodenerosion tritt dabei am Ort des Abtrags auf (z.B. Erosionsrinnen, Entwurzelung, Abtragung von Bodensubstanz), während zusätzlich Schäden am Ort der Ablagerung hervorgerufen werden können (z.B. Eintrag von Bodenmaterial und Nährstoffen in Oberflächengewässer) (WBB 2000). Der durch Wind- und Wassererosion verursachte großflächige Abtrag oberflächennaher humus- und nährstoffreicher Bodenschichten zieht hohe Regenerationskosten aufgrund des quantitativen und qualitativen Verlustes der Ressource Boden nach sich (UBA 2008). Daher sind Wasser- und Winderosion bedeutende und nachhaltige Beeinträchtigungen der Ressource Boden. Es ist davon auszugehen, dass die Klimaveränderungen sich auch auf Erosionsprozesse auswirken werden, da diese maßgeblich auch von den klimatischen Rahmenbedingungen beeinflusst werden (Scheffer & Schachtschabel 2002).

Kenntnisse über die zukünftige Entwicklung und Gefährdung der Böden durch den Klimawandel, einschließlich der Funktionen, Organismen und Wechselwirkungen des Bodens mit anderen Sektoren sind essentiell für die Bewirtschaftung sowie für die Etablierung und das Management möglicher Schutzmaßnahmen. Die Analyse des Sektors Boden wird sich im Folgenden auf die potentielle Gefährdung der Bodenregionen in Sachsen-Anhalt durch Wasser- und Winderosion konzentrieren. Aufgrund derzeit laufender ausführlicher Studien<sup>4</sup> zum Themenfeld Böden unter Klimawandel mit Relevanz für Deutschland sowie Sachsen-Anhalt wird, als Ergänzung bereits vorhandener bzw. zu erwartender Informationen, der Fokus auf der Auswertung relevanter klimatischer Einflussfaktoren liegen.

Sachsen-Anhalt wird in sieben Bodenregionen unterteilt (Kainz (1999) (Abb. 3.2.1): Flusslandschaften (FL), Jungmoränenlandschaften (JML), Altmoränenlandschaften (AML), Löss- und Sandlösslandschaften (LSLL), Mesozoische Berg- und Hügelländer mit Löss (MBHL), Paläozoische Mittelgebirge und Bergländer (PMB). Bergbaufolgelandschaften (BFL) werden aufgrund ihrer geringen Fläche und starken Heterogenität nicht betrachtet. Die Bodenregionen bilden die räumliche Grundlage der folgenden Analyse.

Die Flusslandschaften haben ihre größte Verbreitung entlang des Flusslaufs der Elbe, während die anderen Bodenregionen eher einen von Nordwesten nach Südosten gerichteten Verlauf zeigen. Zum Teil decken sich die Bodenregionen aufgrund ihrer pedologischen und orographischen Eigenschaften mit menschlicher Inanspruchnahme (z.B. die Löss- und Sandlösslandschaften, deren Ackerebenen von Bedeutung für die Landwirtschaft

---

<sup>4</sup> Z.B. „Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden“ TV 02: Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser (FKZ: 3798 71 205 02, Auftraggeber: Umweltbundesamt) und „Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion in vulnerablen Regionen – Beispiel Sachsen-Anhalt (FKZ 01/U06, Auftraggeber: Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt)



sind) und naturräumlichen Gegebenheiten (z.B. Paläozoische Mittelgebirge und Bergländer des Harzes mit der Fichte als dominierende Baumart) (s. a. Kapitel 3.3. und 3.4.)

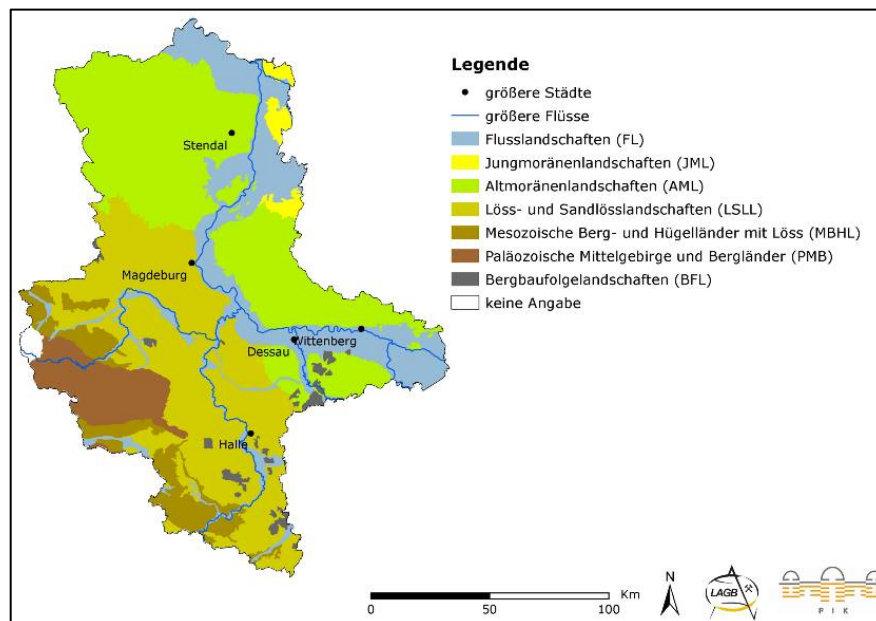


Abb. 3.2.1: Bodenregionen in Sachsen-Anhalt (Kainz 1999)

### 3.2.2.1. Methodik zur Abschätzung potentieller Gefährdung durch Wassererosion

Zur Abschätzung des flächenhaften mittleren jährlichen Bodenabtrags durch Wassererosion ist die Anwendung der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) eine häufig eingesetzte Methode (Wurbs 2007), auf welche sich die vorliegende Analyse stützt. Sie setzt sich aus folgenden Faktoren zusammen (Schwertmann 1990; Renard et al. 1997):

#### Formel 3.2. 1: Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG)

$A = R * K * L * S * C * P$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A = langjähriger mittlerer jährlicher Bodenabtrag (t/ha)</li> <li>▪ R = Regen- u. Oberflächenabflussfaktor</li> <li>▪ K = Bodenerodierbarkeitsfaktor</li> <li>▪ L = Hanglängenfaktor</li> <li>▪ S = Hangneigungsfaktor</li> <li>▪ C = Bedeckungs- u. Bearbeitungsfaktor</li> <li>▪ P= Erosionsschutzfaktor</li> </ul>
-----------------------------	--

Starkniederschlag hat einen erheblichen Einfluss auf den Oberflächen- und Abflussfaktor (R-Faktor in der ABAG) und wird daher im Folgenden näher untersucht. Als Definition für den Starkniederschlag wurde die Anzahl der Tage im Jahr mit Starkniederschlag ( $\geq 10$  mm Niederschlag/Tag) für die Zeiträume 1961-1990 (Basiszeitraum), 2011-2040, 2041-2070, 2071-100 aus den Ergebnissen der Modelle WETTREG und REMO aufbereitet<sup>5</sup>. Die Werte wurden auf zwei Arten ausgewertet anschließend für die sechs untersuch-

<sup>5</sup> Informationen zu den Klimamodellen siehe Kapitel 2.3

ten Bodenregionen gemittelt und in fünf äquidistante Klassen eingeteilt (anhand der Spanne der Werte im Basiszeitraum 1961-1990).

Des Weiteren gingen Daten zur räumlichen Verteilung der gegenwärtigen potenziellen Erosionsgefährdung der Böden durch Wasser (LAGB 2006) ein (s. Anhang 3.2.). Hierzu erfolgte eine Berechnung der Gebietsmittel der gegenwärtigen potentiellen Gefährdung durch Wassererosion je Bodenregion<sup>6</sup>. Im Vergleich der Bodenregionen untereinander zeigen die Gebietsmittel der Bodenregionen Flusslandschaften und Jungmoränenlandschaften die geringste Gefährdung auf, gefolgt von den Löss- und Sandlösslandschaften und Mesozoischen Berg- und Hügelländern mit Löss. Die höchste Gefährdung zeigen die Paläozoischen Mittelgebirge und Bergländer.

Abschließend wurde ein Indexwert berechnet, in welchem die Gebietesmittel der gegenwärtigen potentiellen Gefährdung durch Wassererosion und die Gefährdungsklassen auf Grundlage der Tage mit Starkniederschlag aggregiert<sup>7</sup> wurden.

### **3.2.2.2. Methodik zur Abschätzung potentieller Gefährdung durch Winderosion**

Die Betrachtung der potentiellen Winderosionsgefährdung beschränkt sich auf Ackerflächen<sup>8</sup> (ca. 60% der Landesfläche, s. Abb. 3.2.2), da eine stehende Vegetationsbedeckung bei Winderosion noch effektiver wirkt als bei Wassererosion (Scheffer & Schachtschabel 2002) und Ackerflächen im Jahresverlauf vorübergehend unbedeckt sind.

Winderosion wird durch eine trockene Bodenoberfläche bzw. Trocknung des Oberbodens sowie Windgeschwindigkeiten von  $\geq 4\text{-}5\text{m/s}$  über der Bodenoberfläche begünstigt (Beinhauer & Kruse 1994; Scheffer & Schachtschabel 2002; Ravi et al. 2004). Als Indikatoren für trockene Bodenbedingungen wurden das monatliche Auftreten trockener Tage ( $\leq 1\text{ mm}$  Niederschlag/Tag) und Tagen mit einer negativen KWB verwendet<sup>9</sup>. Erosionswirksame Windbedingungen werden durch die monatliche Anzahl an Tagen mit einer mittleren Windgeschwindigkeit  $\geq 4\text{ Bft}$  ( $\geq 5,5\text{m/s}$ ) als Indikator ausgedrückt. Die klimatischen Daten wurden dem Modell WETTREG entnommen, ohne Berücksichtigung der vier Stationen im Harz (Brocken, Schierke, Sorge und Braunlage-Hohegeiss), in deren direkter Umgebung sich nach der verwendeten Landbedeckungsklassifikation keine Ackerflächen befinden (siehe Abb. 3.2.2). Die Daten des Modells REMO wurden aufgrund der Unsicherheiten und Abweichungen des Modells REMO bezüglich der Windgeschwindigkeiten gegenüber den gemessenen Werten für die Winderosion nicht ausgewertet (s.a. Kap. 2.7., Abb. 2.7.1).

Anhand der Spanne der Werte der Indikatoren für Bodentrockenheit und erosionswirksamen Windgeschwindigkeiten über die zwölf Monate, die vier Untersuchungszeiträume und drei Szenarien der Sachsen-Anhalt-Studie wurden die einzelnen monatlichen Werte von 0-1 normiert und als gleichgewichteter Mittelwert zur klimatischen Winderosionsgefährdung für die jeweiligen Untersuchungszeiträume aggregiert. Die Monate Januar, Mai, Juli, September, Oktober und Dezember zeichneten sich durch eine im Vergleich zu den ande-

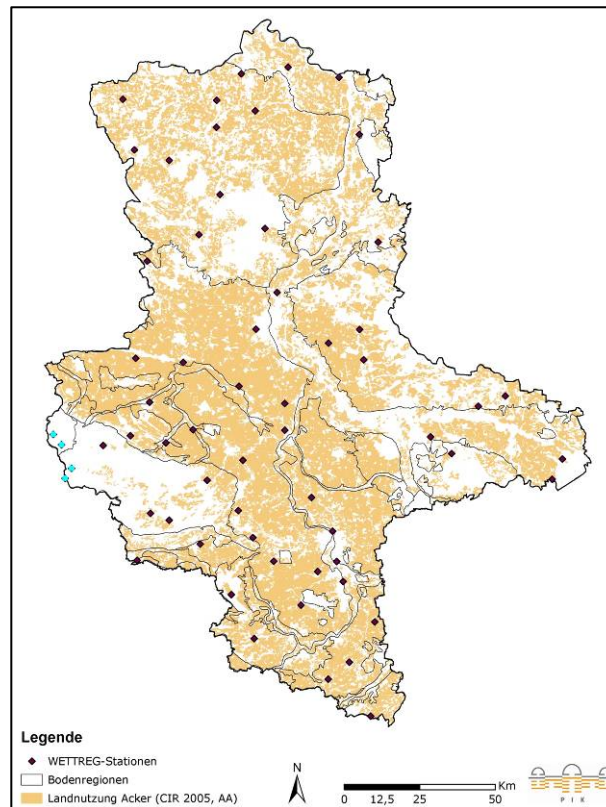
<sup>6</sup> Unter Ausschluss der Klasse „keine Angaben“, welche überwiegend Siedlungen und Bergbaufolgelandschaften umfasst.

<sup>7</sup> Unter der Gewichtung der Eingangsgrößen 2/3 gegenwärtige potentielle Gefährdung durch Wassererosion zu 1/3 Starkniederschlag.

<sup>8</sup> Nach Klasse AA der der Landbedeckungsklassifikation CIR 2005

<sup>9</sup> Unter Ausschluss einer doppelten Wertung, wenn beide Indikatoren an einem Tag zuträfen.

ren Monaten höhere klimatische Winderosionsgefährdung über alle Szenarien und Zeiträume hinweg aus. Im Folgenden wird daher die potentielle Erosionsgefährdung in den Zeiträumen Dezember-Januar, September-Oktober sowie Mai-Juli näher untersucht.



**Abb. 3.2.2: Ackerflächen und WETTREG-Stationen in Sachsen-Anhalt**

*(In der Analyse der Winderosionsgefährdung verwendete Stationen sind schwarz gekennzeichnet, nicht verwendete blau. Die untersuchten Ackerflächen beruhen auf der Klasse AA der Landbedeckungsklassifikation, Stand 2005)*

Die Bewegung von Bodenpartikeln durch Wind setzt ein, sobald ein Schwellenwert der Windgeschwindigkeit, der in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften variiert, überschritten wird. Diese Windgeschwindigkeit ist bei der Bodenart fS (feiner Sand) am geringsten und steigt mit der Zunahme des Teilchengewichtes und der Kohäsionskräfte mit zunehmender bzw. abnehmender Korngröße an. (Kuntze et al. 1994b; Scheffer & Schachtschabel 2002) Daher wurde als Indikator der Sensitivität der Böden gegenüber Winderosion die Bodenart herangezogen. Auf Grundlage der Bodenübersichtskarte 1000 (BUEK 1000) und der Bodenparametrisierung des Modells SWIM (Stand 2008, s. Kap. 3.1.) wurden Informationen zur vorherrschenden Bodenart des A-Horizonts mit dem Wert der potentiellen Winderosionsgefährdung der Bodenarten nach der Verknüpfungsregel 5.23, DIN 19706<sup>10</sup> verbunden. Anschließend wurden die klimatische und die durch die Bodenart bedingte Winderosionsgefährdung als gleichgewichtetes Mittel in dem relativen Index der potentiellen Winderosionsgefährdung der Ackerflächen zusammengeführt.

<sup>10</sup> Es lagen keine Informationen zum Humusgehalt vor, so dass die Verknüpfung unter der Annahme eines Humusgehaltes <1% erfolgte.

### 3.2.2.3. Ergebnisse der Analyse der räumlichen Wassererosionsgefährdung

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Analyse der Tage mit Starkniederschlag ( $\geq 10$  mm Niederschlag/Tag) im Jahr diskutiert. Die Ergebnisse der Tage mit Starkniederschlag im Winter und im Sommer sowie die Veränderungen in diesen Jahreszeiten befinden sich im Anhang zu Kapitel 3.2. Im Winter überwiegen in weiten Landesteilen zunächst leichte Rückgänge (WETTREG, bis 2041-2070); ab dem Zeitraum 2041-2070 (REMO) bzw. 2071-2100 (WETTREG) kommt es jedoch fast flächendeckend zu leichten Zunahmen. Im Sommer sind zunächst bis Mitte des Jahrhunderts u.a. Regionen im Landesinnern mit leichten Zunahmen erkennbar; ab dem Zeitraum 2041-2070 (WETTREG) bzw. 2071-2100 (REMO) überwiegen jedoch leichte Abnahmen.

#### Starkniederschlag

Die Auswertung des Indikators Tage mit Starkniederschlag erfolgte auf zwei Arten: i) Die Abb. 3.2.3 und Abb. 3.2.4 zeigen flächenhaft als Karten die räumliche Ausprägung dieses Indikators. ii) Tab. 3.2.1. zeigt hingegen aggregierte Gebietsmittel der Bodenregionen bezüglich der Tage mit Starkniederschlag im Jahr. Beide Vorgehensweisen führen teilweise zu unterschiedlichen Ergebnissen. So gibt es  $\geq 30$  Tage Starkniederschlag im Jahr in den Abb. 3.2.3 und Abb. 3.2.4, jedoch nicht in der Tab. 3.2.1. Beispielsweise werden die hohen Indikatorwerte im Harz von  $\geq 30$  Tagen innerhalb des Gebietsmittels der Bodenregion der Paläozoischen Mittelgebirge und Bergländer „weggemittelt“. Das unterschiedliche Vorgehen begründet sich darin, dass die Abbildungen der Veranschaulichung der räumlichen Verteilung der Tage mit Starkniederschlag im Jahr dienen, die Gebietsmittel der Tab. 3.2.1. jedoch der Abschätzung der potentiellen Gefährdung der Bodenregionen gegenüber Wassererosion. Letztere erfolgte wegen der Modellunsicherheiten hinsichtlich des Extremereignisses Starkniederschlag (s.a Kap. 2.7.) auf Ebene der Gebietsmittel der Bodenregionen.

#### i) flächenhafte räumliche Ausprägung der Tage mit Starkniederschlag

Die räumliche Ausprägung der Tage mit Starkniederschlag im Land Sachsen-Anhalt zeigt in Abb. 3.2.3 für den Zeitraum 1961-1990 nach dem Modell WETTREG eine hohe Anzahl im Hochharz ( $> 30$  Tage/Jahr) sowie den nördlichen Mesozoischen Berg- und Hügelländern mit Löss ( $> 20$  Tage/Jahr). Die geringste Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag (bis 10 Tage/Jahr) tritt in zentralen Regionen des Landes in den Löss- und Sandlösslandschaften, Altmoränenlandschaften und Flusslandschaften auf sowie in den nordöstlichen Flusslandschaften. Dieses räumliche Muster bleibt unter den Projektionen des Modells WETTREG in der Zukunft weitgehend bestehen, insbesondere im Harz und angrenzenden Regionen der Mesozoischen Berg- und Hügelländer mit Löss, welche die höchste Zahl an Tagen mit Starkniederschlag aufweisen. Die Größe der zentralen Region im Landesinnern mit den wenigsten Tagen im Jahr mit Starkniederschlag (bis zu 10 Tage im Jahr) schwankt stark zwischen den Zeiträumen und Szenarien: Am größten ist sie unter dem Szenario A1B ausgeprägt mit einer geringeren Veränderung in der Größe über die Zeiträume hinweg. Dem gegenüber nimmt in den Szenarien A2 und B1 in der zentralen Region die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag im Jahr zunächst zu, dann jedoch bis Ende des Jahrhunderts wieder ab. In Abb. 3.2.4 zeigt sich in der Vergangenheit und Zukunft

nach dem Modell REMO eine höhere Anzahl von Tagen mit Starkniederschlag als nach dem Modell WETTREG (Abb. 3.2.3). So finden sich unter dem Modell REMO keine Regionen, die weniger als 10 Tage/Jahr mit Starkniederschlag aufweisen. Dagegen treten in großen Teilen des Landes über die Szenarien hinweg in der Zukunft 10-20 Tage mit Starkniederschlag im Jahr auf. Der Schwerpunkt des Starkniederschlages im Harz in den Paläozoischen Mittelgebirgen und Bergländern sowie angrenzenden Mesozoischen Berg- und Hügelländern mit Löss ist jedoch zwischen den Modellen übereinstimmend.

#### ii) Tage mit Starkniederschlag basierend auf den Gebietsmitteln der Bodenregionen

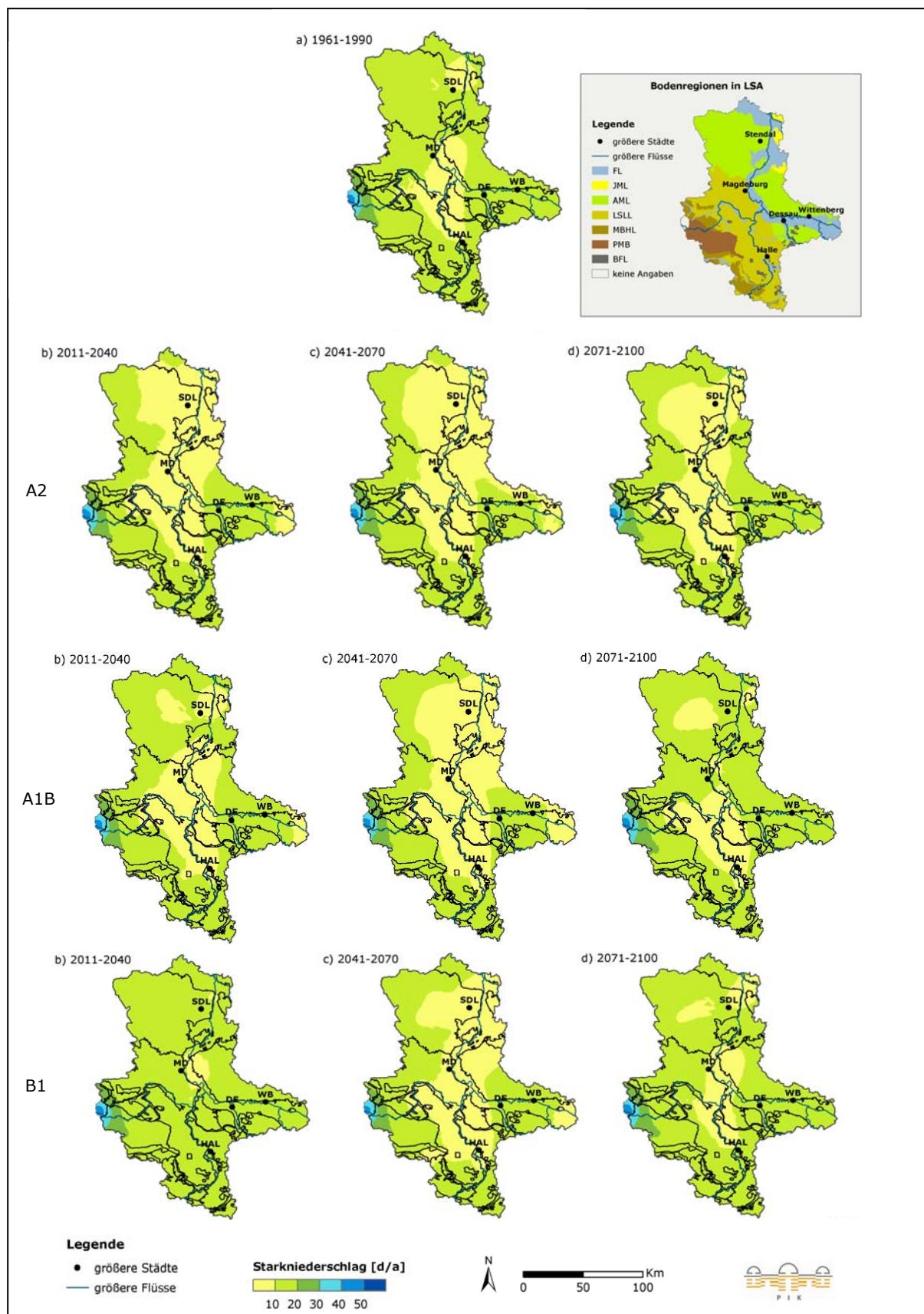
In Tab. 3.2.1 ist die durchschnittliche Anzahl an Tagen im Jahr mit Starkniederschlag als Gebietsmittel einer Bodenregion für die betrachteten Zeiträume und Szenarien nach den Modellen WETTREG und REMO aufgeschlüsselt. Zusammengefasst über die Modelle, Szenarien und Zeiträume hinweg betrachtet, ergibt sich folgende Reihenfolge für die Betroffenheit der Bodenregionen gegenüber Starkniederschlag (Anzahl an Tagen im Jahr von gering nach hoch): Jungmoränenlandschaften → Flusslandschaften → Altmoränenlandschaften → Löss- und Sandlösslandschaften → Mesozoische Berg- und Hügelländer mit Löss → Paläozoische Mittelgebirge und Bergländer.

#### Index der potentiellen Wassererosionsgefährdung

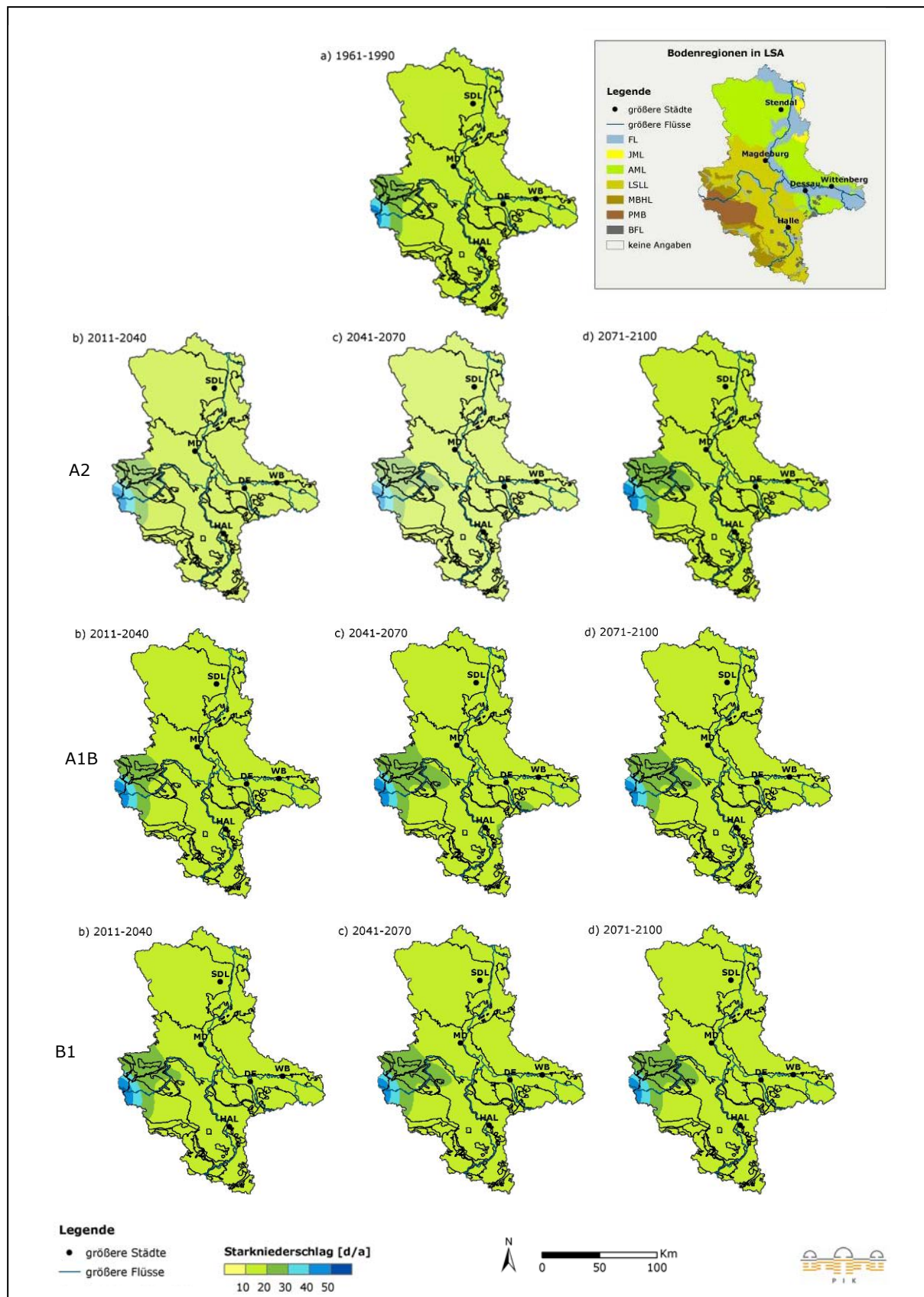
Der Index der potentiellen Wassererosionsgefährdung wurde zur besseren Übersicht und aufgrund der hohen Modellunsicherheit hinsichtlich der Abbildung von Starkregenereignissen als Gebietsmittel der Bodenregionen erstellt (siehe Tab. 3.2.2). Der Index ist ein relativer Wert in Abhängigkeit von der gegenwärtigen potentiellen Wassererosionsgefährdung und dem Starkniederschlag unter den Projektionen der Klimamodelle WETTREG und REMO für Sachsen-Anhalt. Von den Extremen ausgehend (höchste gegenwärtige potentielle Wassererosionsgefährdungs-klasse zusammen mit 365 Tagen im Jahr mit Starkniederschlag bzw. geringste gegenwärtige potentielle Wassererosionsgefährdungsklasse zusammen mit 0 Tagen im Jahr), betrüge der höchste Indexwert 5, der niedrigste Indexwert 0,3. Die Indexwerte in Tab. 3.2.2 befinden sich zwischen 1,0 und 4,6.

Unter den Klimarandbedingungen der Modelle WETTREG und REMO sind nur geringe Veränderungen der potentiellen Wassererosionsgefährdung der Bodenregionen gegenüber dem Basiszeitraum festzustellen. Jedoch kann die Veränderung im Einzelfall größer oder geringer sein, als es die Gebietsmittel als räumlicher Proxi erkennen lassen. Veränderungen zeichnen sich nach den Ergebnissen des Modells WETTREG nur in den Paläozoischen Mittelgebirgen und Bergländern unter den Szenarien A1B und B1 ab (Szenario A1B: Anstieg von dem Zeitraum 2011-2040 zu 2041-2070; Szenario B1: zunächst tritt ein Rückgang auf, gefolgt von einem Anstieg auf das Niveau der Vergangenheit). Die Ergebnisse nach dem Modell REMO zeigen ein anderes Bild. Unter den Szenarien A1B und B1 nimmt die potentielle Gefährdung im Vergleich zur Vergangenheit in der Zukunft für die Jungmoränenlandschaften, Altmoränenlandschaften, Löss- und Sandlösslandschaften und Mesozoischen Berg- und Hügelländer mit Löss zu und für die Flusslandschaften unter dem Szenario A1B. Für die Löss- und Sandlösslandschaften steigt sie gegen Ende des Jahrhunderts in allen drei Szenarien. Die insgesamt höchste Gefährdung, über die Klimamodelle, Szenarien und Zeiträume hinweg, weist ohne Veränderung die Bodenregion der Paläozoischen Mittelgebirge und Bergländer mit dem Harz auf.





**Abb. 3.2.3: Tage mit Starkniederschlag im Jahr (Modell WETTREG, Szenario A2, A1B, B1) in der Vergangenheit (a) und der Zukunft (b-d)**



**Abb. 3.2.4: Tage mit Starkniederschlag im Jahr (Modell REMO, Szenario A2, A1B, B1) in der Vergangenheit (a) und der Zukunft (b-d)**

**Tab. 3.2.1: Durchschnittliche Anzahl an Tagen im Jahr mit Starkniederschlag in den Bodenregionen Sachsen-Anhalts**

Boden-region	1961-1990		2011-2041						2041-2070						2071-2100					
	WETTREG	REMO	WETTREG			REMO			WETTREG			REMO			WETTREG			REMO		
	identisch je RKM		A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
FL	11	15	10	10	11	15	15	16	10	10	10	16	17	17	10	11	11	17	16	16
JML	10	15	9	10	10	15	15	16	9	9	10	15	17	17	10	10	10	17	16	16
AML	11	14	10	11	11	15	15	16	10	10	10	15	17	17	10	11	11	17	16	16
LSLL	11	15	10	10	11	16	16	16	10	10	10	17	18	18	10	11	11	17	17	17
MBHL	14	17	13	13	14	18	17	18	14	13	13	18	19	19	14	14	14	19	18	18
PMB	19	21	19	19	20	23	23	24	19	19	18	22	24	23	20	20	20	24	23	23

**Tab. 3.2.2: Relativer Index für die potentielle Gefährdung der Bodenregionen in Sachsen-Anhalts durch Wassererosion (kleinster möglicher Indexwert: 0,3- sehr gering gefährdet; größter möglicher Indexwert: 5- sehr stark gefährdet)**

Boden-region	1961-1990		2011-2041						2041-2070						2071-2100					
	WETTREG	REMO	WETTREG			REMO			WETTREG			REMO			WETTREG			REMO		
	Identisch je RKM		A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
FL	1,0	1,7	1,0	1,0	1,0	1,7	1,7	1,7	1,0	1,0	1,0	1,7	2,0	1,7	1,0	1,0	1,0	1,7	1,7	1,7
JML	1,1	1,7	1,1	1,1	1,1	1,7	1,7	1,7	1,1	1,1	1,1	1,7	2,1	2,1	1,1	1,1	1,1	1,7	1,7	1,7
AML	1,2	1,9	1,2	1,2	1,2	1,9	1,9	1,9	1,2	1,2	1,2	1,9	2,2	2,2	1,2	1,2	1,2	1,9	1,9	1,9
LSLL	2,1	2,8	2,1	2,1	2,1	2,8	2,8	2,8	2,1	2,1	2,1	2,8	3,1	3,1	2,1	2,1	2,1	3,1	3,1	3,1
MBHL	3,2	3,9	3,2	3,2	3,2	3,9	3,9	3,9	3,2	3,2	3,2	3,9	4,2	4,2	3,2	3,2	3,2	3,9	3,9	3,9
PMB	4,6	4,6	4,6	4,3	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,3	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6

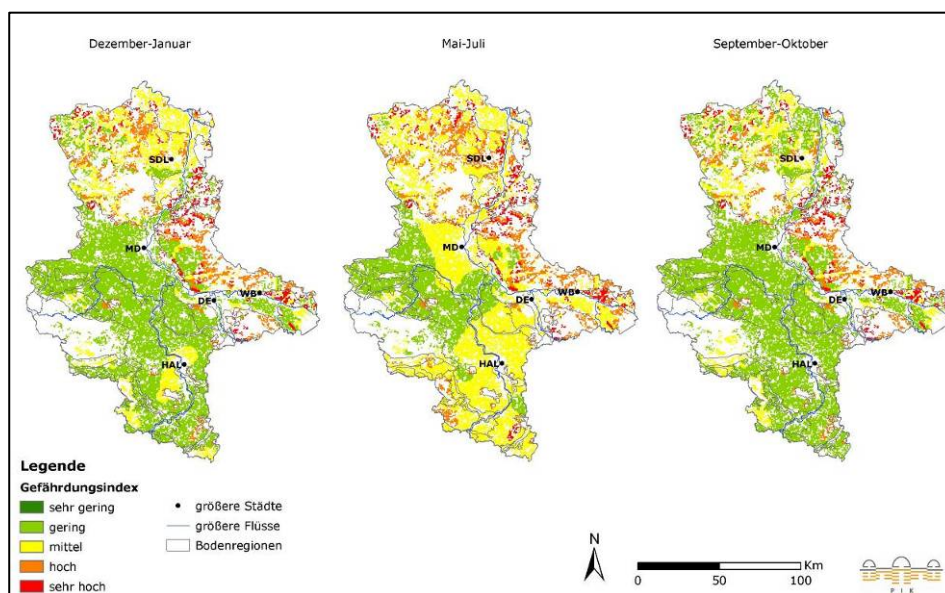
Flusslandschaften (FL), Jungmoränenlandschaften (JML), Altmoränenlandschaften (AML), Löss- und Sandlösslandschaften (LSLL), Mesozoische Berg- und Hügelländer mit Löss (MBHL), Paläozoische Mittelgebirge und Bergländer (PMB), Regionales Klimamodell (RKM)



### 3.2.2.4. Ergebnisse der Winderosionsgefährdung

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse zur potentiellen Winderosionsgefährdung der Ackerflächen in Sachsen-Anhalt in den als potenziell besonders gefährdet identifizierten Monaten Dezember-Januar, Mai-Juli und September-Oktober eingegangen. Die räumliche Ausprägung der in die Winderosionsanalyse eingehenden Indikatoren für Bodentrockenheit (trockene Tage und Tage mit einer negativen KWB) sowie Windbedingung (Tage mit mittleren Windgeschwindigkeiten  $\geq 4$  Bft) des Modells WETTREG sind auf Jahresbasis als Information dem Anhang zu Kap. 3.2 zu entnehmen.

Sowohl in der Vergangenheit (Abb. 3.2.5) als auch in der Zukunft (Abb. 3.2.6 bis Abb. 3.2.8) sind Ackerflächen im Dezember-Januar (Abb. 3.2.6) sowie September-Oktober (Abb. 3.2.8) potentiell weniger durch Winderosion gefährdet als im Mai-Juli (Abb. 3.2.7). Dabei zeigt sich im Jahresverlauf, vor allem auf Ackerflächen in den Löss- und Sandlösslandschaften, vom Dezember-Januar zum Mai-Juli hin ein Anstieg der Gefährdung, vom Mai-Juli zum September-Oktober wieder ein Rückgang.



**Abb. 3.2.5: Relativer Index der potentiellen Gefährdung der Ackerflächen in Sachsen-Anhalt gegenüber Winderosion im Dezember-Januar, Mai-Juli und September-Oktober (Zeitraum 1961-1990, Modell WETTREG)**

*(auf Basis klimatischer Gefährdung durch Wind und Trockenheit sowie der Gefährdung durch die Bodenart)*

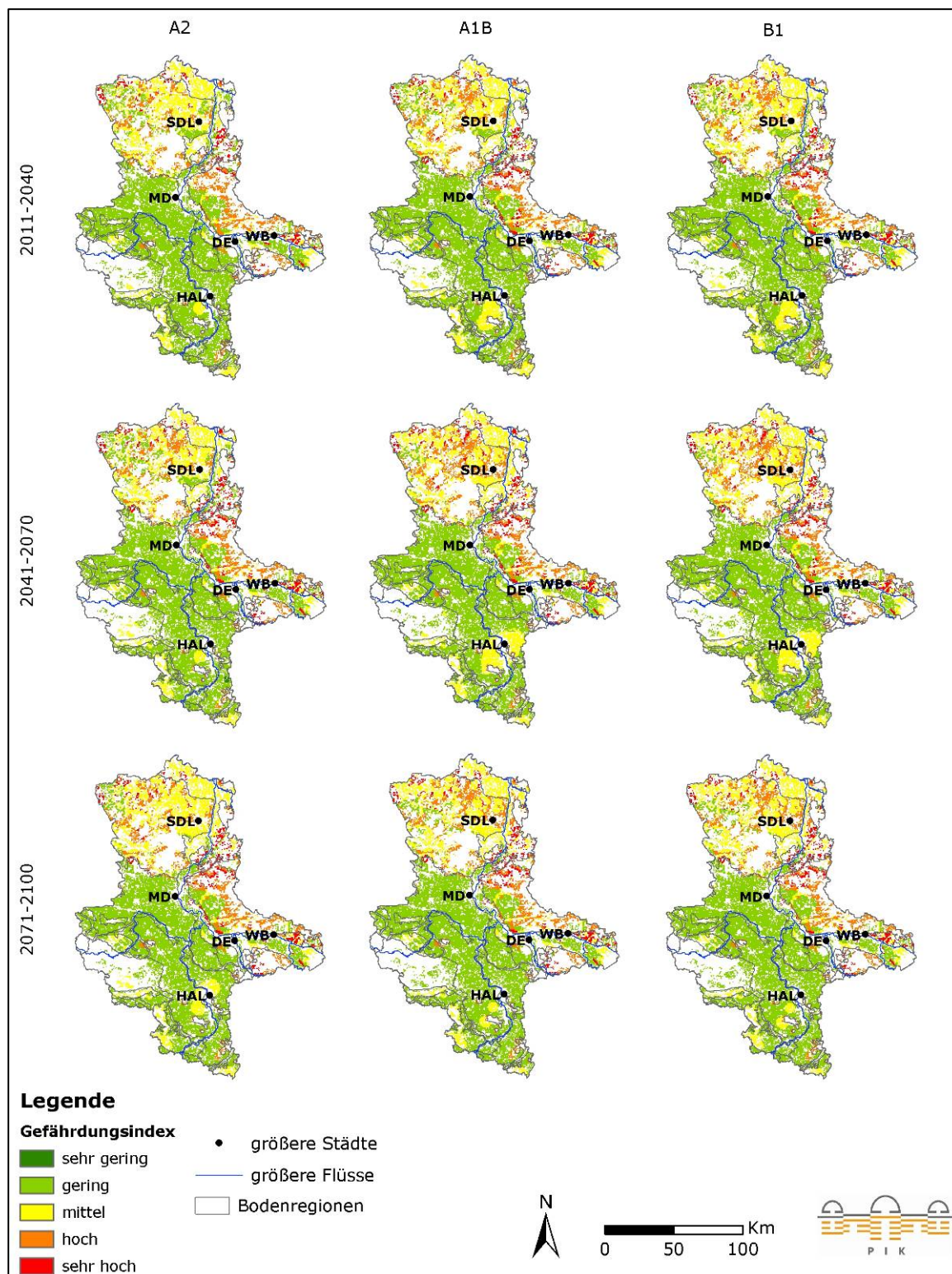
Die räumliche Differenzierung der potentiellen Winderosionsgefährdung zeigt, dass die Ackerflächen im Dezember-Januar (Abb. 3.2.6) im Harz, den Mesozoischen Berg- und Hügelländern mit Löss sowie den Löss- und Sandlösslandschaften sehr gering bis gering gefährdet sind. Südlich von Halle in den Löss- und Sandlösslandschaften sowie in den Flusslandschaften sind Ackerflächen mittelstark gefährdet. Am stärksten sind Ackerflächen in den Jung- und Altmoränenlandschaften gefährdet. Bis zum Ende des Jahrhunderts nimmt in allen Szenarien die mittlere potentielle Winderosionsgefährdung im Nordwesten der Altmoränenlandschaften in der Altmark zu. Die Region mit mittlerer Gefährdung südlich von Halle vergrößert sich unter dem Szenario A2 bis zum Ende des Jahr-

hunderts, während sie unter den Szenarien A1B und B1 bis Mitte des Jahrhunderts zunächst zu- und dann wieder abnimmt.

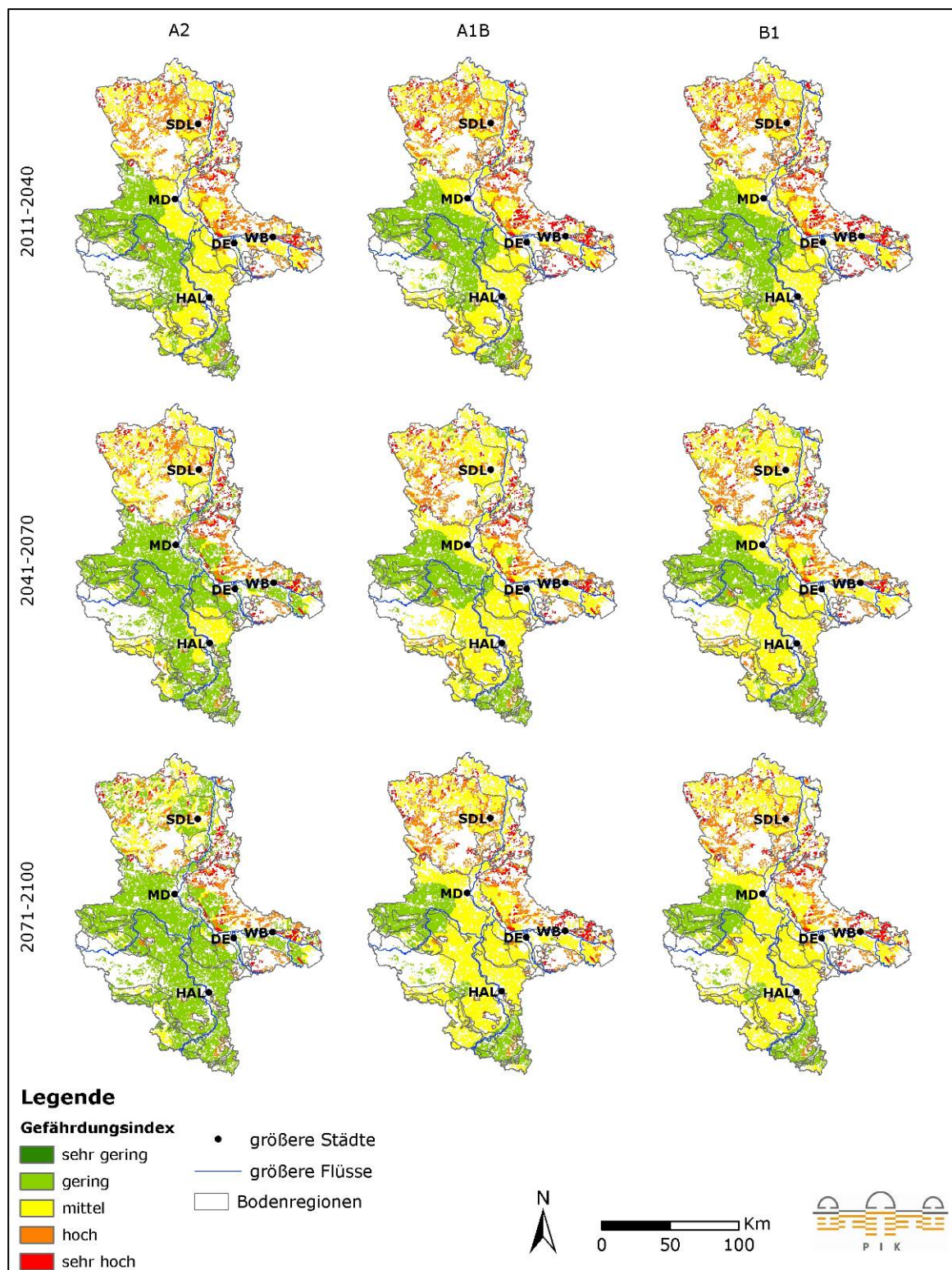
Der Zeitraum Mai-Juli (Abb. 3.2.7) zeigt überwiegend eine ähnliche räumliche Differenzierung wie in dem Zeitraum Dezember-Januar. Unterschiede bestehen beispielsweise bezüglich der Ackerflächen in den Löss- und Sandlösslandschaften, für welche im Mai-Juli nicht nur südlich von Halle, sondern in weiten Regionen der nord- und südöstlichen sowie zentralen Löss- und Sandlösslandschaften eine Zunahme der Gefährdung von gering zu mittelstark erkennbar ist (insbesondere unter den Szenarien A1B und B1 ab der Mitte des Jahrhunderts).

Im September-Oktober (Abb. 3.2.8) sind die Ackerflächen im Harz sowie den Mesozoischen Berg- und Hügelländern mit Löss überwiegend sehr gering bis gering durch Winderosion gefährdet. Für Ackerflächen in den Löss- und Sandlösslandschaften ist die potentielle Gefährdung unter dem Szenario A2 zumeist gering, ausgenommen in der Region südlich von Halle. Den Projektionen der Szenarien A1B (2071-2100) und B1 (2041-2070) nach sind jedoch zur Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts viele Ackerflächen mit mittlerer Winderosionsgefährdung in den Löss- und Sandlösslandschaften zu erkennen.



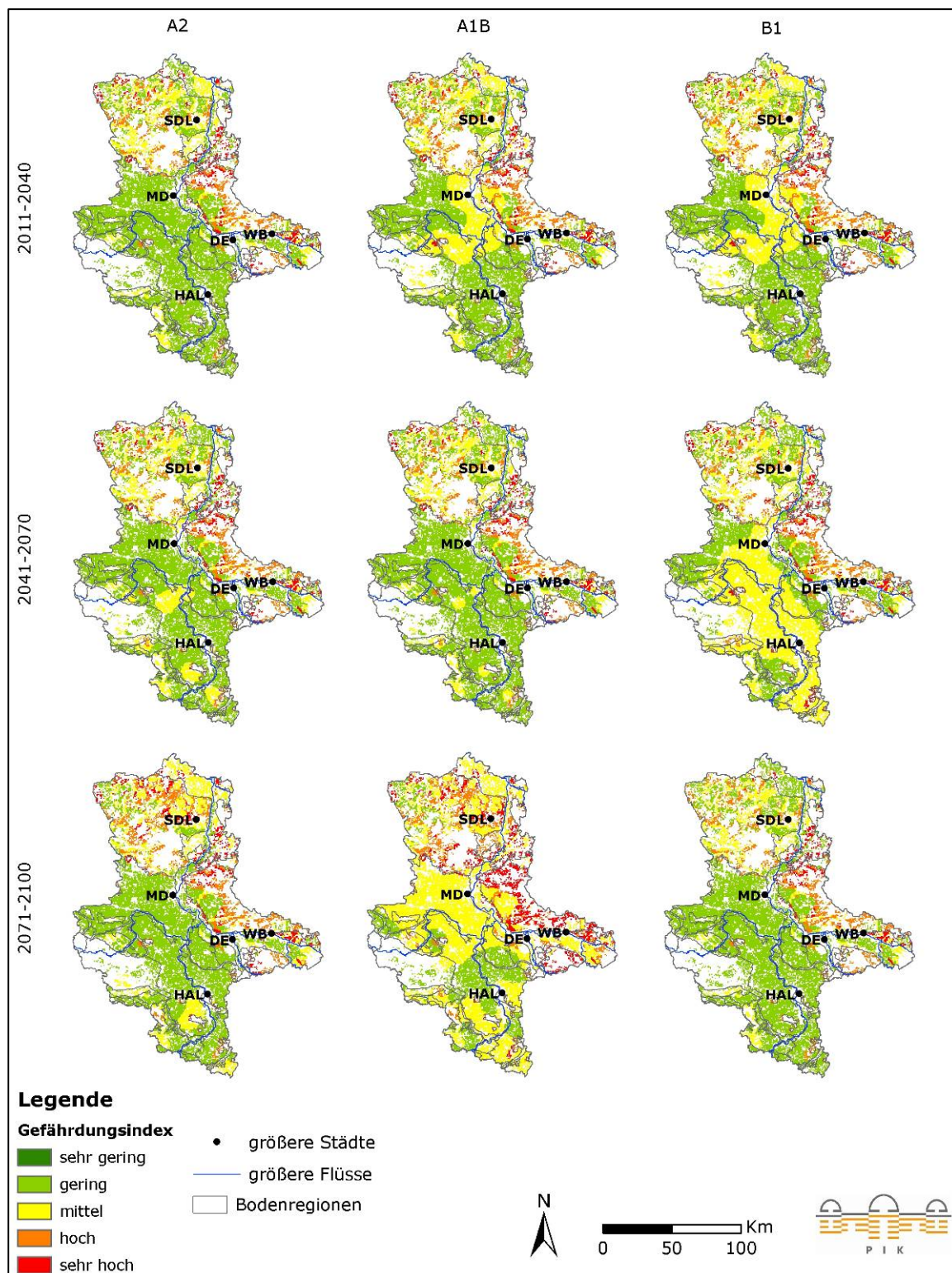


**Abb. 3.2.6: Relative Index der potentiellen Gefährdung der Ackerflächen in Sachsen-Anhalt gegenüber Winderosion im Dezember-Januar (in den Zeiträumen 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 nach dem Modell WETTREG unter Szenarien A2, A1B und B1)**



**Abb. 3.2.7: Relativer Index der potentiellen Gefährdung der Ackerflächen in Sachsen-Anhalt gegenüber Winderosion im Mai-Juli (in den Zeiträumen 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 nach dem Modell WETTREG unter Szenarien A2, A1B und B1)**





**Abb. 3.2.8: Relative Index der potentiellen Gefährdung der Ackerflächen in Sachsen-Anhalt gegenüber Winderosion im September-Oktober (in den Zeiträumen 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 nach dem Modell WETTREG unter Szenarien A2, A1B und B1)**

### 3.2.3. Zusammenfassung und Diskussion

#### 3.2.3.1. Zusammenfassung

Die potentielle Gefährdung der Bodenregionen bzw. Ackerflächen gegenüber Wasser- und Winderosion verändert sich in der vorliegenden Analyse in der Zukunft im Dezember-Januar wenig, jedoch im September-Oktober sowie im Mai-Juli vor allem in den Löss- und Sandlösslandschaften (Tab. 3.2.2 und Abb. 3.2.6 bis Abb. 3.2.8). Ursächlich für die geringe Veränderung im Dezember-Januar könnten die geringen Spannweiten der Veränderung der betrachteten Klimavariablen über die Modelle, Szenarien und Zeiträume hinweg sein. Sie betragen im Jahresmittel für weite Teile Sachsen-Anhalts nur - 2 bis + 5 Tage für den Starkniederschlag, - 5 bis + 9 Tage für den Wind, - 9 bis + 11 bezüglich der trockenen Tage und -10 bis +10 Tage hinsichtlich der Tage mit einer negativen KWB (s. Anhang 3.2 zu den absoluten Werten und Differenzen der Jahresmittelwerte der Tage mit Starkniederschlag. Die absoluten Tage im Jahr mit einer Windgeschwindigkeit von  $\geq 4$  Bft, einer negativen KWB und der trockenen Tage sind nach dem Modell WETTREG als Hintergrundinformation auch im Anhang zu Kap. 3.2. hinterlegt).

Räumliche Unterschiede wurden in der potentiellen Gefährdung der Bodenregionen gegenüber Wassererosion bzw. der Ackerflächen gegenüber Winderosion erkennbar. Die potentielle Gefährdung der Bodenregionen durch Wassererosion zeigte sich im Harz sowie in den Mesozoischen Berg- und Hügelländern mit Löss vergleichsweise hoch. Einerseits wird dies klimatisch durch die hohe Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag im Jahr, andererseits durch die hohe Hangneigung sowie Erodierbarkeit der Böden in diesen Bodenregionen bedingt (siehe Anhang 3.2. zur gegenwärtigen potentiellen Erosionsgefährdung der Böden durch Wasser in Sachsen-Anhalt). Am geringsten sind die Bodenregionen Flusslandschaften und Jungmoränenlandschaften von Wassererosion gefährdet, welche sich u.a. durch eine geringe Hangneigung und Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag auszeichnen.

Die vergleichsweise hohe potentielle Gefährdung der Ackerflächen durch Winderosion in den Altmoränenlandschaften ist erklärbar durch den hohen Feinsandanteil der Bodenarten in dieser Bodenregion bei relativ hoher Anzahl an Tagen im Monat mit klimatischer Trockenheit sowie mittlerer Anzahl von Tagen mit Windgeschwindigkeiten von  $\geq 4$  Bft. In den Löss- und Sandlösslandschaften ist die klimatische Trockenheit zwar stärker ausgeprägt als in den Altmoränenlandschaften, insbesondere im Mitteldeutschen Trockengebiet. Jedoch ist die potentielle Gefährdung der Bodenarten überwiegend nur gering, was die Gefährdung senkt, so dass die Ackerflächen der Löss- und Sandlösslandschaften insgesamt als potentiell gering bis mittelstark durch Winderosion gefährdet charakterisiert sind. Die Ackerflächen im Harz sowie den Mesozoischen Berg- und Hügelländern mit Löss sind zwar durch eine hohe bis sehr hohe Anzahl an Tagen mit einer mittleren Windgeschwindigkeiten von  $\geq 4$  Bft gekennzeichnet, zugleich ist jedoch die klimatische Trockenheit sowie die potentielle Gefährdung der Bodenarten in diesen Bodenregionen gering, was zu einer potentiell geringen Gefährdung der Ackerflächen in diesen Bodenregionen durch Winderosion führt. (siehe auch Anhang zu Kapitel 3.2 zur potentiellen Winderosionsgefährdung der Bodenarten, Anzahl an Trockenen Tagen, Tagen mit einer negativen KWB sowie Tagen mit mittleren Windgeschwindigkeiten  $\geq 4$  Bft im Jahr).

### 3.2.3.2. Diskussion

Bereits heute ist die KWB in Sachsen-Anhalt übergehend negativ (s. Kap. 2.4.3. und Anhang zu Kap. 3.5.) und unter Klimawandel ist im Allgemeinen mit einem weiteren Rückgang zu rechnen (s. Kap. 2.5.3.3.). Eine geringe Wasserverfügbarkeit kann zur Verringerung der Sickerwasserraten führen sowie zur Zunahme des kapillaren Aufstieges von Bodenwasser. Beides kann den Rückgang des Grundwasserstromes in Fließgewässer fördern. (Arnell 1999; Arnell et al. 2001) Allerdings können zeitweise erhöhte Abflüsse durch Starkniederschlagsereignisse zur Nährstoffauswaschung beitragen (Blum 2005).

Die Auswirkungen des Klima- und Landnutzungswandels auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Flusseinzugsgebiete untersucht (Wurbs 2005) im Zusammenhang mit dem möglichen Wiederentstehen des Salzigen Sees in Sachsen-Anhalt im Einzugsgebiet der Querne/Weida sowie Wipper. Die Ergebnisse zeigten, dass die hydrologische Sensitivität gegenüber klimatischen Veränderungen in beiden Flusseinzugsgebieten sehr hoch sind, wobei die Sensitivität der Querne/Weida stärker ist als im Flusseinzugsgebiet der Wipper. In der Konsequenz könnten die hydrologischen Vorgaben für das geplante Wiederentstehen des Salzigen Sees insbesondere während längerer Trockenperioden schwierig zu erfüllen sein.

Die derzeitige potentielle Winderosionsgefährdung der Mineralböden Sachsen-Anhalts wurde bereits von Helbig (2005) untersucht<sup>11</sup> (siehe Anhang zu Kapitel 3.2). Sie berücksichtigte die Bodenart, den Humusgehalt und die aktuelle Bodenkundliche Feuchtestufe, jedoch keine Klimavariablen. Die räumlichen Ergebnisse der vorliegenden Winderosionsanalyse zeigen im Kern Übereinstimmungen mit den Ergebnissen aus dieser Studie (z.B. hohe bis sehr hohe Gefährdung der Altmoränenlandschaften sowie sehr geringe bis geringe Gefährdung des Harzes). Unterschiede sind auf die in die vorliegende Winderosionsanalyse eingehenden Klimavariablen zurückzuführen, beispielsweise bezüglich der geringen und mittleren Gefährdung der Ackerflächen in den Löss- und Sandlösslandschaften im Mai-Juli, welche vor allem durch die Bodentrockenheit bedingt wird.

Hinsichtlich der potentiellen Winderosionsgefährdung im Dezember-Januar (Abb. 3.2.6) könnte die leichte Zunahme der Niederschlagssumme im Winter (s. Anhang zu Kap. 2.5., insbesondere am Ende des Jahrhunderts), ein Hinweis auf den Rückgang der trockenen Tage ( $\geq 1$  mm Niederschlag/Tag) und Tage mit einer negativen Klimatischen Wasserbilanz im Winter sein. Dies könnte die für die Winderosion förderliche Bodentrockenheit verringern. Auch bieten Frost und Schnee durch Frieren und Bedecken des Bodens in den Wintermonaten auf gegebenenfalls vegetationsfreien Ackerflächen einen gewissen Schutz. Der Rückgang der Eis- und Frosttage (s. Kap. 2.5.4.) sowie die Zunahme der Wintermitteltemperatur (s. Anhang zu Kap. 2.5.) deuten jedoch darauf hin, dass dieser Schutz unter dem Einfluss des Klimawandels abnehmen wird, so dass damit das Erosionsrisiko in diesen Monaten zunimmt. -Darüber hinaus könnten auch die Zeiträume Mai-Juli sowie September-Oktober für die Landwirtschaft im Zusammenhang mit vegetationsfreien Flächen relevant sein. In Kapitel 3.3 wurden die Erträge für Winterweizen,

<sup>11</sup> Bodenkundliche Themenkarten von Sachsen-Anhalt im Maßstab 1:50.000 – Potenzielle Erosionsgefährdung der Mineralböden durch Wind (ausgehend vom aktuellen Bodenwasserhaushalt) (Name des Datensatzes: aktefa310506); Arbeitsstand vom 31.05.2006. Herausgeber: Landesamt für Geologie und Bergwesen-Sachsen-Anhalt.



Winterraps und Silomais unter dem Einfluss des Klimawandels näher untersucht. Im Folgenden wird daher näher auf ggfl. vegetationsfreie Zeiträume unter dem Anbau dieser Arten eingegangen.

Für Winterweizen ist der in der Winderosionsanalyse betrachtete Zeitraum September-Oktober relevant, da in der zweiten Septemberhälfte die Grundbodenbearbeitung sowie für Oktober die Saatbeetbereitung und Aussaat empfohlen werden (KTBL 2005). Somit wären in diesem Zeitraum Ackerflächen mit dem Anbau von Winterweizen noch vegetationsarm und potentiell gegenüber Winderosion gefährdet. Für Silomais ist der Zeitraum September-Oktober ebenfalls mit einer potentiellen Gefährdung verbunden, da für die 2. Oktoberhälfte eine Grundbodenbearbeitung empfohlen wird (KTBL 2005) und die Ackerflächen dann vergleichsweise ungeschützt sind. Jedoch können die Arbeitsgänge des Anbaus des Silomais einen gesamten Jahresgang umfassen, so dass während der Saatbeetaufbereitung und Aussaat im April (KTBL 2005) sowie während des Aufwuchses der Jungpflanzen im Mai die Winderosion den Oberboden gefährden könnte. Der April ist nach der vorliegenden Winderosionsanalyse potentiell weniger gefährdet, der sich anschließende Mai jedoch stärker. Verlagerungen der landwirtschaftlichen Arbeitsschritte des Aprils in den Mai könnten daher die potentielle Winderosionsgefährdung der Ackerflächen mit Silomais erhöhen. Hinsichtlich des Winterrapses sind die Sommermonate als sensitiv gegenüber Winderosion einzustufen, da in der 2. Julihälfte die Grundbodenbearbeitung stattfindet und die Aussaat im August erfolgt (KTBL 2005). Nach dieser Anbauempfehlung würde im Juli die vor Winderosion schützende Vegetationsbedeckung fehlen. Unter Berücksichtigung dieser landwirtschaftlichen Anbauempfehlungen und der als durch Winderosion besonders gefährdet identifizierten Monate sollte eine Überschneidung vegetationsfreier Zeiträume in der Landwirtschaft mit diesen Monaten vermieden werden.

### 3.2.3.3. Einordnung der Ergebnisse

Im Kontext der vorliegenden Analyse und Interpretation der Ergebnisse sind einige Aspekte zu berücksichtigen, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird.

Simulierte klimatische Extremereignisse sind mit besonderen Unsicherheiten behaftet. Entsprechend wurde der Index der potentiellen Wassererosionsgefährdung auf Ebene der Bodenregionen aggregiert und der Index der potentiellen Winderosionsgefährdung der Ackerflächen auf der regionalen Ebene diskutiert.

In den Analysen zur potentiellen Gefährdung der Bodenregionen durch Wassererosion und der Ackerflächen durch Winderosion gingen Niederschlag, Klimatische Wasserbilanz und mittlere Windgeschwindigkeit als Klimavariablen ein sowie die gegenwärtige potentielle Gefährdung der Mineralböden durch Wassererosion bzw. der Bodenarten durch Winderosion. Die Folgen zunehmender Erosion haben jedoch komplexe Ursachen und vielfältig Auswirkungen auf die Bodenbeschaffenheit, die Bodenfunktionen und -prozesse und sind von weiteren klimatischen, topografischen (z.B. Orographie), pedologischen Faktoren (z.B. Humusart) und agronomischen (z.B. Bodenbearbeitung) Rahmenbedingungen abhängig. Letztere können durch den Erosionsschutzfaktor oder den Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor der ABAG ausgedrückt werden (s. ABAG. Formel 3.2.1). So steuern an bewachsenen Hängen Pflanzen die Art und Intensität des auf den Boden aufkommenden Niederschlages sowie die sich anschließenden Prozesse und Wege der Abflussbildung und des Abtrages von Bodenmaterial; ein hoher Bedeckungsgrad kann

daher erosionsmindernd wirken (Neumeister 2007). Somit ist ein Auftreten von Starkregen nicht zwangsläufig mit Erosionsprozessen verbunden. Die vorliegende Analyse schätzt daher die potentielle Erosionsgefährdung ab, nicht jedoch die tatsächliche.

In die Berechnung der potentiellen Wassererosionsgefährdung gingen Jahresmittelwerte des Starkniederschlages ein. Es bestehen jedoch starke saisonale Unterschiede (siehe auch Anhang zu Kapitel 3.2). Nach Wurbs (2007) nehmen die Starkniederschlagsereignisse in Sachsen-Anhalt vor allem im Winter eher zu und im Sommer ab. Nach der hier verwendeten Definition von Starkregenereignissen ( $\geq 10\text{mm}$  Niederschlag/Tag), treten im Winter in weiten Teilen des Landes zunächst leichte Rückgänge des Starkniederschlages bis Mitte des Jahrhunderts auf, während ab dem Zeitraum 2041-2070 (Modell REMO) bzw. 2071-2100 (Modell WETTREG) leichte Zunahmen vorkommen. Im Sommer zeigen die Projektionen des Modells WETTREG meist zunächst leichte Zunahmen des Starkniederschlages, während ab dem Zeitraum 2041-2070 leichte Abnahmen überwiegen. Die Daten des Modells REMO zeichnen ein ähnliches Bild, jedoch treten die Abnahmen insbesondere in den Projektionen des Szenarios B1 großflächig erst ab dem Zeitraum 2071-2100 auf und die Altmark ist gegen Ende des Jahrhunderts unter dem Szenario A1B besonders und stärker als nach dem Modell WETTREG betroffen. Räumlich besonders durch die Veränderungen des Starkniederschlages gefährdet sind, modell-, szenarien- und zeitraumübergreifend, der Harz und der Nordosten Sachsen-Anhalts.

Starkniederschlagsereignisse können jedoch nicht nur zwischen den Jahreszeiten variieren. Der Starkniederschlag ist ein Extremereignis, bei welchem die Regenmenge und der Zeitraum des Ereignisses sowie die Art des Niederschlags von großer Bedeutung sind (Neumeister 2007) und kleinräumig in kurzer Zeit auftreten kann. Aufgrund der vorhandenen Modellunsicherheiten wurde der Starkniederschlag jedoch auf Tagesbasis denn Stundenbasis ausgewertet. Der Vergleich des simulierten Niederschlags in der Vergangenheit der Klimamodelle WETTREG und REMO mit den gemessenen Werten zeigt eine deutliche Überschätzung durch REMO (siehe Kapitel 2.6). Daher sind Ergebnisse aus Niederschlagsanalysen ohne vorangehende Korrekturen nach dem Modell WETTREG aussagekräftiger als nach dem Modell REMO.

In der Analyse zur Berechnung der potentiellen Gefährdung durch Wasser- und Winderosion wurden Gewichtungen zur Erstellung der Gefährdungsindices vorgenommen. Die Gewichtung könnte in zukünftigen Analysen für Sachsen-Anhalt für spezifische Bodenstandorte auf Basis von empirischen Erosionsschadensflächen spezifiziert und validiert werden.

### 3.2.4. Anpassungsoptionen

Die Ressource Boden ist einerseits von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Andererseits kann der Boden beispielsweise durch seine Rolle als Kohlenstoffspeicher den Klimawandel beeinflussen. Hinzu kommt, dass der Boden als Lebensraum und Ressource unersetzlich ist und Prozesse der Bodenbildung innerhalb sehr langer Zeiträume ablaufen. Daher kann der Boden als nicht regenerative Ressource eingestuft werden, eine Verschlechterung ist deshalb unbedingt zu vermeiden (Europäische Kommission 2006). Darüber hinaus hat der Boden als Lebensgrundlage viele systemische Funktionen, die außer

der Agrar- und Forstwirtschaft auch das Wassermanagement oder Filterfunktionen betreffen. Bodeneigenschaften und -zustand sind daher für viele Sektoren von höchster Relevanz (s.a. Kapitel 3.3, Landwirtschaft und Kapitel 3.4. Forstwirtschaft). Der Schutz des Bodens vor den Auswirkungen des Klimawandels ist daher u.a. eigenständiges Thema der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) und verschiedener regionaler, nationaler und europaweiter Studien sowie Forschungsprojekte (s. a. Box 3.2.2).

Der anthropogene Einfluss auf natürliche Bodenfunktionen ist in dicht besiedelten Regionen Europas hoch. Gleichzeitig ist Boden eine lebensnotwendige Ressource, deren Zustand eine relevante ökonomische Komponente/Ressource darstellt. Die Abwägung von Anpassungsmaßnahmen sollte daher unter Berücksichtigung aller aktuell und zukünftig erkennbaren Stressfaktoren und Wechselwirkungen erfolgen.

Adäquate Anpassungsoptionen richten sich nach der Ausprägung der Klimawirkung. Zudem existieren zahlreiche Maßnahmen, die historisch zwar nicht als Anpassung an den Klimawandel bezeichnet wurden, aber eine Reaktion auf veränderte Umwelt- und ökonomische Rahmenbedingungen darstellen, und mit ihren Wirkungen auch bei klimarelevanten Fragestellungen herangezogen werden müssen. Eine Übersicht über mögliche Anpassungsempfehlungen ist in Box 3.2.1 zu finden.

*Box 3.2.1: Anpassungsempfehlungen im Bereich Boden*

- Schonende Bodenbearbeitungsmethoden, standortangepasste Fruchtfolgen zur Reproduktion der organischen Bodensubstanz und kürzere Brachezeiten können negativen Folgen des Klimawandels auf den Boden entgegenwirken (Mosier 1998; Van-Camp et al. 2004).
- Die Erhaltung und Wiedervernässung von Feuchtgebieten und hydromorpher Böden sichert wertvolle Kohlenstoffsinken und leistet damit einen Beitrag für den Klimaschutz (Succow & Joosten 2001; Whiting & Chanton 2001; Moore 2002). Für Sachsen-Anhalt ist die Erhaltung oder Wiederherstellung entsprechender Bedingungen unter dem Aspekt der Verfügbarkeit der erforderlichen Wasserressourcen zu analysieren.
- Landnutzungswandel gilt global als Hauptursache für CO<sub>2</sub>-Emissionen in Böden (Schils et al. 2008), insbesondere bei der Umwandlung von Forst- oder Grünlandböden in Ackerland (Mosier 1998; Van-Camp et al. 2004). Das zukünftige Flächenmanagement Sachsens-Anhalts sollte die Senkenfunktion der Böden standortdifferenziert und –angepasst berücksichtigen.
- Die Anpassung landwirtschaftlicher Anbauphasen, wasser- und winderosionsmindernde Maßnahmen (z.B. Verringerung von Zeiten ohne Bodenbedeckung und Mulchsaat, Heckenstreifen zur Reduzierung von Hanglängen und Windschutzpflanzungen, Pflügen quer zur Hang- bzw. Windrichtung) sowie Bodenmonitoring bezüglich der Entwicklung von Erosionsraten sind weitere Empfehlungen (MLU 2009).
- Die mit dem Klimawandel verbundenen Veränderungen des Landschaftshaushaltes und der Gewässer erfordern in besonderem Maße die Vermeidung schädlicher Entwicklungen, die über den Boden vermittelt werden. Zu nennen sind die Vermeidung von Bodenversauerung, Schadstoffeinträge in Böden, Stoffausträge aus dem Boden in Grund- und Oberflächengewässer sowie die Erhaltung und Rückgewinnung der Ressource Boden durch Vermeidung von Flächenversiegelung und Entsigelung (Mahrenholz 2008).
- Aufbau und Optimierung bodenspezifischer Monitoringsysteme bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf Bodeneigenschaften, -funktionen und -biodiversität (Gardi et al. 2009).

### 3.2.5. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf

Analysen zur zukünftigen Entwicklung der Erosionsgefährdung in Sachsen-Anhalt sollten die im Land vorhandene Datengrundlage sektorübergreifend einbeziehen, beispielsweise zusätzlich zu den betrachteten Klimavariablen weitere relevante Einflussfaktoren wie Veränderungen des Bodengefüges und der Landnutzung. Weitere Einflüsse auf Böden neben den in der vorliegenden Analyse untersuchten Einflussgrößen konnten jedoch im Rahmen dieser Studie, welche eine erste Abschätzung der potentiellen Gefährdung durch Wasser- und Winderosion leistet, nicht betrachtet werden.

Starkniederschlagsereignisse können zeitlich und räumlich begrenzt auftreten, so dass zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Niederschlagsdaten zur Anwendung kommen sollten. Die zur Zeit mögliche Aussage ist jedoch durch die verfügbare räumliche Auflösung

der Klimamodelle sowie die Modellunsicherheiten der Regionalen Klimamodelle WETTREG und REMO begrenzt.

Landesspezifische Daten und Studien zu Erosionsflächen, insbesondere mit Bezug auf Starkregen- und Sturmereignisse können eine wichtige analytische Informationsgrundlage darstellen. Die Bodenzustandserhebung und das Bodenmonitoring, ebenso wie die Flächen der Bodendauerbeobachtung (BDF) und der Bodenzustandserhebung (BZE) Wald sind in diesem Zusammenhang als Datenquelle exemplarisch zu erwähnen (UBA 2008). Monitoringsysteme bezüglich des Bodenkohlenstoffs sowie der Landnutzung und des Landnutzungswandels sind auf Ebene der EU27 als wesentlich identifiziert aber qualitativ und quantitativ noch unzureichend, um verlässliche Aussagen zu den Veränderungen des Bodenkohlenstoffs zu treffen und sollten standardisiert und ausgebaut werden. (EC 2009)

Zu den Folgen des Klimawandels auf Böden sind bisher nur qualitative Aussagen möglich. Bedingt ist dies unter anderem durch die Komplexität des Systems Boden, einschließlich der internen Regelkreise und Rückkopplungsmechanismen (UBA 2008) sowie der internen Vernetztheit mit anderen Sektoren (Nutzungsabhängigkeit). Zur Erhöhung der Sicherheit erforderlicher Aussagen für die gezielte Konzipierung und das Management von Maßnahmen sind regionale Datenerhebungen und -studien erforderlich.

Obwohl bei der Untersuchung der Auswirkung des Klimawandels auf Bodenorganismen ein wachsendes Interesse zu erkennen ist, wurde dieser Themenbereich in der Vergangenheit eher weniger betrachtet (Gardi et al. 2009). Es besteht noch großer Forschungsbedarf zur Kennzeichnung der Abhängigkeit der Bodenbiodiversität von den Faktoren Bodentyp, Landnutzung und Landnutzungsmanagement sowie der Beeinflussung durch die Klimaveränderung.



*Box 3.2.2: Weiterführende Informationen zum Bodensektor***UBA-FuE-Vorhaben: „Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser“**

Dieses Projekt ist Teil des Vorhabens „Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden“ (FKZ 3708 71 205) und beinhaltet die großräumige Bewertung nutzungsabhängiger Bodengefährdungen.

**Projektlaufzeit:** 2008-2010

**Ansprechpartner:** Jeannette Mathews, Stephan Marahrens, Dr. Frank Glante (UBA);  
Dr. Daniel Wurbs, Dr. Markus Möller, Dr. Thomas Koschitzki (geoflux GbR);  
Dr. Michael Steininger (MISB Halle Saale)

**„Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion in vulnerablen Regionen – Beispiel Sachsen-Anhalt – und hieraus erwachsender Konsequenzen für eine Regionalisierung der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG)“**

Vor dem Hintergrund klimawandelbedingt erhöhter erosiver Niederschlagsereignisse und der daraus resultierenden erhöhten Gefahr für Bodenabtrag, Bodenfunktionsverluste und diffuse Stoffeinträge in Gewässer untersucht dieses Projekt räumliche Aussagen zur Betroffenheit des Bodens.

**Projektlaufzeit:** 2008-2009

**Ansprechpartner:** Prof. Dr. Manfred Frühauf, Dr. Wolfram König, Dr. Gerd Schmidt (M.-L.-Universität Halle-Wittenberg); Dr. Daniel Wurbs (geoflux GbR Halle)

**Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)**

Die LABO ist ein Arbeitsgremium der Umweltministerkonferenz, welches die Entwicklung des Bodenschutzes und des Bodenschutzrechts begleitet und den Erfahrungsaustausch zwischen dem Bund und den Ländern unterstützt.

**Link:** <http://www.labo-deutschland.de/>

**„BOKLIM- Bodendaten in der Klimaforschung“**

Das Projekt steht im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie zum Klimawandel (DAS). Ziele sind die Verbesserung des Einsatzes von Bodendaten sowie die Datenverfügbarkeit, die Vernetzung vorhandener Monitoringinstrumente und die Unterstützung bei der Fortschreibung der DAS, Handlungsfeld Boden.

**Link:** <http://www.boklim.de/boklimPublic/index.html>.

**“Integrated DFG Project “Regional Climate Change”: Application of Mid-Infrared Spectroscopy for parameterization of soil carbon turnover models on a regional scale”**

Untersucht werden Struktur und Funktionen von Agrarlandschaften unter Klimawandel in Europa, Deutschland und Baden-Württemberg sowie um Prozessverständnis und Prognosen.

**Link:** <https://oez.uni-hohenheim.de/66871.html?typo3state=projects&lsfid=1699>

**Projektlaufzeit:** 01.07.2008-30.06.2011

**Förderkennzeichen:** DFG: CA598/2-1 & PAK 346

**Projektpartner:** Universität Hohenheim, Helmholtz-Zentrum München

**Ansprechpartner:** Prof. Dr. Thilo Streck (Universität Hohenheim, Sprecher), PD Dr. Andreas Klumpp (Universität Hohenheim, Koordination)

**“CONSIDER- Conservation of Soil Organism Diversity under Global Change”**

CONSIDER ist ein Netzwerk der Europäischen Union mit dem Ziel, Methodiken zum Erhalt der Bodenbiodiversität zu untersuchen.

**Link:** <http://www.zi.ku.dk/consider/>

**„Terrestrische Umwelt – Strategien für einen nachhaltigen Umgang mit Klimawandel und globalem Wandel“**

Dieses Programm soll Strategien aufzeigen, die eine nachhaltige Nutzung der grundlegenden Ressourcen des menschlichen Lebens ermöglichen, und somit die natürliche Grundlage für das Leben und die Gesundheit des Menschen und dessen wirtschaftliche Entwicklung sichern.

**Link:** <http://www.ufz.de/index.php?de=17857> (Stand Oktober 2009)

**Ansprechpartner:** Prof. Dr. Bernd Hansjürgens (UFZ), Dr. Cathrin Brüchmann (Helmholtz-Gesellschaft)

### 3.2.6. Literatur

- Arnell, N., L. Chunzhen, R. Compagnucci, L. Da Cunha, K. Hanaki, C. Howe, G. Mailu, I. Shiklomanov und E. Stakhiv (2001): "Hydrology and Water Resources. ." In: J. J. McCarthy, F. C. Osvaldo, N. A. Leary, D. J. Dokken und K. S. White: "Climate Change 2001. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 4." Cambridge, Cambridge University press. Vol. 4: 193-233.
- Arnell, N. W. (1999): "The effect of climate change on hydrological regimes in Europe. A continental perspective." *Global Environmental Change* 9: 18.
- Ayres, E., D. H. Wall, B. L. Simmons, C. B. Field, D. G. Milchunas, J. A. Morgan und J. Roy (2008): "Belowground nematode herbivores are resistant to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations in grassland ecosystems." *Soil Biology & Biochemistry* 40(4): 978-985.
- BBodSchG (1998): "Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214) geändert worden ist."
- Beinhauer, R. und B. Kruse (1994): "Soil erosivity by wind in moderate climates." *Ecological Modelling* 75/76: 14.
- Bick, H. (1999): "Funktionelle Gliederung des Organismenbestandes." In: H. Bick: "Grundzüge der Ökologie." Heidelberg, Berlin, Spektrum Akademischer Verlag. Vol. 3.: 368.
- Billen, N. und E. Angenendt (2008): "Bewertung von Bewirtschaftungsstrategien zur CO<sub>2</sub>-Bindung in Böden." UBA-Workshop: "Böden im Klimawandel - Was tun?!" 22./23.1.2008, Forum II. Umweltbundesamt. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3495.pdf>.
- Blum, W. H. E. (2005): "Soils and Climate Change." *JSS- J Soils & Sediments* 5(2): 67-68.
- Brabson, B. B., D. H. Lister, P. D. Jones und J. P. Palutikof (2005): "Soil moisture and predicted spells of extreme temperatures in Britain." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 110(D5).
- Breure, A. M. (2004): "Soil biodiversity: Measurements, indicators, threats and soil functions." I International Conference SOIL AND COMPOST ECO-BIOLOGY. León - Spain.
- Davidson, E. A. und I. A. Janssens (2006): "Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change." *Nature* 440(9): 165-173.
- Dunger, W. (1998): "Böden und Bodentiere als wechselseitiges Bedingungsgefüge." In: Sächsische Akademie für Natur und Umwelt in der Sächsischen Landesstiftung Natur und Umwelt: "Der Schutz des Bodens als gemeinsame Aufgabe von Bodenschutz und Naturschutz." Dresden: 71-78.
- EC - European Commission (2009): "Review of existing information on the interrelations between soil and climate change." CLIMSOIL final report to the European Commission. Alterra Wageningen UR The Netherlands (Hrsg.). European Commission. [http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/climsoil\\_report\\_dec\\_2008.pdf](http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/climsoil_report_dec_2008.pdf).

- EC (2009): "Review of existing information on the interrelations between soil and climate change." CLIMSOIL final report to the European Commission. Alterra Wageningen UR The Netherlands (Hrsg.). European Commission (EC).  
[http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/climsoil\\_report\\_dec\\_2008.pdf](http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/climsoil_report_dec_2008.pdf).
- EEA (2009): "Soil and climate change." European Environment Agency (EEA). Letzter Zugriff am: 07.11.2009 2009,  
<http://www.eea.europa.eu/themes/soil/climate/soil-and-climate-change>.
- Europäische Kommission (2006): "Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Thematische Strategie für den Bodenschutz."
- Fang, C. und J. B. Moncrieff (2001): "The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature." *Soil Bio. Biochem.* 33: 155-165.
- Fischer, E. M., S. I. Seneviratne, P. L. Vidale, D. Lüthi und C. Schär (2007): "Soil Moisture-Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave." *Journal of Climate* 20(20): 5081-5099.
- Fitter, A. H., A. Heinemeyer und P. L. Staddon (2000): "The impact of elevated CO<sub>2</sub> and global climate change on arbuscular mycorrhizas: a mycocentric approach." *New Phytologist* 147(1): 179-187.
- Gardi, C., L. Montanarella, D. Arrouays, A. Bispo, P. Lemanceau, C. Jolivet, C. Mulder, L. Ranjard, J. Römbke, M. Rutgers und C. Menta (2009): "Soil biodiversity monitoring in Europe: Ongoing activities and challenges." *European Journal of Soil Science* 60(5): 807-819
- 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.
- Helbig, H. (2005): "Potentielle Erosionsgefährdung der Mineralböden durch Wind." aktefa310506. Halle, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) - Dezernatgruppe Bodenkunde, Dr. Henrik Helbig, . Bodenkundliche Themenkarten von Sachsen-Anhalt im Maßstab 1:50.000 – Potenzielle Erosionsgefährdung der Mineralböden durch Wind (ausgehend vom aktuellen Bodenwasserhaushalt, Arbeitsstand 31.05.2006 S.
- Helbig, H. (2008): "Räumliche und zeitliche Dimension der Bodenerosion durch Wasser in Sachsen-Anhalt." Bodenerosion - Grundlagen und Handlungsstrategien für den Boden- und Gewässerschutz in Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Holsten, A., T. Vetter, K. Vohland und V. Krysanova (2009): "Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas." *Ecological Modelling* 220(17): 2076-2087.
- IPCC (2007): "Couplings Between Changes in the, Climate System and Biogeochemistry." Climate Change 2007: "The Physical Science Basis". Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge,  
<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter7.pdf>.
- Jasper, K., P. Calanca und J. Fuhrer (2006): "Changes in summertime soil water patterns in complex terrain due to climatic change." *Journal of Hydrology* 327(3-4): 550-563.
- Jopp, F. und S. Pieper (2008): " Bodenzoologie und Ökologie in Berlin: Ein Überblick über 30 Jahre Umweltforschung an der Freien Universität Berlin." In: F. Jopp und S. Pieper: "Bodenzoologie und Ökologie in Berlin: Ein Überblick über 30 Jahre Umweltforschung an der Freien Universität Berlin. Theorie in der Ökologie Band 12." Frankfurt/M.
- Kainz, W. (1999): "Die Bodenlandschaften und Böden." In: W. Kainz, P. String, M. Weller et al: " Bodenatlas Sachsen-Anhalt, Teil I." Halle (Saale), Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt: 33.
- KTBL (2005): "Getreide." In: H. Döhler: "Faustzahlen für die Landwirtschaft " Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). Vol. 13: 301-309.
- Kuntze, H., G. Roeschmann und G. Schwerdtfeger (1994a): "Lebensweise und Bedeutung der Flora im Boden." In: H. Kuntze, G. Roeschmann und G. Schwerdtfeger: "Bodenkunde." Stuttgart, Ulmer- UTB für Wissenschaft Vol. 5: 424.

- Kuntze, H., G. Roeschmann und G. Schwerdtfeger (1994b): "Winderosion." In: H. Kuntze, G. Roeschmann und G. Schwerdtfeger: "Bodenkunde." Stuttgart, Ulmer- UTB für Wissenschaft Vol. 5: 424.
- LAGB (2006): "Bodenbericht 2006. Böden und Bodeninformation in Sachsen-Anhalt." Landesamt für Geologie und Bergbauwesen Sachsen-Anhalt. Halle (Saale).
- Larink, O. und S. Schrader (2003): "Hoher Druck und die Luft ist raus - Bodenverdichtung, Bodentiere und nachhaltige Landwirtschaft." *Carolo-Wilhelmina, Forschungsmagazin der Technischen Universität Braunschweig* 1/2003: 20-25.
- Lindroth, A., A. Grelle und A. S. Moren (1998): "Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity." *Global Change Biology* 4(4): 443-450.
- Mahrenholz, P. (2008): "Arbeiten an der Nationalen Strategie zur Klimaanpassung." UBA-Workshop: "Böden im Klimawandel - Was tun?!" 22./23.1.2008, Forum II. Umweltbundesamt. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3495.pdf>.
- MLU (2009): "Entwurf der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel." Fach- und ressortübergreifende Arbeitsgruppe „Anpassung an den Klimawandel". Magdeburg, Ministerium für Landwirtschaft Umwelt Sachsen-Anhalt (MLU). 81 S.
- Moore, P. D. (2002): "The future of cool temperate bogs." *Environmental Conservation* 29(1): 3-20.
- Mosier, A. R. (1998): "Soil processes and global change." *Biol Fertil Soils* 27(3): 221-229.
- Neumeister, H. (2007): "Bodenabtrag (Bodenerosion) als weltweit bedeutendes landschaftsbedrohendes und wirtschaftliches Problem." *Leipziger Geowissenschaften* 18: 31-58.
- Ninisto, S. M., J. Silvola und S. Kellomäki (2004): "Soil CO<sub>2</sub> efflux in a boreal pine forest under atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment and air warming." *Global Change Biology* 10(8): 1363-1376.
- Nortcliff, S. (2009): "The Soil: Nature, Sustainable Use, Management, and Protection - An Overview." *Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society* 18(1): 58-68.
- Oldeman, L. R. (1992): "Global Extent of Soil Degradation." ISRIC Bi-Annual Report 1991-1992. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- Oldeman, L. R., R. T. A. Hakkeling und W. G. Sombroek (1991): "Global Assessment of Soil Degradation GLASOD. World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation - An Explanatory Note." Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC) (Hrsg.).
- Pieper, S. und G. Weigmann (2009): "Interactions between isopods and collembolans modulate the mobilization and transport of nutrients from urban soils." *Applied soil ecology* 39(2): 109-126.
- Post, J., T. Conradt, F. Suckow, V. Krysanova und F. Hattermann (2008): "Integrated assessment of cropland soil carbon sensitivity to recent and future climate in the Elbe River basin." *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 53(5): 1043-1058.
- Ravi, S., P. D'Odorico, T. M. Over und T. M. Zobeck (2004): "On the effect of air humidity on soil susceptibility to wind erosion: The case of air-dry soils." *Geophysical Research Letters* 31(9): 4.
- 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)." Agric. Handbook. Vol. 703. U.S. Dept. of Agriculture. 404 S.
- Roithmeier, O. und S. Pieper (2009): "Influence of Enchytraeidae (Enchytraeus albidus) and compaction on nutrient mobilization in an urban soil." *Pedobiologia* 53(1): 29-40.
- Ruess, L., A. Michelsen, I. K. Schmidt und S. Jonasson (1999): "Simulated climate change affecting microorganisms, nematode density and biodiversity in subarctic soils." *Plant and Soil* 212(1): 63-73.

- Schaphoff, S., W. Lucht, D. Gerten, S. Sitch, W. Cramer und I. C. Prentice (2006): "Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections." *Climatic Change* 74: 97-122.
- Scheffer, F. und P. Schachtschabel (2002): "Lehrbuch der Bodenkunde." 15. Ausg. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.
- Schils, R., P. Kuikman, J. Liski, M. v. Oijen, P. Smith, J. Webb, J. Alm, Z. Somogyi, J. v. d. Akker, M. Billett, B. Emmett, C. Evans, M. Lindner, T. Palosuo, P. Bellamy, J. Alm, R. Jandl und R. Hiederer (2008): "Review of existing information on the interrelations between soil and climate change - ClimSoil Project." Alterra, Wageningen UR, The Netherlands, CEH, United Kingdom, SYKE, Finland, UNAB, United Kingdom.  
[http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/climsoil\\_report\\_dec\\_2008.pdf](http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/climsoil_report_dec_2008.pdf).
- Schimel, D. S., B. H. Braswell, E. A. Holland, R. McKeown, D. S. Ojima, W. J. Painter und A. R. Townsend (1994): "Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils." *Global Biogeochemical Cycles* 8(3): 279-293.
- Schlesinger, W. H. und J. A. Andrews (2000): "Soil respiration and the global carbon cycle." *Biogeochemistry* 48(1): 7-20.
- Schlesinger, W. H., J. F. Reynolds, G. L. Cunningham, L. F. Huenneke, W. M. Jarrell, R. A. Virginia und W. G. Whitford (1990): "Biological feedbacks in global desertification." *Science* 247(4946): 1043-1048.
- Schröter, D., W. Cramer, R. Leemans, I. C. Prentice, M. B. Araujo, N. W. Arnell, A. Bondeau, H. Bugmann, T. R. Carter, C. A. Gracia, A. C. de la Vega-Leinert, M. Erhard, F. Ewert, M. Glendining, J. I. House, S. Kankaanpää, R. J. T. Klein, S. Lavorel, M. Lindner, M. J. Metzger, J. Meyer, T. D. Mitchell, I. Reginster, M. Rounsevell, S. Sabate, S. Sitch, B. Smith, J. Smith, P. Smith, M. T. Sykes, K. Thonicke, W. Thuiller, G. Tuck, S. Zaehle und B. Zierl (2005): "Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe." *Science* 310(5752): 1333-1337.
- Schulp, C. J. E., G.-J. Nabuurs und P. H. Verburg (2008): "Future carbon sequestration in Europe—Effects of land use change." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 127: 251-264.
- Schwertmann, U., Vogl, W., Kainz, M. (1990): "Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen." 2. Ausg. Eugen Ulmer GmbH & Co. Stuttgart.
- Smith, J., P. Smith, M. Wattnebach, S. Zähle, R. Hedderer, R. Jones, L. Montanarella, M. Rounsevell, I. Reginster und F. Ewert (2005): "Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990-2080." *Global Change Biology* 11(12): 2141-2152.
- Stolbovoy, V., B. Maréchal, A. Jones, Rusco E. und L. Montanarella (2008): "Climate change: soil can make a difference!" Climate change – can soil make a difference? Brussels, Thursday 12th June 2008.
- Succow, M. und H. Joosten (2001): "Landschaftsökologische Moorkunde." 2. Ausg. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 622 S.
- Swift, M. J., O. Andren, L. Brussaard, M. Briones, M. M. Couteaux, K. Ekschmitt, A. Kjöller, P. Loiseau und P. Smith (1998): "Global change, soil biodiversity, and nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: three case studies." *Global Change Biology* 4(7): 729-743.
- Trumbore, S. (2006): "Carbon respired by terrestrial ecosystems – recent progress and challenges." *Global Change Biology* 12(2): 141-153.
- UBA (2008): "UBA-Workshop "Böden im Klimawandel - Was tun?!" am 22./23. Januar 2008. Texte 25/08."
- Van-Camp, L., B. Bujarrabal, A. R. Gentile, R. J. A. Jones, L. Montanarella, C. Olazabal und S. Selvaradjou (2004): "Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection." Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg,  
[http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/esdb\\_archive/Policies/STSWeb/vol3.pdf](http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/Policies/STSWeb/vol3.pdf).
- Wardle, D. A., H. A. Verhoef und M. Clarholm (1998): "Trophic relationships in the soil microfoodweb: predicting the responses to a changing global environment." *Global Change Biology* 4(7): 713-727.



- WBB - Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz (2000): "Wege zum vorsorgenden Bodenschutz. Fachliche Grundlagen und konzeptionelle Schritte für eine erweiterte Boden-Vorsorge. Gutachten des wissenschaftlichen Beirats Bodenschutz beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit." Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), (Hrsg.). Berlin, [http://www.landkreis-miltenberg.de/sv/Sg43/formulare/wbb\\_denkschrift.pdf](http://www.landkreis-miltenberg.de/sv/Sg43/formulare/wbb_denkschrift.pdf).
- Weigel, H. J., A. Pacholski, K. Waloszczyk, C. Frühauf, R. Manderscheid, T. H. Anderson, O. Heinemeyer, B. Kleikamp, M. Helal, S. Burkart, S. Schrader, C. Sticht und A. Giesemann (2006): "Spurenstoffaustausch zwischen der bodennahen Atmosphäre und ackerbaulich genutzten Flächen: Erfahrungen aus dem Braunschweiger Kohlenstoffprojekt." UBA-Workshop: Klimaänderungen - Herausforderungen für den Bodenschutz. 28./29.09.2005. Umweltbundesamt. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3495.pdf>.
- Whiting, G. J. und J. P. Chanton (2001): "Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration." *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 53(5): 521-528.
- Wurbs, D. (2005): "Vergleichende Untersuchungen zu den Folgewirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt in Flusseinzugsgebieten." Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät. Halle-Wittenberg, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg: 209 S.
- Wurbs, D. (2007): "Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion in vulnerablen Regionen Sachsen-Anhalts. Verknüpfung der Ergebnisse regionaler Klimamodelle mit dem R-Faktor der ABAG. Pilotstudie für das Flusseinzugsgebiet der Salza - Abschlussbericht."
- Yadav, V. und G. Malanson (2007): "Progress in soil organic matter research: litter decomposition, modelling, monitoring and sequestration." *Progress in Physical Geography* 31(2): 131-154.

### 3.3. Landwirtschaft

**Kernaussagen:**

Der Klimawandel führt in den betrachteten Szenarien nicht zu deutlichen Änderungen in den simulierten mittleren klimatischen Ertragspotenzialen für Silomais und Winterweizen. Wenn Ertragsrückgänge auftreten, dürften sie durch den CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt weitgehend kompensiert werden. Für den Raps wurden deutlichere Ertragsrückgänge simuliert, die aus statistischer Sicht jedoch weniger belastbar sind als die Ergebnisse, die sich für Weizen und insbesondere Mais ergeben. Die für einzelne Regionen erhaltenen Ergebnisse deuten auf Ertragsvorteile der Schwarzerderegion und in geringerem Umfang der Altmark bei Eintritt des postulierten Klimawandels hin.

Für die Abschätzung der Szenarieneffekte wurden statistische Modelle genutzt, die an Praxisdaten der Vergangenheit parametrisiert wurden. Ergänzende Untersuchungen mit dynamischen Ertragsmodellen sind wünschenswert, um die gefundenen Wirkungszusammenhänge abzusichern.

Im Zusammenhang mit der großen Bedeutung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes für die Sicherung eines stabilen Ertragsniveaus ist darauf zu verweisen, dass dieser nur bei ausreichender Stickstoffversorgung der Pflanzen realisiert werden kann. Die Erhöhung der Düngungseffizienz stellt aus dieser Sicht eine wichtige Anpassungsmaßnahme dar, da davon auszugehen ist, dass sich der Einsatz von Stickstoffdünger in den nächsten Jahren nicht zuletzt aus Klimaschutzgründen erheblich verteuern wird. Die relative Wirksamkeit des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes ist unter Wasserstress größer als unter Bedingungen ausreichender Wasserversorgung.

Die Ausdehnung und Intensivierung empirischer Beobachtung zu Klima-Ertrag Wirkungszusammenhängen im Rahmen von Feldversuchen, Sortenprüfungen, und betrieblichen Erhebungen und daran anknüpfende regelmäßige statistische Analysen sind zentrale Anpassungsmaßnahmen gegenüber dem Klimawandel, die zum heutigen Zeitpunkt empfohlen werden können.

#### 3.3.1. Fragestellung

Steigende Temperaturen führen zu einem Anstieg der potenziellen Verdunstung. In Kombination mit möglichen Niederschlagsrückgängen kann die Ertragsfähigkeit sowohl der Sommer- als auch der Winterkulturen auf den Ackerstandorten negativ beeinflusst werden. Kompensierend wirkt hierbei der Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration, welche neben ihrer mittelbaren Wirkung über das Klima auch unmittelbar das Pflanzenwachstum beeinflusst. Ein Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration führt über eine höhere Photosyntheseleistung und einen Anstieg der Wassernutzungseffizienz zu einer Ertragssteigerung. Im Folgenden soll abgeschätzt werden, welche Folgen verschiedene Klimaszenarien auf die klimatischen Ertragspotenziale der Ackerstandorte Ostdeutsch-

lands haben. Exemplarisch werden hierzu die Kulturen Winterweizen, Winterraps und Silomais betrachtet. Die Ertragspotenziale beziehen sich auf die gegenwärtig in der landwirtschaftlichen Praxis dominierenden Anbautechnologien und Sorten. Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und dem technologischen, insbesondere dem züchterischen Fortschritt werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung erfolgt unter Nutzung von statistischen Ertragsmodellen. Der Darstellung und Diskussion von Simulationsergebnissen sind Betrachtungen zur historischen Ertragsentwicklung der Landeserträge, der regionalen Differenzierung der Erträge und den in der Vergangenheit beobachteten Zusammenhängen zwischen Klima und Ertrag vorangestellt.

### 3.3.2. Ertragsentwicklung und Projektion

Das Land Sachsen-Anhalt gehört mit Ausnahme der Harzregion zu den trockensten Gebieten Deutschlands. Gleichzeitig besitzt es einen größeren Flächenanteil von Schwarzerdeböden, auf denen stabil hohe Erträge erzielt werden können. Winterweizen, Winterraps und Silomais sind zentrale Kulturen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Die Produktivitätserwartung für diese Kulturen ist ein wichtiger Indikator für die Zukunftsaussichten der Landwirtschaft in Sachsen-Anhalt unter Klimawandel.

In Abb. 3.3.1 ist die historische Ertragsentwicklung der Landeserträge für Winterweizen, Winterraps und Silomais dargestellt.

#### Winterweizen

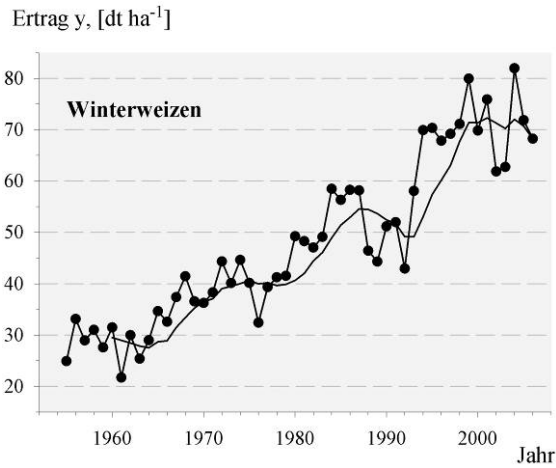
Im Zeitraum 1961-1990 stieg der Absolutertrag von 20,4 dt ha<sup>-1</sup> im Jahr 1961 auf 51,6 dt ha<sup>-1</sup> im Jahr 1990. Der mittlere jährliche Ertragsanstieg lag in diesem Zeitraum bei 0,7 %. Nach 1990 setzte sich der Ertragsanstieg fort. Das mittlere Ertragsniveau stieg weiter auf 66 dt ha<sup>-1</sup>. Die mittlere jährliche Ertragssteigerung ((y' - 1)\*100%), Abb. 3.3.1) betrug 0,6 %.

#### Silomais

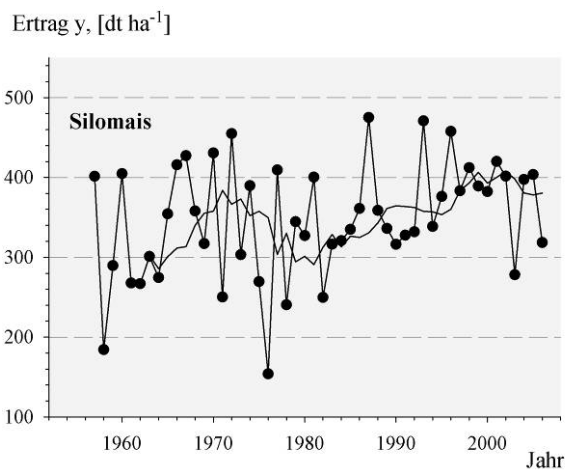
In der Periode von 1961 bis 1990 schwankten die Silomaiserträge zwischen 157 dt ha<sup>-1</sup> (1976) und 475 dt ha<sup>-1</sup> (1987). In der Periode 1991-2006 wurde ein durchschnittlicher Silomaisertrag von 378 dt ha<sup>-1</sup> erreicht. Die mittlere jährliche relative Ertragssteigerung für diesen Zeitraum war vernachlässigbar.

#### Winterraps

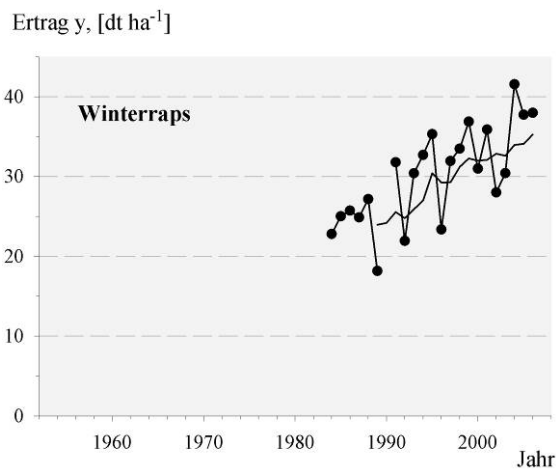
Von 1984 bis 1990 lagen die Winterrapsenerträge in Sachsen-Anhalt im Durchschnitt bei 24,6 dt ha<sup>-1</sup>. Der Absolutertrag variierte in diesem Zeitraum von 18,4 dt ha<sup>-1</sup> bis 27,9 dt ha<sup>-1</sup>. Insbesondere die Einführung von Hybridrapssorten Mitte der 90er Jahre trug zu einem Anstieg des Winterrapsenertrages auf 38,6 dt ha<sup>-1</sup> im Jahr 2006 bei. Die relative Ertragsänderung während der Jahre 1991-2006 lag bei 0,6% jährlich.



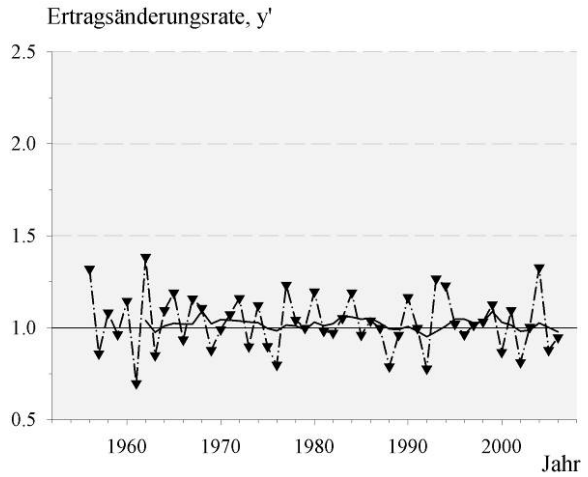
a)



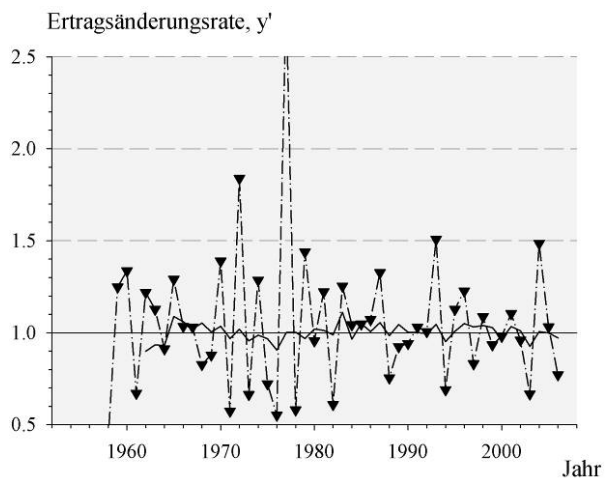
c)



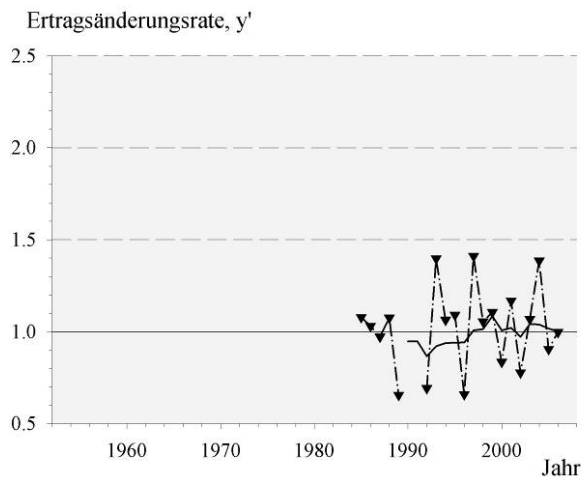
e)



b)



d)

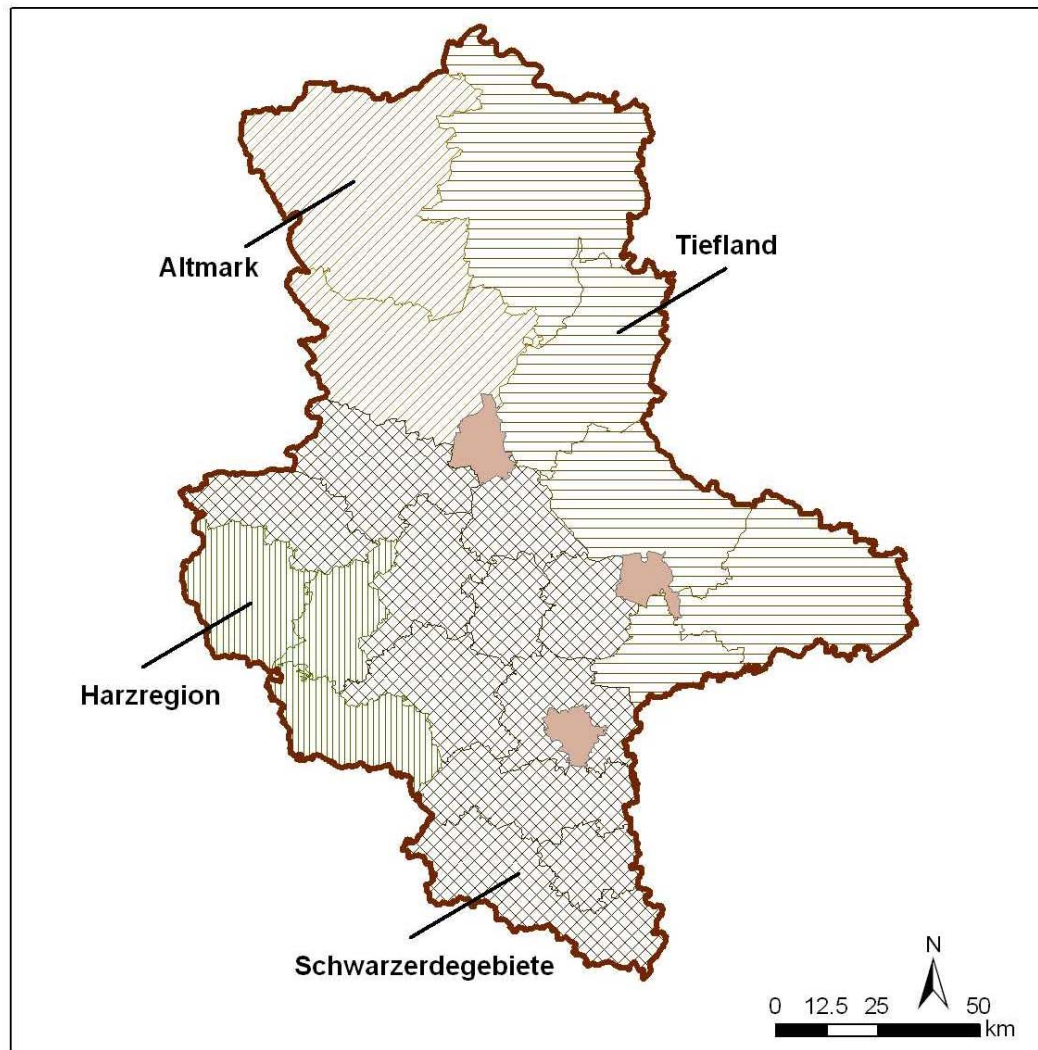


f)




**Abb. 3.3.1:** Verlaufslinien und gleitende 7-Jahresmittel (links arithmetisch, rechts harmonisch) des Ertrages (links) und der Ertragsänderungsrate (rechts, Jahresertrag/Vorjahresertrag) von Winterweizen (a, b), Silomais (c, d) und Winterraps (e, f) in Sachsen-Anhalt

### 3.3.3. Ertragsdifferenzierung nach Boden-Klima-Räumen und Vulnerabilität gegenüber Klimawandel

In Anlehnung an die Boden-Klima Klassifikation nach (Roßberg 2007) kann das Land in vier Regionen gegliedert werden: Altmark, Tiefland, Schwarzerdere region und Harzregion. Die Zuordnung der Landkreise (Stand 2001) kann Abb. 3.3.2 und Tab. 3.3.1 entnommen werden.



Abgrenzung nach Boden-Klima-Raum (IKJ, 2007)  
und Kreisgrenzen (BKG, 2001)

-  Altmark
-  Schwarzerdegebiete
-  Harzregion
-  Tiefland
-  Stadtgebiete

**Abb. 3.3.2: Gliederung Sachsen-Anhalts in Boden-Klima-Räume**



Tab. 3.3.1: Zuordnung der Landkreise (2001) Sachsen-Anhalts zu Boden-Klima-Räumen

Boden-Klima-Raum (Bezeichnung)	Landkreis
Altmark	Altmarkkreis Salzwedel Ohrekreis
Tiefland	Anhalt_Zerbst Bitterfeld Jerichower_Land Stendal Wittenberg
Schwarzerde(gebiete)	Aschersleben-Staßfurt Bernburg Boerdekreis Burgenlandkreis Halberstadt Köthen Mansfelder Land Merseburg-Querfurt Saalkreis Schönebeck Weissenfels
Harz(region)	Quedlinburg Sangershausen Wernigerode

Innerhalb des Landes werden die höchsten und stabilsten Erträge bei den drei betrachteten Kulturen in der Schwarzerderegion und im Harzgebiet erzielt (Tab. 3.3.2). Die guten Ertragsaussichten im Harz begrenzen sich allerdings auf einen relativ geringen Anteil landwirtschaftlich nutzbarer Fläche. Ein relativ hohes Niederschlagsniveau ermöglicht hier Erträge, die an jene in der Schwarzerderegion heranreichen (Tab. 3.3.3). Dort ist das Niederschlagsniveau zwar deutlich geringer als in der Harzregion. Auf Grund der hohen Wasserspeicherfähigkeit der Böden steht das Niederschlagwasser jedoch länger für das Pflanzenwachstum zur Verfügung.

In der Altmark und dem elbnahen Tiefland sind die Ertragsaussichten bei vergleichsweise ähnlichen klimatischen Bedingungen wie in der Schwarzerderegion deutlich schlechter und schwanken auch stärker. Hauptursache hierfür ist das geringere Wasserhaltevermögen der in diesen Regionen vorherrschenden Böden.

**Tab. 3.3.2: Mittelwerte ( $\bar{y}$ ), Variabilitätskoeffizienten ( $V$ ) und relative Ertragsänderung ( $\bar{y}'$ ) der Praxiserträge auf Landkreisbasis von Winterweizen, Raps und Silomais in den Boden-Klima-Räumen von Sachsen-Anhalt für den Zeitraum 1991-2006**

Kultur	Ertragskennziffer	Altmark	Tiefland	Schwarzerde	Harz
Winterweizen	$\bar{y}$ (dt ha <sup>-1</sup> )	63,8	58,2	70,6	72,6
	$V$ (%) von $\bar{y}$	14,5	20,1	12,9	13,4
	$\bar{y}'$ (%)	1,02	1,01	1,01	1,01
Raps	$\bar{y}$ (dt ha <sup>-1</sup> )	29,1	28,9	34,5	34,3
	$V$ (%) von $\bar{y}$	22,5	20,7	14,3	14,9
	$\bar{y}'$ (%)	1,03	1,01	1,01	1,01
Silomais	$\bar{y}$ (dt ha <sup>-1</sup> )	342,3	315,6	410,4	411,1
	$V$ (%) von $\bar{y}$	18,1	22,6	11,1	13,1
	$\bar{y}'$ (%)	1,01	1,00	1,01	1,01

**Tab. 3.3.3: Werte ausgewählter Klimagrößen von Boden-Klima Räumen für die Jahre 1991-2000**

Boden-Klima-Raum	Altmark	Tiefland	Schwarzerde	Harz
Jahr				
Tagesmitteltemperatur [°C]	9,3	9,5	9,4	8,1
Niederschlagssumme [mm]	560,3	544,8	532,2	738,3
Potentielle Verdunstung [mm]	640,1	665,9	649,4	590,3
Globalstrahlung [J/m <sup>2</sup> ]	36,1	37,2	36,7	35,7
Mai-Oktober				
Tagesmitteltemperatur [°C]	14,8	15,2	15,0	13,5
Niederschlagssumme [mm]	306,1	301,5	312,5	374,7
Potentielle Verdunstung [mm]	524,0	544,3	529,3	486,5
Strahlung [J/m <sup>2</sup> ]	26,4	27,1	26,7	25,8

Bei der gegebenen Ausgangssituation kann davon ausgegangen werden, dass die Erträge in der Harz- sowie in der Schwarzerderegion am geringsten auf Niederschlagsrückgänge reagieren, während umgekehrt bei Niederschlagszunahmen die deutlichsten Ertragsgewinne in der Altmark sowie im Tiefland zu erwarten sind. Bei ausreichender Wasserversorgung sollte vor allem die Harzregion von einer Temperaturzunahme profitieren.

### 3.3.4. Konzeption für eine modellgestützte Projektion von Klimaerträgen

Die modellgestützte Ertragsprojektion erfolgt in fünf Schritten:

1. Quantifizierung des Ertragsratenmodells für eine Periode des rezenten Klimas
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

**zu 1.**

**Als Modellansatz wurde folgendes allgemeines Modell verwendet:**

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

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

$y'_0$  mittlerer relativer Änderungsfaktor 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.

Der Modellansatz unterstellt, dass die Schwankungsweiten für die relative Ertragsvariabilität konstant bleiben und nicht rückläufig sind. Das heißt, die absoluten Abweichungen vom Trendertrag nehmen mit dem Ertragsniveau zu, die relativen Abweichungen bleiben konstant (vgl. Abb. 3.3.1).

Das Modell wurde landkreisweise unter Berücksichtigung von Klima- und Ertragsdaten für die Jahre 1986-2000 geschätzt. Die Jahre vor 1986 wurden nicht berücksichtigt, da ihre Einbeziehung bei den hier verwendeten Ansätzen zu einer deutlichen Minderung der Modellqualität führte.

Es wurde von einem Ansatz potenziell relevanter Klimavariablen ausgegangen, der dann schrittweise im Verlauf der Modellanpassung auf die signifikanten Modellvariablen reduziert wurde. In den Landkreismodellen eines Boden-Klima-Raumes wurden letztlich nur die Variablen berücksichtigt, die in mehr als der Hälfte der Landkreise einen signifikanten Einfluss hatten. Die Modellparametrisierung erfolgt mit dem Modellsystem SAS unter Nutzung des PROC REG Moduls.

Generell werden auf Grund der Unsicherheit der Klimaprojektionen nur Mittelwerte und Summen von Klimavariablen für längere Zeitspannen bei der Modellbildung berücksichtigt. In den Tabellen Tab. 3.3.4 und Tab. 3.3.5 wird ein Überblick der für die Modellbildung von Winterweizen, Winterraps und Silomais verwendeten Klimavariablen und Zeitbezüge gegeben.

**Tab. 3.3.4: Klimavariablen des statistischen Modellansatzes mit Einheiten und Abkürzungen**

Beschreibung	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/cm <sup>2</sup> /°C	Str/T
Temperatursumme mit T >6°C	°C	Tsum

**Tab. 3.3.5: Zeitbezüge der in der Modellbildung für die Fruchtarten Winterweizen (WW), Winterraps (WRa) und Silomais (SM) genutzten Klimavariablen**

Zeitbezüge	Zeitbezüge (Kurzform)	Kultur
Mai – Oktober	Mai-Okt	WW, WRa, SM
Mai – Juni	Mai-Jun	WW, WRa, SM
Mai – Juli	Mai-Jul	WW, WRa, SM
Juli – August	Jul-Aug	WW, WRa, SM
August-Oktober	Aug-Okt	SM

In den Tabellen Tab. 3.3.6 und Tab. 3.3.7 sind die für die Modellbildung signifikanten Klimavariablen je Fruchtart und Boden-Klima-Raum aufgeführt. Die landkreisweisen Ergebnisse wurden nach Boden-Klima Räumen zusammengefasst. Dargestellt ist die relative Häufigkeit in Prozent, mit der eine Klimavariablen in den Landkreismodellen eines Boden-Klima-Raumes berücksichtigt wurde, wobei nach positiven und negativen Parameterzeichen unterschieden wurde.

**Tab. 3.3.6: Relative Häufigkeit von signifikanten Klimavariablen in den Landkreismodellen für Winterweizen (WW) und Winterraps (WRa)**

(Abkürzungen s. Tab. 3.3.4 und Tab. 3.3.5; leere Zellen: keine valide Modellabschätzung möglich)

			Altmark		Tiefland		Schwarzerde		Harz	
			Landkreismodelle je Region							
			2		5		11		3	
			Relative Häufigkeit [%] signifikanter Variablen in den Landkreismodellen mit positiven und negativen Vorzeichen							
Kultur	Variable	Zeit	+	-	+	-	+	-	+	-
WW	ETP	Mai-Jun	50			40	27	18	33	33
	NS	Mai-Jun	100		80		54		66	
	Relf	Mai-Okt	50		20		45	9		
	Tsw	Mai-Jul	50		20	20	9	27		
	Str	Mai-Jun		50	40		36		33	
	Tsum	Mai-Jul				20	72		33	
	T	Mai-Okt	50		20			27		33
	T	Mai-Jun			40	20		54		33
	oNied	Mai-Jun		50	40		18	9		33
WRa	ETP	Mai-Jun								33
	ETP	Juli-Aug						18		
	NS	Mai-Okt					36			
	Relf	Juli-Aug	100						33	
	Tsw	Juli-Aug	50					18		66
	Str	Mai-Jun							66	
	Str	Jul-Aug				20				
	Tsum	Jul-Aug				20				33
	T	Mai-Okt				40		9		
	oNied	Mai-Jun		100				27		33
SM	ETP	Mai-Jun		100	20	20		36		100
	ETP	Juli-Aug		50		20	9	36		33
	NS	Mai-Jul	100		80		54		100	
	Relf	Mai-Okt		50	40	20	36	9	66	33
	Str	Mai-Jun	100				54		66	
	Str	Juli-Aug	100		20		9	36	33	33
	Str	Mai-Okt		100		20	9	27	33	
	Tsw	Mai-Jun		50	20	20	36	27	100	
	Tsw	Jul-Aug		100			27	45	33	66
	T	Mai-Jul		50		40	27	9	66	33
	Tsum	Jul-Aug				20		27	66	
	oNied	Mai-Jun	100		20		27	54	100	
	oNied	Jul-Aug				20	36	9		66



zu 2.<sup>1</sup>**Validierung des Ertragsratenmodells für eine in 1. nicht genutzte Periode des rezenten Klimas**

Nach der Modellschätzung für die Jahre 1986-2000 wurden die Landkreismodelle genutzt, um die Ertragsänderungsdaten ausgehend von den beobachteten Klimadaten für die Jahre 2001 bis 2006 zu schätzen. Die Ergebnisse wurden für Boden-Klima-Räume sowie für das Land insgesamt zusammengefasst und mit den beobachteten Ertragsänderungsraten verglichen. Auf der Landkreisebene wurde auf Grund der erfahrungsgemäß häufig geringen Erfolgsaussichten von einer Validierung abgesehen.

In Tab. 3.3.7 sind die Korrelationskoeffizienten für die verschiedenen Kulturen zusammengefasst. Valide bzw. nahezu valide ( $p \leq 0,2$ ) Modelle wurden auf der Landesebene für alle Kulturen erhalten, wobei das Rapsmodell nur mit Einschränkungen für eine Projektion verwendet werden kann. Auf der Ebene der Boden-Klima-Räume ergeben sich nur für die Altmark valide Modelle für alle Kulturen. Ein valides Weizenmodell wurde noch für den Tieflandbereich erhalten. Für alle Boden-Klima-Räume sind auf Grund der Validierungsergebnisse differenzierte Projektionen des Maisertrages möglich.

**Tab. 3.3.7: Korrelationskoeffizienten zwischen simulierten und beobachteten Ertragsänderungen für die Validierungsperiode 2001-2006 nach Boden-Klima-Räumen und für das Land Sachsen-Anhalt**

Boden-Klima-Raum	Winterweizen	Winterraps	Silomais
Altmark	0,85***	0,64*	0,94***
Tiefland	0,60*	0,48	0,92***
Schwarzerdegebiete	0,15	0,09	0,84***
Harzregion	0,36	0,08	0,81**
Land	0,87**	0,61	0,98**

\*\*\*  $p \leq 0,05$ , \*\*  $p \leq 0,1$ , \*  $p \leq 0,2$

zu 3.<sup>2</sup>**Simulation der jährlichen Ertragsänderungsraten für eine synthetische Klimareihe**

Die validierten Fruchtartenmodelle werden im nächsten Schritt genutzt, um die Szenarieneffekte der verschiedenen Klimaszenarien zu ermitteln.

Je Modell (REMO, WETTREG) und Emissionsszenario (A2, A1B, B2) liegen Klimareihen vor, die im rezenten Klimabereich beginnen (REMO 1951, WETTREG 1961) und diesen dann bis 2100 fortschreiben.

Für jede Klimareihe dieses Emissionsszenarios wird landkreisweise unter Nutzung der in zu 2. als valide eingeschätzten Ratenmodelle zunächst eine zugehörige Reihe von Ertragsänderungsraten ermittelt. Die simulierten Ertragsänderungsraten bilden die Grund-

<sup>1</sup> s. Aufzählung zu Beginn Kap. 3.3.4

<sup>2</sup> s. Aufzählung zu Beginn Kap. 3.3.4

lage für die Ermittlung des Relativertrages je Jahr mit Bezug zu einem fiktiven Basisniveau. Die landkreisweisen Ertragsänderungsraten werden zu Änderungsraten für Boden-Klima Räume und das Land insgesamt gemittelt.

**zu 4.<sup>3</sup>**

**Integrative Verknüpfung der jährlichen Ertragsänderungsraten**

Durch multiplikative Verknüpfung der gemittelten Ertragsänderungsraten  $1, \dots, t, \dots, i$  je Boden-Klima-Raum und für das Land insgesamt gelangt man zu der relativen Ertragsänderung zum Zeitpunkt  $i$  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 Bezugsertrag kürzt sich heraus und man erhält die relative Ertragsänderung zwischen zwei Perioden.

**zu 5.<sup>4</sup>**

**Ermittlung der Szenarieneffekte**

Die Szenarieneffekte ergeben sich, indem die mittleren Relativerträge der Szenarienperioden mit denen der Kontrollperiode in Beziehung gesetzt werden. Der Bezug zum Basisniveau kürzt sich hierbei heraus. Die mittlere relative Ertragsänderung 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 einer Periode auf das Vergleichsergebnis gemindert.

### **3.3.4.1. Vorteile und Grenzen des gewählten Modellkonzepts**

Ein großer Vorteil des verwendeten Ansatzes ist die Bezugnahme auf relative Änderungsraten des Klimas. Der Modellfehler der Klimamodelle bei der Reproduktion des rezenten Klimas bleibt somit ohne Folgen für die Ertragssimulationen. Der Ansatz setzt direkt auf Praxisdaten auf und berücksichtigt damit implizit auch ein mittleres Anpassungsverhalten der Landwirte gegenüber Klimaänderungen durch Sortenwahl und Anpassung der Agromie. Effekte, die sich aus deutlichen Anbauausdehnungen und Einschränkungen des Anbauumfangs einzelner Kulturen ergeben, können durch diesen Ansatz jedoch nicht abgebildet werden. Die Ertragseffekte beziehen sich auf die gegenwärtige Standortbindung der betrachteten Kulturen. Wenn der Anbau einer Kultur sich auf ertragsschwächere Standorte ausdehnt, werden die Ertragsverluste deutlicher und die Ertragsgewinne geringer ausfallen. Bei einem Rückzug auf ertragsstärkere Gebiete gilt die entsprechende Umkehrung.

Die Gültigkeitsgrenzen des Modells werden durch den in der Vergangenheit beobachteten Schwankungsbereich des Klimas gesetzt. In dem Maße wie das neue Klima diesen versetzt, können Toleranzschwellen der Ertragsbildung überschritten werden, die in der Ver-

<sup>3</sup> s. Aufzählung zu Beginn Kap. 3.3.4

<sup>4</sup> s. Aufzählung zu Beginn Kap. 3.3.4

gangenheit nicht erreicht wurden. Diese Effekte werden durch den gewählten Modellansatz nicht erfasst.

### **3.3.5. Datengrundlage**

#### **3.3.5.1. Modellbildung**

Die Modellbildung basiert klimaseitig auf täglichen Stationsdaten des deutschen Wetterdienstes für Niederschlags- und Klimastationen Sachsen-Anhalts. Die Stationsdaten wurden am PIK durch Interpolation zu 70 kompletten synoptischen Klimadatensätzen für den Zeitraum 1951-2006 aufgefüllt. Insgesamt standen 22 Stationsreihen zur Verfügung. Die Stationsreihen wurden landkreisweise durch einfache arithmetische Mittelung zusammengefasst. Dabei wurde auf die im Jahr 2001 gültige Gliederung des Landes in Landkreise Bezug genommen.

Den landkreisweise aggregierten Klimadaten wurden bei der Modellbildung die durch Verwaltungen erhobenen Ertragsdaten landwirtschaftlicher Betriebe für die gleiche räumliche Gliederung gegenübergestellt. Die Ertragsdaten vor 1991 wurden statistischen Jahrbüchern der DDR-Bezirke entnommen und in die 2001 gültige Kreisgliederung flächengewichtet umgerechnet. Die Daten nach 1990 entstammen Veröffentlichungen des Statistischen Landesamtes Sachsen-Anhalts. Änderungen der Kreisgrenzen wurden analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise bei der Aufbereitung von DDR-Daten berücksichtigt.

#### **3.3.5.2. Simulation**

Die Simulationen basieren auf je drei regionalen Klimadatensätzen für die Emissionsszenarien A2, A1B und B1 der Klimamodelle REMO (1951-2100) und WETTREG (1961-2100) in täglicher Auflösung. Die Klimadatensätze des WETTREG-Modells waren synoptischen Klimastationen des Landes zugeordnet. Klimareihen je Kreis wurden durch Interpolation erstellt, in dem von den Szenarienpunkten die Klimadaten auf die geographischen Schwerpunkte der Kreise interpoliert wurden. Im Unterschied zum WETTREG-Modell lagen die Klimadatensätze des REMO-Modells für ein gleichabständiges Gitternetz von Punkten vor, wobei mehrere Gitterpunkte jeweils in einen 2001-Landkreis fielen. Die Klimareihen je Landkreis wurden durch einfache arithmetische Mittelung der Gitterinformationen innerhalb eines Landkreises erhalten.

### **3.3.6. Räumlicher Bezug von Modellparametrisierung, Simulation, Validierung und Projektion**

Die Modellparametrisierung erfolgt auf der Landkreisebene. Auf diesen werden auch die Ertragssimulationen durchgeführt. Die modellgestützte Validierung und Projektion von Erträgen erfolgt jedoch auf darüber liegenden räumlichen Aggregationsebenen. Dies sind die oben bereits beschriebenen vier Boden-Klima-Räume, zu denen die Landkreise Sachsen-Anhalts zusammengefasst werden können und das Land Sachsen-Anhalt. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da häufig erst nach der Zusammenfassung von Landkreiser-

trägen Ergebnisse erhalten wurden, die mit den Beobachtungen signifikant bzw. nahezu signifikant korrelierten.

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

Die direkte Wirkung des Anstiegs der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration auf den Ertragseffekt der verschiedenen Klimaszenarien im Vergleich zum Klima der Kontrollperiode wird nachträglich berücksichtigt. Hierzu werden CO<sub>2</sub>-abhängige Korrekturfaktoren  $f_\alpha$  und  $f_{\beta^*}$  kalkuliert. Der Faktor  $f_\alpha$  korrigiert positive und negative Ertragseffekte (vgl. Wechsung, 2008). Durch die stimulierende Wirkung von erhöhtem CO<sub>2</sub> werden Ertragsverluste gemindert und Ertragsgewinne gesteigert. Der Faktor  $f_{\beta^*}$  korrigiert nur die Ertragsverluste in Folge von Wasserstress. Zunächst wird hierzu der Verminderungsfaktor  $f_\beta$  ermittelt und aus diesem dann  $f_{\beta^*}$  hergeleitet. Der Verminderungsfaktor  $f_\beta$  ergibt sich aus dem Quotienten von aktueller und künftiger CO<sub>2</sub>-Konzentration, multipliziert mit dem CO<sub>2</sub>-Ertragsänderungsfaktor ohne Wasserstress  $f_\alpha$ . Für die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 380 ppm und 550 ppm und dem Wert 1,13 für  $f_\alpha$  ergibt dies beispielsweise einen Verminderungsfaktor  $f_\beta$  von 0,9. Der Verminderungsfaktor 0,9 bedeutet, dass sich der künftige Wasseranspruch einer Pflanze gegenüber heutigen Bedingungen um 10 % verringert. Aus mindestens zwei Gründen kann davon ausgegangen werden, dass diese Reduktion nicht in vollem Umfang realisiert werden kann. Zum einen ist aus mikrometeorologischer Sicht damit zu rechnen, dass die beschriebene Reduktion der Verdunstung in Folge verminderter Spaltöffnungsweite über Vegetation geringer Höhe (landwirtschaftliche Kulturpflanzen) deutlich geringer als über hoher Vegetation (Wald) ist. Zum anderen kann nicht jede simulierte Ertragsminderung auf erhöhten Wasserstress zurückgeführt werden. Es wird deshalb ein Wirksamkeitsfaktor für  $f_\beta$  eingeführt, der postuliert, dass von der möglichen Reduktion des Verdunstungsanspruches ca. 25% realisiert werden können. Der Wert für  $f_{\beta^*}$  ergibt sich dann aus:

$$f_{\beta^*} = 1 - ((1 - f_\beta) * 0,25).$$

Die CO<sub>2</sub>-abhängige Modifikation eines Szenarieneffektes wird nun nach folgendem Algorithmus vorgenommen:

- a. Wenn  $y_E < 0$ , dann  $y_{E,CW} = y_E * 1/f_{\beta^*} + 100 * (1/f_{\beta^*} - 1)$ , sonst  $y_{E,CW} = y_E$
- b.  $y_{E,C} = y_{E,CW} * f_\alpha + 100 * (f_\alpha - 1)$

mit:

- $f_\alpha, f_{\beta^*}$  Korrekturfaktoren für die CO<sub>2</sub>-Wirkung auf Photosynthese und Transpiration,
- $y_E$  relative Ertragsänderung ohne Berücksichtigung von erhöhtem CO<sub>2</sub> [%]
- $y_{E,CW}$  relative Ertragsänderung bei Berücksichtigung des Transpirationseffektes von erhöhtem CO<sub>2</sub> [%],
- $y_{E,C}$  relative Ertragsänderung bei Berücksichtigung des Transpirations- und Photosyntheseeffektes von erhöhtem CO<sub>2</sub>

Der Wert des Faktors  $f_\alpha$  für eine  $\text{CO}_2$ -Erhöhung gegenüber dem aktuellen Niveau wird mit Hilfe einer allgemeinen Wirkungsfunktion ermittelt, die insbesondere Ergebnisse von FACE-Experimenten berücksichtigt. Nach (Long et al. 2006) kann unter Freilandbedingungen bei ausreichender Wasser- und Stickstoffversorgung für Weizen und Mais mit  $f_\alpha$ -Werten von 1.13 und 1.06 gerechnet werden, wenn die  $\text{CO}_2$ -Konzentration von 370 auf 550 ppm steigt. Die Wirkungsfunktion lautet:

$$f_\alpha = \frac{(aC + y_{\max}) - \sqrt{(aC + y_{\max})^2 - a\xi C y_{\max}}}{2\xi}, \text{ mit}$$

$$y_{\max} = 1.11, \xi = 0.94$$

$$a = \frac{(\xi - y_{\max})}{C_0 - C_0 y_{\max}}$$

$C \dots \text{CO}_2$  – Konzentration in der Zukunft

$C_0 \dots \text{CO}_2$  – Bezugskonzentration

Die Berechnung von  $f_\beta$  für die oben beschriebene Kalkulation von  $f_\beta^*$  erfolgt nach

$$f_\beta = \frac{C_0}{C} \cdot f_\alpha.$$

Die Ergebnisse der  $\text{CO}_2$ -abhängigen Korrekturen für eine Spanne von Szenarioeffekten von -40 bis +30% bezüglich der hier betrachteten Zeitspannen ist in Tab. 3.3.8 für das Emissionsszenario A1B zusammenfassend dargestellt. Die Abweichungen für die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen der anderen Emissionsszenarien (vgl. Tab. 3.3.9) sind vernachlässigbar auf eine entsprechende Darstellung wird deshalb verzichtet.

**Tab. 3.3.8: Modifizierende Wirkung des  $\text{CO}_2$ -Düngungseffektes auf C3- und C4-Pflanzen für eine Spanne von relativen Ertragseffekten**

Photosyntheseweg	C3-Pflanze			C4-Pflanze		
SRES-Szenario	A1B					
Jahr	2026	2056	2086	2026	2056	2086
CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm]	435	547	660	435	547	660
Ertragseffekte						
ohne CO <sub>2</sub>	mit CO <sub>2</sub>					
-40	-35	-30	-26	-27	-23	-20
-30	-25	-18	-13	-17	-12	-9
-20	-14	-6	-1	-7	-1	3
-10	-3	5	11	3	6	7
0	7	13	16	13	17	18
10	18	24	28	24	27	28
20	28	36	39	34	38	39
30	39	47	51	-27	-23	-20

Die bei den verschiedenen Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 bis 2026, 2056 und 2086 nach dem Berner Modell zu erwarten atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen können nachfolgender Tabelle entnommen werden.



**Tab. 3.3.9: Folgen verschiedener SRES-Emissionsszenarien auf die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration in ausgewählten Jahren des Szenarienzeitraumes nach dem Berner Modell**

	2026	2056	2086
SRES-Szenario	CO <sub>2</sub> [ppm]		
A1B	435	547	660
A2	432	550	725
B1	423	495	535

### 3.3.8. Ergebnisse

#### 3.3.8.1. Ertragsrelevantes Klimaänderungssignal

Für die Ertragsvariabilität in den Boden-Klima-Räumen Sachsen-Anhalts war die Entwicklung der Witterung im Vorsommer und Sommer entscheidend (Tab. 3.3.10, Tab. 3.3.12). Es sind Klimavariablen mit Bezug auf die Monate Mai bis August, deren jahresweise Variabilität gut mit den Variabilitäten der drei betrachteten Kulturen korreliert.

Das Klimaänderungssignal für die ertragsrelevanten Witterungsperioden wird allgemein charakterisiert durch einen Anstieg der Temperaturen von Mai bis Oktober, eine Zunahme des Verdunstungsanspruches von Mai bis August, eine Abnahme der Niederschläge von Mai bis Juli und eine Zunahme der niederschlagsfreien Tage von Mai bis Juli.

Das Klimaänderungssignal prägt sich mit der Zeit deutlicher aus. Die Unterschiede zwischen den Szenarioläufen sind aus der Sicht der resultierenden Ertragseffekte geringfügig. Zwischen den Modellen REMO und WETTREG gibt es allerdings erhebliche Unterschiede in der Entwicklung einzelner Klimavariablen, die sich dann auch in teilweise gegensätzlichen Ertragsprojektionen niederschlagen.

Die REMO-Klimaszenarien sind insbesondere in den Szenarien A2 und A1B zumeist wärmer und je Einheit Temperaturanstieg mit einem deutlicheren Rückgang der Strahlung im Vergleich zu WETTREG verbunden. Dies führt zu einem geringeren Anstieg des Verdunstungsanspruches in REMO und ist verbunden mit einem geringeren Rückgang der relativen Luftfeuchtigkeit und einer ebenfalls geringeren Zunahme niederschlagsfreier Tage im Vergleich der REMO mit den WETTREG-Szenarien.

**Tab. 3.3.10: Differenzen modellrelevanter Klimavariabler für Winterweizen im Vergleich der Zeiträume 2071-2100 und 1961-1990 je Boden-Klima-Raum (BKR) und das Land insgesamt für die Szenarien A2, A1B und B1 der Klimamodelle REMO und WETTREG (Abkürzungen s. Tab. 3.3.4 und Tab. 3.3.5)**

BKR	ETP		NS		Relf		Tsw		Stra		Tsum		T		T		oNied	
	Mai-Jun		Mai-Jun		Mai-Okt		Mai-Jun		Mai-Jun		Mai-Jul		Mai-Okt		Mai-Jun		Mai-Jun	
	mm		mm		%		°C		J/m²		°C		°C		°C		Anzahl	
	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	RE- MO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG
<b>Szenario A2</b>																		
Altmark	17,5	25,4	-23,0	-18,2	0,4	-5,1	-0,4	1,2	1,3	7,6	255,8	109,5	2,9	1,9	2,2	1,6	4,2	1,9
Tiefland	17,2	24,2	-19,3	-17,5	0,3	-4,7	-0,5	0,9	1,2	7,2	256,5	119,0	2,9	1,9	2,2	1,5	3,9	1,3
Schwarzerde	18,4	22,2	-13,1	-15,0	0,2	-4,1	-0,4	0,8	1,3	6,4	268,5	117,8	3,0	1,8	2,3	1,5	4,1	1,1
Harz	22,9	23,6	-13,4	-18,9	0,6	-4,1	-0,4	0,8	2,2	6,8	288,6	131,1	3,0	1,9	2,3	1,6	3,7	0,8
Land	18,8	23,2	-15,9	-16,0	0,3	-4,4	-0,4	0,9	1,5	6,7	267,5	117,4	3,0	1,9	2,2	1,5	4,0	1,3
<b>Szenario A1B</b>																		
Altmark	22,6	25,9	-28,7	-19,7	-0,5	-4,7	-0,2	1,4	2,9	7,2	263,4	119,3	3,0	1,9	2,5	1,6	6,2	2,2
Tiefland	21,2	24,9	-25,3	-12,7	-0,6	-4,5	-0,3	1,0	2,4	6,9	265,0	131,6	3,0	1,9	2,5	1,6	6,7	2,2
Schwarzerde	22,4	22,2	-21,5	-13,9	-0,6	-4,0	-0,2	0,9	2,4	5,9	275,3	132,1	3,1	1,8	2,5	1,5	7,0	1,2
Harz	27,2	22,7	-19,9	-23,1	-0,2	-4,1	-0,2	0,9	3,3	6,0	301,1	144,1	3,1	1,9	2,6	1,6	6,7	1,1
Land	23,0	23,3	-22,7	-15,8	-0,5	-4,2	-0,2	1	2,6	6,3	275,5	130,0	3,1	1,9	2,5	1,5	6,8	1,7
<b>Szenario B1</b>																		
Altmark	11,0	19,5	-20,8	-10,4	0,5	-3,5	-0,4	1,3	0,1	5,9	161,0	76,2	1,9	1,5	1,4	1,2	2,8	2,2
Tiefland	9,9	19,0	-19,3	-7,6	0,4	-3,3	-0,4	1,1	0,3	5,8	159,4	89,0	1,9	1,4	1,4	1,1	2,8	2,2
Schwarzerde	12,1	18,3	-24,1	-5,0	0,2	-3,1	-0,3	1,0	1,0	5,6	168,8	94,2	2,0	1,4	1,5	1,1	3,0	0,7
Harz	14,7	19,5	-26,0	-10,3	0,5	-3,0	-0,3	0,9	0,2	6,0	184,7	109,1	2,0	1,5	1,5	1,2	2,8	0,5
Land	12,0	18,6	-23,6	-6,9	0,3	-3,2	-0,3	1	0,9	5,6	168,4	91,1	2,0	1,4	1,1	1,1	2,9	1,3

**Tab. 3.3.11: Differenzen modellrelevanter Klimavariablen für Silomais im Vergleich der Zeiträume 2071-2100 und 1961-1990 je Boden-Klima-Raum (BKR) und das Land insgesamt für die Szenarien A2, A1B und B1 der Klimamodelle REMO und WETTREG (Abkürzungen s. Tab. 3.3.4 und Tab. 3.3.5)**

BKR	ETP		ETP		NS		Relf		Str		Str		Str/T		Tsw		Tsw	
	Mai-Jun		Jul-Aug		Mai-Jul		Mai-Okt		Mai-Jun		Jul-Aug		Mai-Okt		Mai-Jun		Jul-Aug	
	mm		mm		mm		%		J/m <sup>2</sup>		J/m <sup>2</sup>		J/cm <sup>2</sup> /°C		°C		°C	
	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG
	<b>Szenario A2</b>																	
Altmark	17,5	25,4	20,8	35,7	-31,2	-35,3	0,4	-5,1	1,3	0,7	2,3	1,23	-16,1	-4,3	-0,5	0,9	-0,1	1,6
Tiefland	17,2	24,2	21,5	35,7	-28,2	-33,5	0,3	-4,7	1,2	7,1	2,5	1,25	-15,9	-3,9	-0,5	0,7	-0,1	1,2
Schwarzerde	18,4	22,2	24,3	32,4	-18,7	-23,4	0,2	-4,1	1,3	6,3	3,0	1,12	-17,7	-4,9	-0,5	0,6	0,0	1,1
Harz	22,9	23,6	27,5	32,9	-25,4	-24,9	0,6	-4,1	2,3	6,8	3,3	1,14	-23,4	-6,0	-0,5	0,6	0,0	1,1
Land	19,1	24,2	24,0	34,7	-21,3	-25,2	0,3	-4,8	1,4	6,9	2,8	12,02	-18,3	-4,9	-0,5	0,7	-0,1	1,2
	<b>Szenario A1B</b>																	
Altmark	22,6	25,9	21,1	32,8	-41,6	-37,0	-0,5	-4,7	2,9	7,2	2,4	1,10	-15,8	-4,7	-0,2	1,0	0,0	1,6
Tiefland	21,2	24,9	22,8	32,9	-35,1	-28,7	-0,6	-4,5	2,4	6,9	3,1	1,10	-15,7	-4,1	-0,3	0,7	0,0	1,3
Schwarzerde	22,4	22,2	24,5	30,0	-26,5	-29,4	-0,6	-4,0	2,4	5,9	3,3	0,98	-17,3	-4,8	-0,3	0,6	0,1	1,2
Harz	27,2	22,7	27,5	29,9	-28,9	-39,0	-0,2	-4,1	3,3	6,0	3,5	0,97	-23,3	-5,5	-0,2	0,6	0,1	1,2
Land	23,3	24,4	24,5	32,1	-28,4	-28,7	-0,5	-4,6	2,5	6,6	3,08	10,51	-18,2	-4,9	-0,3	0,6	0,1	1,3
	<b>Szenario B1</b>																	
Altmark	11,0	19,5	10,6	25,7	-16,9	-28,1	0,5	-3,5	0,7	5,8	-0,1	8,9	-11,7	-3,7	-0,4	0,8	-0,1	1,3
Tiefland	9,9	19,0	11,4	26,5	-18,0	-21,5	0,4	-3,3	0,3	5,8	0,1	9,5	-11,7	-3,3	-0,4	0,7	-0,1	1,1
Schwarzerde	12,1	18,3	13,9	25,6	-23,3	-17,0	0,2	-3,1	1,0	5,5	0,1	9,1	-12,8	-3,9	-0,4	0,6	0,0	1,0
Harz	14,7	19,5	16,7	25,8	-32,9	-24,6	0,5	-3,0	1,5	6,0	1,2	9,1	-16,6	-4,5	-0,3	0,6	0,0	1,0
Land	12,3	19,7	13,6	26,9	-21,1	-17,5	0,3	-3,6	0,9	5,9	0,52	9,44	-13,4	-4,0	-0,4	0,6	0,0	1,1

BKR	Tsum		T		oNied		oNied	
	Jul-Aug		Mai-Jul		Jul-Aug		Mai-Jun	
	°C		°C		mm		mm	
	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG
	<b>Szenario A2</b>							
Altmark	191,0	71,9	2,4	1,8	4,6	6,2	4,2	1,9
Tiefland	194,5	84,0	2,4	1,7	5,2	3,1	3,9	1,3
Schwarzerde	201,7	82,5	2,5	1,7	5,9	1,8	4,1	1,1
Harz	209,3	91,3	2,5	1,8	5,5	0,5	3,7	0,8
Land	203,5	87,9	2,5	1,8	5,7	2,2	4,0	1,2
	<b>Szenario A1B</b>							
Altmark	190,7	83,9	2,6	2,0	5,5	5,1	6,2	2,2
Tiefland	194,4	91,5	2,6	2,0	6,5	3,2	6,7	2,2
Schwarzerde	199,7	89,7	2,7	1,9	7,0	2,4	7,0	1,2
Harz	205,8	99,6	2,7	2,0	6,6	0,7	6,7	1,1
Land	203,5	95,6	2,7	2,0	6,8	2,5	6,8	1,6
	<b>Szenario B1</b>							
Altmark	129,3	59,7	1,4	1,6	1,7	4,5	2,8	2,2
Tiefland	131,0	64,1	1,4	1,5	2,5	3,9	2,8	2,2
Schwarzerde	137,0	64,0	1,5	1,5	3,1	2,4	3,0	0,7
Harz	145,1	71,8	1,5	1,6	2,8	0,8	2,8	0,5
Land	139,4	69,4	1,5	1,6	2,8	2,5	2,9	1,2

**Tab. 3.3.12: Differenzen modellrelevanter Klimavariablen für Winterraps im Vergleich der Zeiträume 2071- 2100 und 1961-90 je Boden-Klima-Raum (BKR) und das Land insgesamt für die Szenarien A2, A1B und B1 der Klimamodelle REMO und WETTREG (Abkürzungen s. Tab. 3.3.4 und Tab. 3.3.5)**

BKR	ETP		ETP		NS		Rel		Tsw		Str		Str		Tsum		T	
	Mai-Jun		Jul-Aug		Mai-Okt		Jul-Aug		Jul-Aug		Mai-Jun		Jul-Aug		Jul-Aug		Mai-Okt	
	mm		mm		mm		%		°C		J/m <sup>2</sup>		J/m <sup>2</sup>		°C		°C	
	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG	REMO	WETT REG
<b>Szenario A2</b>																		
Altmark	17,5	25,4	20,8	35,7	-24,0	-66,5	0,1	-5,7	-0,1	1,6	1,3	7,5	2,3	12,6	191,0	71,9	2,9	1,9
Tiefland	17,2	24,2	21,5	35,7	-18,5	-51,7	-0,2	-5,2	-0,1	1,2	1,3	7,2	2,5	12,5	194,5	84,0	2,9	1,9
Schwarzerde	18,4	22,2	24,3	32,4	-4,1	-36,8	-0,3	-4,7	0,0	1,1	1,3	6,4	3,0	11,3	201,7	82,5	3,0	1,8
Harz	22,9	23,6	27,5	32,9	-16,2	-47,7	-0,1	-4,9	0,0	1,1	2,3	6,8	3,3	11,4	209,3	91,3	3,0	1,9
Land	18,8	23,2	23,8	33,4	-11,0	-43,1	-0,2	-4,9	-0,1	1,2	1,5	6,7	2,8	11,6	199,6	81,5	3,0	1,9
<b>Szenario A1B</b>																		
Altmark	22,6	25,9	21,1	32,8	-43,6	-52,7	-0,8	-5,6	0,0	1,6	2,9	7,3	2,4	10,8	190,7	83,9	3,0	1,9
Tiefland	21,2	24,9	22,8	32,9	-31,3	-48,0	-1,0	-5,0	0,0	1,3	2,4	6,9	3,1	10,9	194,4	91,5	3,0	1,9
Schwarzerde	22,4	22,2	24,5	30,0	-22,9	-46,0	-0,8	-4,5	0,1	1,2	2,4	5,9	3,3	9,9	199,7	89,7	3,1	1,8
Harz	27,2	22,7	27,5	29,9	-38,9	-56,8	-0,4	-4,7	0,1	1,2	3,3	6,0	3,5	9,7	205,8	99,6	3,1	1,9
Land	23,0	23,3	24,1	30,8	-29,7	-47,1	-0,7	-4,8	0,1	1,3	2,6	6,3	3,1	10,1	197,7	89,6	3,1	1,9
<b>Szenario B1</b>																		
Altmark	11,0	19,5	10,6	25,7	3,1	-34,0	0,6	-4,0	-0,1	1,3	0,7	5,9	-0,1	8,9	129,3	59,7	1,9	1,5
Tiefland	9,9	19,0	11,4	26,5	1,7	-24,8	0,4	-3,6	-0,1	1,1	0,3	5,8	0,2	9,5	131,0	64,1	1,9	1,4
Schwarzerde	12,1	18,3	13,9	25,6	5,0	-15,8	0,1	-3,5	0,0	1,0	1,0	5,5	0,8	9,1	137,0	64,0	2,0	1,4
Harz	14,7	19,5	16,7	25,8	-7,2	-21,9	0,1	-3,6	0,0	1,0	1,5	6,0	1,2	9,1	145,1	71,8	2,0	1,5
Land	12,0	18,6	13,4	25,6	2,7	-19,7	0,3	-3,6	-0,1	1,1	0,9	5,6	0,6	9,0	135,7	64,0	2,0	1,4



BKR	oNied	
	Mai-Jul	
	Anzahl	
	REMO	WETT REG
	<b>Szenario A2</b>	
Altmark	6,3	4,8
Tiefland	6,2	3,6
Schwarzerde	6,6	2,0
Harz	5,9	0,8
Land	6,4	2,5
	<b>Szenario A1B</b>	
Altmark	8,5	5,4
Tiefland	9,5	4,9
Schwarzerde	10,4	2,8
Harz	9,9	1,7
Land	9,9	3,4
	<b>Szenario B1</b>	
Altmark	3,4	6,1
Tiefland	3,7	6,1
Schwarzerde	4,3	3,0
Harz	4,0	1,9
Land	4,0	3,8

### 3.3.8.2. Klimafolgen ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes

Die Änderungstendenzen prägen sich mit der Zeit zunehmend aus und werden am Ende des Jahrhunderts am deutlichsten. Die Unterschiede zwischen den Szenarien A2, A1B und B1 sind eher gering und werden im Folgenden vernachlässigt. Darstellung und Diskussion konzentrieren sich daher auf die Ergebnisse für die Klimaszenarien A1B der Modelle REMO und WETTREG im Vergleich der Perioden 2071-2100 und 1961-1990 (Tab. 3.3.13).

Die für diesen Periodenvergleich postulierten Klimaänderungssignale führen im Landesmittel zu einem deutlichen Rückgang der Raps-erträge. Die Silomais- und Weizen-erträge gehen leicht zurück (WETTREG) bzw. steigen moderat (REMO).

Die Übereinstimmung der REMO und WETTREG-Wirkungen auf Raps erklärt sich aus der überragenden Bedeutung der Klimavariablen Niederschlagsfreie Tage in der Periode Mai bis Juli. In beiden Szenarien kommt es hier zu einem negativ auf die Ertragsaussichten wirkenden Anstieg. Die Unterschiede zwischen REMO und WETTREG bei den Szenariowirkungen auf den Mais- und Weizen-ertrag widerspiegeln Unterschiede in den Szenarien. Diese Unterschiede werden besonders deutlich, wenn die regionale Differenzierung der Ertragswirkungen beim Mais und Weizen betrachtet werden.

Der szenariobedingte Ertragsrückgang von Mais liegt in einer Größenordnung zwischen -8 und -27% beim WETTREG A1B Szenario im Vergleich der Perioden 2071-2100 und 1961-1990, wobei der Rückgang am geringsten in der Schwarzerderegion ist. Mit dem REMO-Modell kommt man bei gleichem Szenariobezug für den Harz und das Tiefland zu ähnlichen Ergebnissen. In der Altmark und der Schwarzerderegion kommt es klimabedingt jedoch zu deutlichen Ertragsgewinnen. Verantwortlich hierfür sind vor allem der im Vergleich zu WETTREG geringere Verdunstungsanspruch, die stärkere Verminderung des Strahlung/Temperaturverhältnisses, die nicht zurückgehende relative Luftfeuchtigkeit, sowie der stärkere Temperaturanstieg.

Zu analogen Unterschieden kommt es bei den möglichen Projektionen zum Winterweizen-ertrag für die Altmark und das Tiefland. Während das Klimaänderungssignal von WETTREG zu Ertragsänderungen im  $\pm 5\%$  Bereich beim Winterweizen in diesen beiden Regionen führt, folgen aus dem REMO-Szenario Ertragsgewinne, die teilweise größer als 10 % sind.

Insgesamt deutet sich in den Regionalergebnissen für den Mais eine geringere Empfindlichkeit der Schwarzerderegion und mit Abstrichen auch der Altmark gegenüber dem postulierten Klimawandel an.

**Tab. 3.3.13: Simulierte Ertragsänderungen (ohne CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt) für Winterweizen (WW), Winterraps (WRA) und Silomais (SM) in den Boden-Klima Räumen (BKR) von Sachsen-Anhalt und das Land insgesamt (leere Zellen: keine valide Modellabschätzung möglich)**

BKR	Kul- tur	2011-2040/1961-1990						2041-2070/1961-1990						2071-2100/1961-1990					
		REMO			WETTREG			REMO			WETTREG			REMO			WETTREG		
		A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
Altma- rk	WW	2	3	0	6	-3	8	1	6	2	2	3	3	11	10	6	3	4	5
	WRA	-6	-9	-4	-12	-17	-12	-19	-16	-11	-29	-23	-16	-19	-22	-12	-28	-28	-27
	SM	12	8	14	-10	-1	-12	16	15	17	-15	-17	-14	23	18	17	-10	-17	-12
Tief- land	WW	4	4	2	-2	2	-3	8	13	7	-2	-3	-9	15	19	10	-7	-5	-5
	WRA																		
	SM	-5	-7	1	-14	-5	-9	-15	-11	-6	-28	-22	-18	-19	-20	-12	-27	-27	-23
Schw- arz- erde	WW																		
	WRA																		
	SM	3	5	3	6	4	9	9	12	10	-3	-6	-4	27	38	12	-7	-8	-9
Harz	WW																		
	WRA																		
	SM	-17	-17	-8	-17	-3	-9	-24	-27	-17	-31	-36	-37	-49	-45	-38	-10	-25	-40
Land	WW	1	-1	1	0	-5	0	-4	-2	1	-8	-8	0	3	1	0	-9	-7	-3
	WRA	-9	-12	-7	-11	-8	-10	-24	-23	-16	-23	-20	-16	-28	-31	-21	-26	-27	-23
	SM	-1	0	3	3	8	3	2	4	5	-9	-12	-10	9	14	3	-6	-6	-14

Vergleicht man die regionalen Ertragseffekte mit den auf der Landesebene ermittelten Effekten fällt auf, dass letztere beim Mais teilweise deutlich geringer sind als die Spannweite der regionalen Effekte erwarten lässt. Hier wirken sich möglicherweise Schätzfehler der weniger validen Modelle für die Schwarzerderegion und den Harz negativ aus.

Die Signale zu den künftigen Ertragsrelationen zwischen Mais und Weizen sind widersprüchlich. Auf der Landesebene reagiert Mais einerseits positiver auf das REMO-Klima als Weizen. Andererseits reagiert Mais ähnlich oder etwas negativer auf das WETTREG-Klima als Weizen. Eine analoge Tendenz gibt es für die Altmark. Im Tiefland hingegen verliert Mais gegenüber dem Weizen. Die Erträge gehen deutlich zurück, während die Weizenerträge zunehmen (REMO) bzw. nur leicht zurückgehen. Für die Schwarzerderegion und den Harz lassen sich keine belastbaren Aussagen machen.

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

Der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt dürfte die klimabedingten Ertragsrückgänge auf Landesebene und auf der Ebene der Klima-Boden-Räume weitgehend kompensieren. In der Altmark können szenarienbedingt sogar Ertragssteigerungen beim Winterweizen in einer Größenordnung bis zu 20 % bis zur Mitte des Jahrhunderts (dann ca. 550 ppm CO<sub>2</sub>) erwartet werden, da es scheinbar nicht zu einer Verschlechterung der klimatischen Ertragsbedingungen kommt.

Wenn man davon ausgeht, dass sich wie im WETTREG-Szenario, die landesweiten Ertragsrückgänge in einer ähnlichen Größenordnung bewegen, wird Weizen auf Grund des stärkeren CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes als C3-Pflanze leicht an klimatischer Wettbewerbskraft gegenüber dem Mais gewinnen. Im Fall des REMO-Szenarios könnten die physiologischen Unterschiede in der Wirksamkeit von erhöhtem CO<sub>2</sub> zwischen Mais und Weizen dazu führen, dass beide Kulturen letztlich ähnlich auf den Klimawandel reagieren.

Der Raps wird analog wie der Weizen vom CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt als C3-Pflanze profitieren. Der klimabedingt entstandene, relative Nachteil des Rapses im Vergleich zum Weizen und Mais wird hierdurch jedoch nicht ausgeglichen. Generell dürfte der Rapsanbau bei diesen Szenarien sowohl gegenüber dem Maisanbau als auch gegenüber dem Maisanbau an klimatischer Wettbewerbskraft verlieren. Dabei muss jedoch noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die verwendeten Rapsmodelle deutlich schlechtere Validierungsergebnisse lieferten als die für Mais und Weizen erstellten Modelle.

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. Darüber hinaus ist die relative Wirksamkeit des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes unter Wasserstress größer als unter Bedingungen ausreichender Wasserversorgung.

### **3.3.10. Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse**

Der Klimawandel führt in den betrachteten Szenarien nicht zu deutlichen Änderungen in den simulierten mittleren klimatischen Ertragspotentialen für Silomais und Winterweizen. Wenn Ertragsrückgänge auftreten dürften sie durch den CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt weitgehend kompensiert werden. Für den Raps wurden deutlichere Ertragsrückgänge simuliert, die aus statistischer Sicht jedoch weniger belastbar als die für Weizen und insbesondere Mais erhaltenen Ergebnisse sind. Die für einzelne Regionen erhaltenen Ergebnisse deuten auf Ertragsvorteile der Schwarzerderegion und mit Abstrichen auch der Altmark bei Eintritt des postulierten Klimawandels hin.

### **3.3.11. Exkurs Tierproduktion**

Neben Veränderungen der Ertragsaussichten von Anbauarten, kann sich der Klimawandel auch auf die Tierproduktion auswirken. Mögliche Zusammenhänge zwischen klimatischen Bedingungen und dem Auftreten der Blauzungenkrankheit werden beispielhaft in Box 3.3.1 diskutiert.



**Box 3.3.1: Blauzungenkrankheit - eine Erscheinung des Klimawandels oder nicht?**

Die Blauzungenkrankheit (BTV) ist eine virale Erkrankung von Wiederkäuern und in Deutschland eine anzeigepflichtige Tierseuche. Der Blauzungenvirus existiert weltweit und ist in einem breiten Gürtel, der America, Afrika, Nordaustralien und Südostasien umfasst, endemisch. Er wird übertragen durch Mücken der Gattung *Culicoides*, wobei von den etwa 5000 Arten in Europa nur etwa ein Dutzend als tatsächliche Vektoren nachgewiesen sind. Die Übertragung erfolgt durch das Aufsaugen des infizierten Blutes, welches dann durch die Mücke zum nächsten Tier übertragen wird. Historisch gesehen ist der Blauzungenvirus in Europa bisher nur in südlicheren Regionen aufgetreten (Mellor et al. 2008). Im Jahr 2006 hat sich BTV erstmals bis weit nach Norden verbreitet (Niederlande, Belgien und in Deutschland vor allem in Nord-Rhein Westfalen), weit nördlicher als bisher in jedem anderen Teil der Erde beobachtet. Zuletzt sind auch Fälle in Norwegen und Schweden bekannt geworden.

In diesem Zusammenhang wird auch ein Einfluss des sich verändernden Klimas als Ursache diskutiert. Die Diskussion des Klimas als Einflussgröße findet sich allerdings in älteren Literaturquellen (Bethan et al. 2005). In der neueren Literatur wird diese eindeutige Ursachenzuordnung nicht mehr vorgenommen, sondern die Situation differenzierter beurteilt. Bekannt ist, dass Wind infizierte Mücken um 200 km und mehr versetzen können (Hendrickx et al. 2008). Zudem wird Handel und Transport unter anderem von bereits infizierten Tieren als eine Ursache angesehen (Wilson & Mellor 2009). Möglicherweise sind infizierte Culicoiden auch mit Flugzeugen nach Nordeuropa transportiert worden. Es ist allerdings Fakt, dass das Virus nur überleben kann, wenn geeignete Vektoren und Wirtstiere vorhanden sind. Für die Verbreitung in Mittel und Nordeuropa wurden nach den Verbreitungswellen 2006-2008 umfangreiche virologische Untersuchungen unternommen. Hierbei wurde festgestellt, dass Virustypen aufgetreten sind, die nicht in Südeuropa beheimatet sind. Eine klimatologisch bedingte Ursache für die konkrete Verbreitung ist damit eher unwahrscheinlich. Der in Mitteleuropa nachgewiesene Serotyp 8 (BTV-8) ist bisher nur südlich der Sahara, auf dem indischen Subkontinent und in der Karibik aufgetreten (Elbers et al. 2008). Der Ausbruch der Seuche im Jahr 2008 geht auf den Serotypen BTV-6 zurück, der vor allem in Afrika und Mittelamerika auftritt. Da dieser Virustyp auch in einem Lebendimpfstoff im südlichen Afrika verwendet wird, kann die Infektion auch durch Impfungen von Tieren mit diesem in der EU nicht zugelassenen Impfstoff die mögliche Ursache sein. Dennoch muss man auch klimatische Risiken berücksichtigen, denn klimatische Bedingungen sind relevant für die Verbreitung von Arboviren, zu denen auch der Blauzungenvirus gehört. Aufgrund der virologischen Untersuchungen scheinen die Ausbrüche der letzten Jahre allerdings eher durch ungeeignetes Management verursacht worden sein. Die Blauzungenkrankheit ist für den Menschen ungefährlich; eine Übertragung von Tier zu Mensch erfolgt nicht.

*Box 3.3.2: Anpassungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion*

Spezifische neue Anpassungserfordernisse über die der landwirtschaftlichen Praxis im Land bekannten Probleme hinaus werden nicht gesehen. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass Sortenversuche sowie die etablierten Dauerversuche unter Klimawandel erheblich an Bedeutung gewinnen.

Ausdehnung und Intensivierung empirischer Beobachtung zu Klima-Ertrag Wirkungszusammenhängen im Rahmen von Feldversuchen, Sortenprüfungen, und betrieblichen Erhebungen und daran anknüpfende regelmäßige statistische Analysen sind zentrale Anpassungsmaßnahmen gegenüber dem Klimawandel, die zum heutigen Zeitpunkt empfohlen werden können.

*Box 3.3.3: Weiterführende Informationen zum Sektor Landwirtschaft***„Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel“ (BVVG-Studie)**

In dieser Studie wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die ostdeutsche Landwirtschaft untersucht.

**Auftraggeber:** Bodenverwertungs- und -verwaltungs GmbH (BVVG)

**Projektlaufzeit:** 2008-2010

**Ansprechpartner:** Frank Wechsung (Leitung Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK))

### 3.3.12. Literatur

- Bethan, V., B. Purse, P. Mellor, D. Rogers, A. Samuel, P. Mertens und Baylis M (2005): "Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe." *Nature Reviews Microbiology* 3: 171-181.
- Elbers, A., A. Backx, E. Meroc, G. Gerbier, C. Staubach, G. Hendrickx, A. van der Spek und K. Mintiens (2008): "Field observations during the bluetongue serotype 8 epidemic in 2006: I. Detection of first outbreaks and clinical signs in sheep and cattle in Belgium, France and the Netherlands " *Preventive Veterinary Medicine* 87(1-2): 21-30.
- Hendrickx, G., M. Gilbert, C. Staubach, A. Elbers, K. Mintiens, G. Gerbier und E. Ducheyne (2008): "A wind density model to quantify the airborne spread of *Culicoides* species during North-Western Europe bluetongue epidemic, 2006." *Preventive Veterinary Medicine* 87(1-2): 162-181.
- Long, S. P., E. A. Ainsworth, A. D. B. Leakey, J. Nosberger und D. R. Ort (2006): "Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations." *Science* 312(5782): 1918-1921.
- Mellor, P., S. Carpenter, L. Harrup, M. Baylis und P. Mertens (2008): "Bluetongue in Europe and the Mediterranean Basin: History of occurrence prior to 2006." *Preventive Veterinary Medicine* 87(1-2): 4-20.
- Roßberg, D., Michel, V., Graf, R. and Neukampf, R. (2007): "Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland." *Deut. Pflanzenschutzdienst* 59(7): 155-161.
- Wilson, A. J. und P. S. Mellor (2009): "Bluetongue in Europe: past, present and future." *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 364(1530): 2669-2681.

### 3.4. Forstwirtschaft

**Kernaussagen:**

Diese Aussagen beziehen sich auf Simulationsrechnungen, die keine potenziellen biotischen Schäden bzw. CO<sub>2</sub>-Düngungseffekte berücksichtigen.

Produktivität

- Es kommt zu Zuwächsen in den *Kiefern*- und *Eichenbeständen* in allen betrachteten Zeiträumen, ausgenommen in dem wärmsten und trockensten (2071 – 2100), aufgrund von längeren Vegetationsperioden unter allen Szenarien.
- Die *Fichte* profitiert ebenso in hohen Lagen, in tieferen Lagen ist ihre Produktivität jedoch insbesondere ab dem Zeitraum 2041 – 2070 rückläufig.
- Die *Buche* profitiert in den niederschlagsreicheren Lagen in allen betrachteten Szenarien, auf den niederschlagsärmeren Standorten zeigt sich dagegen ein Rückgang in der Produktivität.

Kohlenstoffhaushalt

- Die Simulationen zeigen für die nächsten Jahrzehnte einen Anstieg der ober- und unterirdischen Kohlenstoffspeicherung (einschließlich Boden) in den meisten der von Fichten- und Kiefernbeständen dominierten Regionen.
- Rückgänge des Kohlenstoffspeichers wurden vor allem für Buchenbestände berechnet.

Wasserhaushalt und klimatische Waldbrandgefahr

- Es kommt zu einer Minderung der Grundwasserspendefunktion der Wälder durch sinkende Versickerungsraten (unter WETTREG).
- Es besteht eine Gefährdung vor allem für Kiefernreinbestände durch abnehmende Sommerniederschläge und eine sinkende klimatische Wasserbilanz.
- Es wird eine Zunahme der klimatischen Waldbrandgefahr vor allem im Norden und Osten erwartet (unter WETTREG).

Potentielle Gefährdung durch Wind

- Die zukünftige Entwicklung der Sturmhäufigkeit und -intensität ist sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Hinsicht mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Während das regionale Klimamodell REMO von einer Zunahme der Anzahl der Tage mit mittleren Windgeschwindigkeiten der Stärke  $\geq 4$  Bft ( $\geq 5,5$  m/s) und  $\geq 6$  Bft ( $\geq 10,8$  m/sec) bis 2100 ausgeht, zeigt das Modell WETTREG eine Abnahme.
- Als besonders sensitiv gegenüber Sturmschäden können der Oberharz und die End-moränenzüge im nördlichen und östlichen Sachsen-Anhalt angesehen werden.

### 3.4.1. Forst und Forstwirtschaft in Sachsen-Anhalt

Rund 24 % der Landesfläche Sachsen-Anhalts sind von Wald bedeckt (z.B. BMVEL 2004). Die Waldfläche als Ökosystem liefert verschiedenste Dienstleistungen. So wirken Wälder beispielsweise als Wasserspeicher und Wasserfilter. Ebenso tragen die Waldflächen des Landes zum Hochwasserschutz bei und filtern große Mengen feinsten Stäube und Abgase aus der Luft. Durch die forstwirtschaftliche Nutzung erfolgt zudem überwiegend eine stoffliche Verwertung des Holzes, welches Kohlendioxid dauerhaft bindet (LFB 2008).

Der Umsatz der Forst- und Holzwirtschaft in Sachsen-Anhalt beträgt ca. 1,8 Mrd. € (Burkhard et al. 2008). Damit gehört Sachsen-Anhalt in diesem Bereich zu den umsatzschwächsten Ländern der Bundesrepublik (Destatis 2006). Besonders im ländlichen Raum bieten jedoch die holz- und forstwirtschaftlichen Unternehmen vergleichsweise viele Arbeitsplätze an. In Sachsen-Anhalt waren 2006 ca. 18.000 Arbeitnehmer im Bereich Holz- und Forstwirtschaft beschäftigt, was ca. 3 % der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten des Landes entspricht (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, zitiert durch Burkhard et al. 2008). Aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung sowie der vielseitigen Ökosystemdienstleistungen, ist der Wald als besonders wertvoll und schützenswert einzustufen. Im Folgenden wird daher untersucht, inwieweit sich die Veränderungen der Klimaverhältnisse auf die Wälder in Sachsen-Anhalt auswirken könnten.

### 3.4.2. Analyse der Produktivität, des Stoffhaushalts und der Waldbrandgefährdung der Wälder

Die Folgen des zu erwartenden Klimawandels für die Forstwirtschaft in Sachsen-Anhalt wurden anhand einiger ausgewählter Indikatoren untersucht, die besonders sensitiv auf klimatische Änderungen reagieren. Eine erste Gruppe umfasst Indikatoren für die Reaktion von Baumarten auf klimatische Veränderungen: die Nettoprimärproduktion (NPP) und der Stammholzzuwachs. Es ist davon auszugehen, dass einerseits die Änderung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration und andererseits die daraus resultierenden klimatischen Änderungen, Auswirkungen auf diese baumartenspezifischen Eigenschaften haben. Eine zweite Gruppe beinhaltet Indikatoren für die Reaktion des Stoffhaushalts von Waldbeständen. Charakteristisch dafür sind der Kohlenstoffhaushalt der Böden und der gesamten ober- und unterirdischen Biomasse, die jährliche Versickerungsrate als Resultat des Wasserhaushalts der Bestände und der dazugehörigen Böden sowie die klimatische Wasserbilanz (KWB) der Waldbestände. Sowohl der Kohlenstoffhaushalt als auch der Wasserhaushalt sind von besonderem Interesse, um die Leistungen und Funktionen der Wälder unter den klimatischen Veränderungen auf Bestands- und Landschaftsebene bewerten zu können. Für die Analyse der potentiellen Gefährdung der Wälder durch den Klimawandel, welche insbesondere mit der Veränderung der Niederschlagsregime verbunden sind, wird die klimatische Waldbrandgefahr analysiert.

#### 3.4.2.1. Das Waldwachstumsmodell 4C

Für die dargestellten Untersuchungen der Wirkungen von Klimaänderungen auf Wälder in Sachsen-Anhalt wurde das prozessbasierte Waldwachstumsmodell 4C (FORESEE - FOREST Ecosystems in a changing Environment) eingesetzt. Das Modell 4C, welches am

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelt wurde, ist ein physiologisch basiertes Waldwachstumsmodell, welches die Etablierung, das Wachstum und die Mortalität von Baumkohorten beschreibt (Schaber et al. 1999; Suckow et al. 2001; Lasch et al. 2005). Dabei werden Produktion und Wachstum 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 (Grote & Erhard 1999), 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 (Lasch et al. 2005). Als treibende klimatische Größen werden Tagesmittel bzw. -summen der Temperatur, des Niederschlags, der Luftfeuchte und der Strahlung benötigt, die aus Messreihen eingelesen oder aus Monatswerten mit Hilfe eines Wettergenerators hergeleitet werden können. Außerdem wird eine Zeitreihe der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration und der Stickstoff-Deposition vorgegeben. Das Modell ist gegenwärtig für die Baumarten Buche (*Fagus sylvatica* L.), Fichte (*Picea abies* L.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Eiche (*Quercus robur* L.), Birke (*Betula pendula* Roth), Gelb-Kiefer (*Pinus ponderosa* DOUGL.ex P.et C.LAWESON), Aspe (*Populus tremula* L.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) parametrisiert. Das Modell berechnet außerdem täglich eine klimatische Waldbrandgefährdung (siehe Box 3.4 1).

Hinsichtlich der Bestandesdynamik wurde das Modell an langen Zeitreihen von Dauerbeobachtungsflächen getestet (Mäkelä et al. 2000). Einzelne Komponenten des Waldwachstumsmodells 4C wurden für mehrere Baumarten an verschiedenen Standorten (v.a. an Level II-Flächen in Brandenburg, Sachsen, und Thüringen) validiert (Suckow et al. 2001; Lasch & Suckow 2007; Lasch et al. 2007). Das Modell fand im Rahmen verschiedener Projekte Anwendung, dazu gehören die Analyse verschiedener an den Klimawandel angepasster Bewirtschaftungsstrategien, auch auf Forstbetriebsebene (Lasch et al. 2005; Fürstenau et al. 2007), Sensitivitätsstudien bezüglich der Klimaänderungen (Lasch et al. 2002) und Regionalstudien in Brandenburg (Gerstengarbe et al. 2003) sowie Baden-Württemberg (Stock 2005). Innerhalb eines Forest-Focus-Projekts wurde das Modell an Level II-Flächen in Brandenburg, Niedersachsen und Bayern validiert und für Untersuchungen des Kohlenstoffhaushalts unter Klimaänderung angewendet (Badeck et al. 2007; Meiwes et al. 2007).



**Box 3.4 1: Klimatische Waldbrandgefahr**

Nach statistischen Untersuchungen über die Bedingungen für das Entstehen von Waldbränden in der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) entwickelte H. Käse (Käse 1969) eine Formel zur Errechnung der aktuellen Waldbrandgefährdung. Diese Waldbrandgefährdung lässt sich an jedem Tag (von Mitte Februar bis Ende Oktober) berechnen und gibt ein potenzielles Waldbrandrisiko für diesen Tag aus. Die Waldbrandgefahr hängt ab von der zu diesem Tag des Jahres aufsummierten Temperatur, dem aktuellen Sättigungsdefizit, den vorausgegangenen Niederschlägen und den aktuellen Phänologiedaten des entsprechenden Jahres. Der Index wird ausschließlich zwischen dem 46. und 274. Tag im Jahr berechnet:

$$I_{C,d} = k_p \cdot I_{C,d-1} + k_{phen} \cdot (T_{max} + 10) \cdot \Delta vp$$

$\Delta vp$  – Sättigungsdefizit um 13 Uhr

Sättigungsdefizit:

$$svp_{13} = 6.1078 \cdot e^{\left( \frac{17.62 \cdot T_{max}}{243.12 + T_{max}} \right)}$$

$$vp_{13} = svp_{13} \cdot h_r / 100$$

$$\Delta vp = svp_{13} - vp_{13}$$

$T_{max}$  – Maximum Tagestemperatur [°C]

$h_r$  – Relative Feuchte

$k_p$  – Niederschlagskorrektur

Niederschlagskorrektur:

$$k_p = \begin{cases} 0 & \text{if } P_d \geq 10 \text{ or } C_{snow} > 2 \\ 0.25 & \text{if } 5 \leq P_d < 10 \text{ or } C_{snow} = 2 \\ 0.5 & \text{if } 1 \leq P_d < 5 \text{ or } C_{snow} = 1 \\ 1.0 & \text{else} \end{cases}$$

$C_{snow}$  – Anzahl der Schneetage

$P_d$  – Summe Tagesniederschlag [mm]

$k_{phen}$  – Phänologiekorrektur

Phänologiekorrektur:

$$k_{phen} = \begin{cases} 0.5 & \text{if } d_{endVP} < d \text{ and } P_d \geq 5 \\ 1.0 & \text{if } d_{BB,robinia} < d < d_{endVP} \text{ and } P_d \geq 5 \\ 2.0 & \text{if } d_{BB,birch} < d < d_{BB,robinia} \text{ and } P_d < 5 \\ 3.0 & \text{if } d < d_{BB,birch} \end{cases}$$

Der Tag der Blattentfaltung der Birke ( $d_{BB,birch}$ ) wurde mit dem Ansatz des Modells 4C bestimmt. Der Tag der Blattentfaltung für die Robinie wird mit einem Temperatursummenmodell errechnet ( $d_{BB,robinia}$  ist erreicht, wenn die Temperatursumme  $T_{sum}$  über dem Schwellenwert  $T_{crit} = 537$  Gradtage ist):

$$T_{sum} = \sum_{d=1}^{d_{BB}} T(d)$$

Anschließend wird der tägliche Index  $I_{C,d}$  nach Tabelle Tab. 3.4.1 klassifiziert. Der Ausgabewert, die mittlere jährliche Waldbrandgefährdung  $I_{C,a}$ , ist der Mittelwert der täglich errechneten Waldbrandgefährdungsklassen (Mitte Februar bis Oktober).

**Tab. 3.4.1: Waldbrandgefährdungsklassen nach der Internationalen Skala (Käse 1969)**

Waldbrandgefährdungsklasse	Bedingung
1	$I_{C,d} \leq 500$
2	$500 < I_{C,d} \leq 2000$
3	$2000 < I_{C,d} \leq 4000$
4	$4000 < I_{C,d} \leq 7000$
5	$7000 < I_{C,d}$

### 3.4.2.2. Datengrundlage

#### Level II–Flächen

Durch die Nordwestdeutsche Forstliche Forschungs- und Versuchsanstalt (NW-FVA) wurden Daten (Bestand und Boden) für zwei Level II-Flächen in Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellt:

- Klötze (1501): Kiefernreinbestand, Bestandsdaten (Durchmesserdaten, einzelne Höhendaten) für 1998 (80 Jahre alt), 2003, 2004
- Nedlitz (1502), Kiefernreinbestand, Bestandsdaten (Durchmesserdaten, einzelne Höhendaten) für 1998 (51 Jahre alt), 2002, 2004, 2005

Jeder Level II-Fläche wurde eine Klimastation der Datenbank des PIK zugeordnet, um Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Zeitraum 1998 – 2006 zu erhalten:

- Klötze: Station Klötze (Code nach World Meteorological Organization WMO 48445)
- Nedlitz: Station Lindau (WMO 45009)

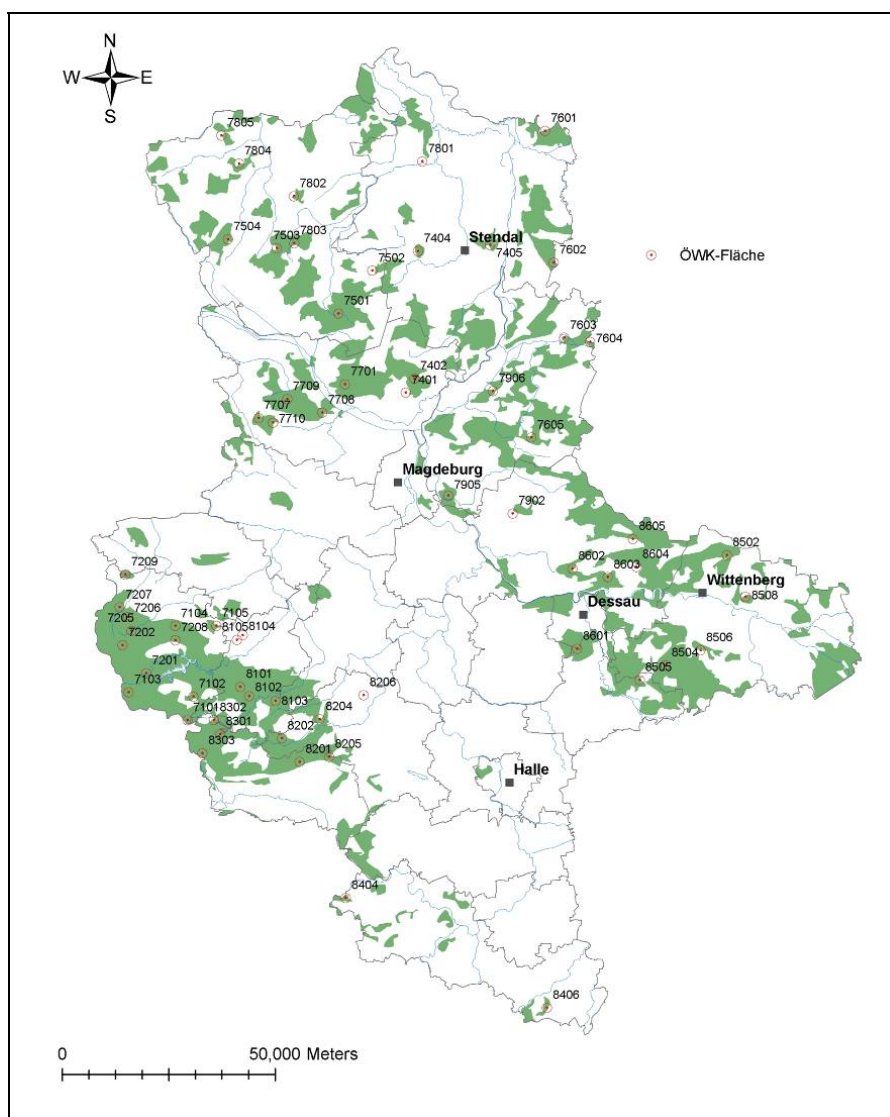
Für die Analyse wurden den Beständen WETTREG-Klimastationen und REMO-Gittermittelpunkte zugeordnet (Tab. 3.4.2). Für Vergleichszwecke wurden weiterhin Daten aus dem Klimamodell STAR (Szenario A1B) für die zugeordneten Klimastationen ausgewertet.

**Tab. 3.4.2: Geographische Daten der betrachteten Level II-Flächen mit den zugeordneten Klimastationen**

	STAR	WETTREG	REMO
Klötze 1501 (11,17/52,62; 75m)	Klötze	Gardelegen	GP_059_081
Breitengrad	11,15	11,4	11,1
Längengrad	52,62	52,52	52,6
Höhe [m]	70	47	72
Nedlitz 1502 (12,31/ 52,05; 125 m)	Lindau	Wittenberg	GP_067_074
Breitengrad	12,1	12,65	12,33
Längengrad	52,03	51,89	52,05
Höhe [m]	75	105	-

### Flächen der ökologischen Waldzustandskontrolle

Für die Abschätzungen der Wirkungen der Klimaszenarien wurden Informationen für Waldflächen in Sachsen-Anhalt benötigt. Eine Grundlage zur Auswahl einer gut beschriebenen Anzahl von Waldflächen bietet das Netz der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK). Durch die NW-FVA wurden Informationen der ÖWK-Flächen in Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellt, aus denen 62 Standorte ausgewählt wurden (Tab. 3.4.3 und Abb. 3.4.1). Dabei konnten aus dem Ursprungsdatensatz nur die ÖWK-Flächen berücksichtigt werden, für die auch Bestandesinformationen aus dem Datenspeicher Waldfonds am PIK zur Verfügung standen, da von der NW-FVA keine Bestandesdaten bereitgestellt werden konnten. Die Baumartenzusammensetzung der gewählten Bestände repräsentiert relativ gut die Zusammensetzung in den Wäldern Sachsen-Anhalts: die dominierende Baumart mit einem Anteil von 45,6 % am Gesamtvorrat ist die Kiefer, gefolgt von der Fichte mit 17,0 % (vgl. auch Abb. 3.4.48 Abb. 3.4.48).



**Abb. 3.4.1: Karte der betrachteten Flächen der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK-Flächen) in Sachsen-Anhalt**

**Tab. 3.4.3: Angaben zu den betrachteten Flächen der Ökologischen Waldzustandskontrolle in Sachsen-Anhalt**

	NR	HBA	Al- ter	Boni- tät	Ort	Hö- he	Trophie <sup>1</sup>	Wasser- haushalt	Wuchsbezirk
1	710 1	Fich- te	54	2,2	Harzhöhe	560	M	grundfeucht	Harz
2	710 2	Bu- che	60	1,8	Kreuzwege	520	K	grundfeucht	
3	710 3	Fich- te	37	2,2	Sorge	550	M	grundnass	
4	710 4	Fich- te	36	2	Benzingerode	450	M	mäßig frisch	
5	710 5	Kie- fer	68	1,5	Regenstein	180	M	wechseltro- cken	Nordöstliche Harzvorländer
6	720 1	Fich- te	52	1,2	Königshof	460	M	grundnass	Harz
7	720 2	Fich- te	77	3,2	Schierke	830	Z	Moore trocken	
8	720 5	Fich- te	72	2,9	Karlshaus	530	M	grundnass	
9	720 6	Fich- te	41	2,4	Darlingerode	530	M	grundfeucht	
10	720 7	Fich- te	50	1,2	Ilseburg	420	Z	grundnass	
11	720 8	Fich- te	53	1,5	Voigtstieg	490	M	grundfeucht	
12	720 9	Fich- te	65	2,1	Schauen	220	M	grundfrisch	Nordwestliches Harzvorland
13	740 1	Kie- fer	69	2,1	Lindhorst	75	M	frisch	Mittleres nordost- deutsches Altmo- ränenland
14	740 2	Kie- fer	58	2,5	Heinrichs- horst	80	Z	frisch	
15	740 4	Kie- fer	66	2,3	Möringen	50	Z	frisch	
16	740 5	Kie- fer	47	0,9	Arnim	45	Z	frisch	
17	750 1	Kie- fer	72	3,1	Lindenthal	80	Z	wechseltro- cken	Westprignitz- Altmarkisches Altmoränenland
18	750 2	Kie- fer	56	1,5	Trüstedt	65	Z	wechseltro- cken	
19	750 3	Bu- che	82	1,1	Wildbahn	105	M	staufeucht	
20	750 4	Kie- fer	47	1,7	Neumühle	80	Z	wechseltro- cken	
21	760 1	Kie- fer	53	1,1	Theerofen	49	M	wechseltro- cken	
22	760 2	Kie- fer	71	2,6	Wust	43	Z	frisch	Mittelbrandenbur- ger Talsand- und Moränenland
23	760 3	Kie- fer	63	2,8	Genthin	35	Z	frisch	
24	760 4	Kie- fer	69	2,5	Dunkelforth	35	Z	grundfrisch	
25	760 5	Kie- fer	68	1,5	Waldrogäsen	80	M	frisch	Mittleres nordost- deutsches Altmo-

<sup>1</sup> Nährkraftstufen nach Kopp & Schwanecke (1994) K kräftig, M Mittel Z ziemlich arm

	NR	HBA	Al- ter	Boni- tät	Ort	Hö- he	Trophie <sup>1</sup>	Wasser- haushalt	Wuchsbezirk
26	770 1	Kie- fer	61	2	Lübberitz	100	M	frisch	ränenland
27	770 7	Kie- fer	73	0,7	Hörsingen	140	K	wechseltro- cken	Nordwestliches Harzvorland
28	770 8	Kie- fer	68	0,6	Eiche	100	M	wechseltro- cken	Westprignitz- Altmärkisches Altmoränenland
29	770 9	Kie- fer	59	0,6	Altenhausen	140	K	wechseltro- cken	Nordwestliches Harzvorland
30	780 1	Eiche	66	2,2	Krumke	40	M	wechseltro- cken	Westprignitz- Altmärkisches Altmoränenland
31	780 2	Kie- fer	68	2,8	Jeggeleben	40	M	wechseltro- cken	
32	780 3	Kie- fer	60	2,1	Kakerbeck	75	Z	wechseltro- cken	
33	780 4	Kie- fer	99	1,8	Ferchow	56	K	staufeucht	
34	780 5	Kie- fer	55	2,1	Osterwohle	30	M	wechseltro- cken	
35	790 2	Kie- fer	64	1,2	Leitzkau	100	K	frisch	Mittleres nordost- deutsches Altmor- änenland
36	790 5	Kie- fer	69	2,6	Vogelsang	55	Z	frisch	
37	790 6	Eiche	77	2,1	Burg	40	K	grundfrisch	Mittelbrandenbur- ger Talsand- und Moränenland
38	810 1	Fich- te	36	1,1	Wegnerskopf	550	M	grundfeucht	Harz
39	810 2	Fich- te	59	2,9	Alexisbad	400	M	staufeucht	
40	810 3	Fich- te	58	1,7	Wilhelmshof	400	K	grundfrisch	
41	810 4	Bu- che	66	2	Rennplatz	160	M	wechseltro- cken	Nordöstliche Harzvorländer
42	810 5	Eiche	66	1,2	Heteborn	190	K	wechseltro- cken	
43	820 1	Bu- che	73	1,5	Pansfelde	365	M	mäßig frisch	Harz
44	820 2	Bu- che	26	1,9	Schiefergra- ben	360	K	grundfrisch	
45	820 4	Fich- te	78	1,5	Saurasen	295	K	wechseltro- cken	
46	820 5	Bu- che	56	2,5	Annarode	370	M	wechseltro- cken	
47	820 6	Eiche	51	0,3	Walbeck	200	K	wechseltro- cken	
48	830 1	Fich- te	39	1,6	Oberforst	520	M	grundfeucht	
49	830 2	Fich- te	60	1	Straßberg	460	M	grundfrisch	
50	830 3	Bu- che	65	1,1	Rodishayn	380	K	grundfeucht	
51	840 4	Fich- te	67	1,7	Wohlmirstedt	260	K	wechseltro- cken	Nordthüringisches Trias-Hügelland



	NR	HBA	Al- ter	Boni- tät	Ort	Hö- he	Trophie <sup>1</sup>	Wasser- haushalt	Wuchsbezirk
52	840 6	Fich- te	73	2	Breitenbach	260	M	wechseltro- cken	Sächsisch- Thüringisches Löß-Hügelland
53	850 2	Kie- fer	52	1,7	Kropstädt	110	Z	frisch	Hoher Fläming
54	850 4	Kie- fer	51	2,3	Gräfenhaini- chen	135	M	wechseltro- cken	Düben- Niederlausitzer Altmoränenland
55	850 5	Kie- fer	46	0,7	Gesundbrun- nen	100	M	frisch	Mittleres nordost- deutsches Altmo- ränenland
56	850 6	Kie- fer	51	1,3	Kemberg	105	M	wechseltro- cken	Düben- Niederlausitzer Altmoränenland
57	850 8	Kie- fer	66	3	Mühlanger	75	M	frisch	Mittleres nordost- deutsches Altmo- ränenland
58	860 1	Kie- fer	56	0,7	Lingenau	80	M	frisch	
59	860 2	Kie- fer	62	2,6	Spitzberg	85	M	frisch	
60	860 3	Kie- fer	61	1,8	Roßlau	80	M	frisch	
61	860 4	Kie- fer	51	1,3	Buko	110	Z	wechseltro- cken	Hoher Fläming
62	860 5	Kie- fer	92	3,5	Stackelitz	105	M	wechseltro- cken	

### 3.4.2.3. Das Simulations- und Auswertungskonzept

#### Simulationen

Alle Bestände wurden mit der verfügbaren Initialisierung für vier Zeitperioden von jeweils 30 Jahren ohne Bewirtschaftung simuliert (Basiszeitraum (BASZ): 1961-1990; Szenarienzeiträume: P1: 2011-2040, P2: 2041-2070, P3: 2071-2100). Es wurden konstante atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 350 ppm für alle Simulationen angenommen. Für die Simulation mit dem Modell WETTREG wurden jeder ausgewählten ÖWK-Fläche WETTREG-Klimadaten mittels einer Inverse Distance Weighting (IDW)-Interpolation auf die Koordinaten der ÖWK-Fläche zugeordnet (siehe Kapitel 2.3.1.). Für die oben genannten Zeiträume P1-P3 wurden je drei Realisierungen (feucht, mittel, trocken) der Szenarien A1B, A2 und B1 der zugeordneten Klimadaten verwendet. Die Ergebnisse der Simulationsexperimente für die drei Realisierungen wurden abschließend jeweils für alle Größen gemittelt.

Die aufbereiteten REMO-Klimaszenarien (für Vergangenheit und Zukunftsperioden) wurden, wie in Kapitel 2.3.2. beschrieben, den ÖWK-Flächen nach ihrer Lage in den Gitterzellen zugeordnet.

#### Auswertungen



Die folgende Analyse der projizierten Auswirkungen der Klimaänderung anhand der Klimaszenarien konzentriert sich auf charakteristische Waldwachstums- und Stoffhaushaltsgrößen sowie einen Indikator für Trockenheitsgefährdung und die klimatische Waldbrandgefahr (Käse 1969). Die betrachteten Größen sind:

- Die jährliche Nettoprimärproduktion (NPP, [t C/ha/a]) (als Mittel über den jeweiligen Simulationszeitraum) als Indikator für die Gesamtleistung des Bestandes, einschließlich Wurzel- und Blattwachstum.
- Der mittlere jährliche laufende Stammholzzuwachs (SZ, t TM/ha/a) sowie die relative Änderung des Stammholzzuwachses (rSZ, %) in den Zukunftszeiträumen verglichen mit dem Basiszeitraum (entspricht 100%).
- Die gesamte Kohlenstoffspeicherung im Bestand, ober- und unterirdische Biomasse und Boden, am Ende der Simulationszeit (t C/ha) bzw. relative Änderung dieser Größe in den Zukunftszeiträumen verglichen mit dem Basiszeitraum (100%).
- Die mittlere (über 30 Jahre) jährliche klimatische Wasserbilanz (KWB, [mm]), berechnet aus dem Niederschlag (NS) und der potentiellen Evapotranspiration (PET) nach Turc/Ivanov.
- Die mittlere (über 30 Jahre) jährliche Versickerung [mm] und ihre relative Änderung unter den Annahmen der Klimaszenarien.
- Die mittlere klimatische Waldbrandgefahr (Käse 1969), berechnet pro Jahr auf täglicher Basis von Frühjahr bis Herbst und gemittelt für die Simulationsperiode sowie ihre relative Änderung unter den Klimaszenarien.

Die Analyse der Simulationsergebnisse wurde folgendermaßen durchgeführt:

- Vergleich der regionalen Klimamodelle WETTREG und REMO.
- Vergleich der Emissionsszenarien A2, A1B und B1, um die Bandbreite (im Hinblick auf sozioökonomische Entwicklungen und CO<sub>2</sub>-Emissionen) unterschiedlicher Klimawandelszenarien einzuschätzen.
- Vergleich unterschiedlicher Wuchsbezirke bzw. Wuchsgebiete (s. Anhang Abb. 3.4.17).
- Vergleich der Reaktionen der vier untersuchten Baumarten Kiefer, Fichte, Eiche, Buche im Hinblick auf Klimawirkungen.
- Darstellung der Ergebnisse zum Kohlenstoff- und Wasserhaushalt sowie zur klimatischen Waldbrandgefahr in Form von IDW-interpolierten Daten der 62 ÖWK-Flächen, verschnitten mit der Waldfläche in Sachsen-Anhalt. Die Ergebnisse an den Einzelflächen werden zur Verfügung gestellt<sup>2</sup>.

Unter den 62 ÖWK-Flächen sind 34 Rein- bzw. Mischbestände mit einem Hauptanteil an Kiefer, 18 Rein- bzw. Mischbestände mit einem Hauptanteil an Fichte, vier Rein- bzw. Mischbestände mit einem Hauptanteil an Eiche und sechs Rein- bzw. Mischbestände mit einem Hauptanteil an Buche. Für eine übersichtliche, grafische Darstellung wurden die Bestände, wie in Tab. 3.4.4 beschrieben, eingeteilt. Für die Baumarten Fichte und Kiefer wurden teilweise pro Wuchsbezirk mehrere Bestände simuliert. Wenn mehrere Bestände pro Wuchsbezirk berechnet wurden, erfolgte eine Mittelung der Ergebnisse. Wenn lediglich ein Bestand pro Wuchsbezirk berechnet wurde, dann wurde dieser Wert unverändert für den Wuchsbezirk dargestellt. Für Buche und Eiche wurde aufgrund der geringen An-

<sup>2</sup> ergebnisse\_owek\_lsa.xls

zahl von Beständen auf die Vorgehensweise verzichtet und direkt die Bestandeswerte dargestellt.

**Tab. 3.4.4: Die untersuchten Bestände und ihre forstlichen Wuchsgebiete und -bezirke**

Wuchsgebiet	Wuchsbezirk (Bundesland)	Baumarten	Anzahl der Bestände
Düben-Niederlausitzer Alt-moränenland	Dübener Heidehochfläche (ST, SN) <sup>2</sup>	Kiefer	2
Hoher Fläming	Wiesenburger Hochfläming (Wiesenburger Fläminghochfläche) (BB, ST) <sup>2</sup>	Kiefer	2
	Nedlitzer Flämingrandplatte (Altmoränenplatte) (BB, ST)		1
Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland	Premnitzer Talsand und Platten	Kiefer	1
	Elbe-Havelwinkel-Niederung (BB, ST)	Kiefer, Eiche	2
	Schollener Platte (BB, ST)	Kiefer	1
Mittleres nordost-deutsches Altmoränenland	Colbitzer Platte <sup>2</sup>	Kiefer	3
	Stendaler Platte <sup>2</sup>		2
	Möckern-Ziesarsche Platte (ST, BB) <sup>2</sup>		5
	Gräfenheinicher Heiderandplatte		1
	Schweinitzer Elbe-Elster-Sandterrasse		1
	Mosigkauer Platte		1
Harz	Nördlicher Harzrand	Fichte	1
	Mittelharz <sup>2</sup>		5
	Mittleres Unterharz-Plateau <sup>2</sup>	Buche (1) <sup>1</sup> Fichte (5) Kiefer (1)	7
	Hochharz	Fichte	1
	Östlicher Unterharz <sup>2</sup>	Fichte (2) Buche (1)	3
	Ostharzer Abdachung	Buche, Fichte, Eiche	3
	Südharz	Buche	1
Nordöstliche Harzvorländer	Halberstädter Harzvorland	Kiefer, Buche, Eiche	3
Nordthüringisches Trias-Hügelland	Finne-Schrecke-Schmücke-Hügelland (ST, TH)	Fichte	1
Nordwestliches Harzvorland	Hornburg-Osterwiecker Harzvorländer (ST, NI)	Fichte	1
	Lappwald-Flechtlinger Hügelland (ST, NI) <sup>2</sup>	Kiefer	2
Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland	Altenburg-Zeitzer-Löß-Hügelland	Fichte	1
Westprignitz-Altmärkisches Altmoränenland	Letzlinger Platte <sup>2</sup>	Kiefer	2
	Klötzer Hochfläche	Buche, Kiefer	2
	Aller-Ohre-Drömling-Niederung	Kiefer	1
	Pritzwalker Platte (BB, MV)		1
	Flechtlinger Randplatte		1
	Ostheide-Altmärkische Platte <sup>2</sup>	Kiefer (3) Eiche (1)	4

<sup>1</sup> – Die geklammerte Zahlen zeigen die Anzahl der Bestände der Baumarten an.

<sup>2</sup> – Mittelung der Ergebnisse für Fichte oder Kiefer

BB - Brandenburg, MV - Mecklenburg Vorpommern, NI - Niedersachsen, TH - Thüringen, SN - Sachsen, ST - Sachsen-Anhalt

### 3.4.2.4. Modellvorbereitung

#### Validierung des Waldentwicklungsmodells 4C anhand der Level II-Flächen

Die Datensätze der beiden Level II-Flächen wurden herangezogen, um eine Validierung für die dortigen Kiefernbestände durchzuführen. Dazu mussten die gelieferten Daten modellgerecht aufbereitet werden. In einem ersten Schritt wurden Höhenfunktionen angepasst, um pro Standort und Jahr einen kompletten Datensatz pro Baum bestehend aus Alter, Bruthöhendurchmesser (BHD) und Oberhöhe (HO) zu erhalten. Mit diesen kompletten Datensätzen wurden mit dem Waldwachstumsmodell 4C Initialisierungsfiles für die Bestände beider Standorte und für alle Erhebungsjahre erzeugt. Die Daten der Erhebungsjahre dienen vor allem der Validierung, können aber auch als Startwerte für Simulationen eingesetzt werden. Eine Zusammenfassung der Initialisierungen ist in Tab. 3.4.5 dargestellt.

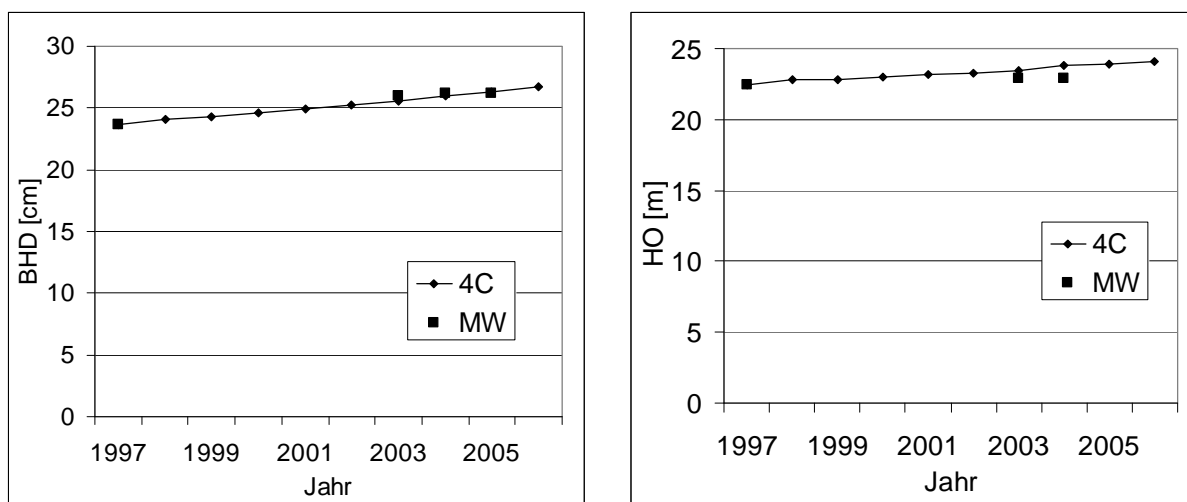
**Tab. 3.4.5 Zusammenfassung der Standort-Initialisierungen für das Waldwachstumsmodell 4C im Vergleich zu den gelieferten Bestandesdaten der NW-FVA (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt)<sup>3</sup> (N Stammzahl, BHD Bruthöhendurchmesser, HO Oberhöhe, V Volumen, G Grundfläche)**

4C Initialisierung						Angaben nach den gelieferten Daten <sup>4</sup> (NW-FVA)			
1501 Klötze									
Jahr	N [ha]	BHD [cm]	HO [m]	V [m³]	G [m²]	G [m²/2500m²]	G [m²]	H [m]	N [ /2500m²]
1998	688	23,7	22,4	691	30,4	7,5	30	20,9	172
2004	676	26,0	22,9	686	35,9	9,0	35,8	21	169
2005	676	26,2	22,9	687	36,5	9,1	36,4		169
1502 Nedlitz									
1998	1276	18,2	21,5	398	33,2	8,3	33,2	18,7	319
2002	1216	19,4	22,1	431	35,9	9,0	36,0	19	304
2004	1036	20,8	22,2	422	35,2	8,4	33,6	19,7	259
2005	1016	21,2	22,3	429	35,7				

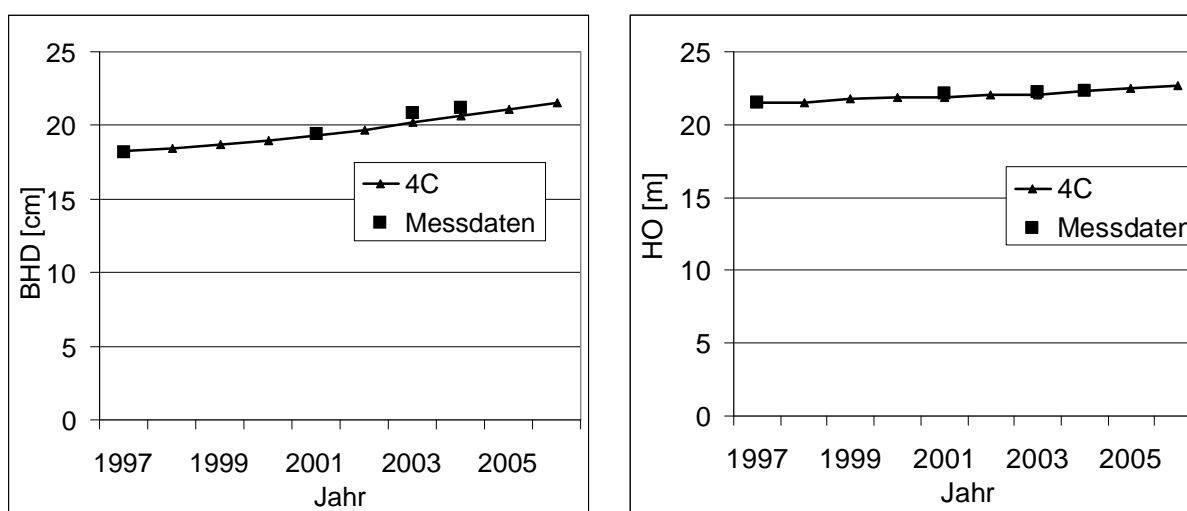
Aus den von der NW-FVA gelieferten Bodendaten wurden Bodeninitialisierungen für beide Standorte als weitere Vorbereitung für die Durchführung der Simulationen erstellt. Die von der NW-FVA zur Verfügung gestellten Klimadaten waren unvollständig und konnten daher nicht verwendet werden. Stattdessen wurden Daten aus der PIK-Klimadatenbank verwendet. Es erfolgten Simulationen für den Zeitraum 1998-2005 und ein Vergleich der Beobachtungsdaten mit den Simulationsergebnissen. Aufgrund der geringen Anzahl von Jahren, für die Werte zur Verfügung standen, wurde keine statistische Auswertung vorgenommen. Die Simulation für den Bestand Klötze mit der Bestandsinitialisierung für 1998 zeigt eine recht gute Übereinstimmung zwischen Beobachtungs- und Simulationsdaten (Abb. 3.4.2). Die gilt auch für den Bestand Nedlitz (Abb. 3.4.3). Weitere Bestandsgrößen standen dem PIK zum Vergleich nicht zur Verfügung. Die bereitgestellten Daten zum Wasserhaushalt konnten innerhalb des Projektzeitraumes nicht bearbeitet werden.

<sup>3</sup> Leere Felder zeigen an, dass diese Bestandeswerte nicht geliefert wurden, wohl aber Einzelbaumdaten.

<sup>4</sup> ertrag\_ned\_05.xls, ertrag\_klt\_05.xls



**Abb. 3.4.2: Vergleich der gemessenen und simulierten Bestandswerte Brusthöhendurchmesser (BHD) und Oberhöhe (HO) für den Bestand Klötze für den Zeitraum 1997 – 2006**



**Abb. 3.4.3: Vergleich der gemessenen und simulierten Bestandswerte Brusthöhendurchmesser (BHD) und Oberhöhe (HO) für den Bestand Nedlitz für den Zeitraum 1997-2006**

#### Aufbereitung der Daten der Flächen der ökologischen Waldzustandskontrolle für die Modellanwendung mit 4C

Die benötigten Bestandsdaten für die ausgewählten 62 ÖWK-Flächen (Tab. 3.4.3) stammen aus einer Version des Datenspeicherwaldfonds, die dem PIK über das Projekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) „Deutsche Waldstudie“ zur Verfügung gestellt wurden. Sie enthält Bestandesdaten aus den 1980er Jahren. Die benötigten Bodendaten lagen aus Erhebungen aus dem Jahr 1990 in Papierform auf Seiten der NW-FVA vor. Sie wurden am PIK digitalisiert und aufbereitet. Diese Daten werden der NW-FVA ebenfalls zur Verfügung gestellt.

#### 3.4.2.5. Ergebnisse der Level II-Flächen

Um die Klimawirkungen auf verschiedene Bestandeseigenschaften exemplarisch aufzuzeigen, wurde für die Flächen Klötze und Nedlitz ein Vergleich der Szenarien und Wirkun-



gen vorgenommen. Dazu wurde für 30 Jahre (Startjahr 2004) mit dem Bestand Klötze bzw. Nedlitz simuliert, es variierten nur die Klimadaten. Zusätzlich wurde ein Simulationslauf mit Daten der PIK-Klimadatenbank für 1961-1990 und ein Lauf mit einem STAR-Szenario (A1B, normale Realisierung) für den Zeitraum 2011 - 2041 durchgeführt. Aus den zugeordneten Klimadaten für 1961-1990 ist zu erkennen, dass der Standort Nedlitz wärmer und trockener ist als der Standort Klötze (Tab. 3.4.6, Tab. 3.4.7).

Die Ergebnisse zeigen deutlich die großen Unterschiede zwischen den Klimamodellen, vor allem für den Zeitraum 1961-1990. Für diesen Zeitraum weichen die 30 - Jahresmittel für Temperatur und Jahresniederschlag unter den Modellen WETTREG und REMO für den Bestand Klötze deutlich von den Daten der zugeordneten STAR- Station ab. Diese Unterschiede haben Folgen für die forstlichen Ertragsgrößen Nettoprimärproduktion und laufender Stammholzzuwachs, den Kohlenstoffhaushalt (Kohlenstoffakkumulation im Boden, Gesamt-Kohlenstoffvorrat im Bestand) und den Wasserhaushalt (klimatische Wasserbilanz und Versickerung).

#### **Klötze (Tab. 3.4.6)**

- Die *Produktivität* und der jährliche mittlere *Stammholzzuwachs* des Kiefernbestandes sind unter allen Szenarienzeiträumen sowohl in den Projektionen des Modells WETTREG als auch des Modells REMO höher als im Basiszeitraum.
- Dem Modell WETTREG nach ist die *KWB* bereits im Basiszeitraum negativ und nimmt mit der Zeit weiter ab. Unter den Projektionen des Klimamodells REMO ist die *KWB* für den Basiszeitraum positiv; sie nimmt mit dem Voranschreiten der Zeiträume ab, bleibt aber positiv. Die *Versickerung* geht unter den Szenarien des Modells WETTREG sehr stark zurück, unter denen des Modells REMO ist der Rückgang wesentlich schwächer.
- Die *klimatische Waldbrandgefahr* nimmt sowohl nach den Projektionen des Modells WETTREG als auch REMO im Laufe des Jahrhunderts zu. Sie liegt in dem Modell WETTREG deutlich höher als in dem Modell REMO.

#### **Nedlitz (Tab. 3.4.7)**

- Die *Produktivität* und der jährliche *Stammholzzuwachs* steigen sowohl für in dem Modell REMO als auch in dem Modell WETTREG in dem Zukunftszeitraum 2011-2040 gegenüber dem Basiszeitraum an. Für die beiden folgenden Zeiträume 2041-2070 und 2071-2100 sinken sie in den Projektionen des Modells WETTREG unter das Niveau des Basiszeitraumes, unter dem Modell REMO steigen sie weiter an. Die höhere Produktivität im Vergleich zu dem Standort Klötze ist vermutlich altersbedingt.
- Die *KWB* zeigt an, dass der Standort Nedlitz trockener ist als der Standort Klötze. Unter heutigen Bedingungen ist die *KWB* nach dem Modell STAR II, basierend auf DWD-Daten, und nach dem Modell WETTREG negativ und sinkt in den Simulationszeiträumen weiter.
- Die *klimatische Waldbrandgefahr* steigt unter beiden Szenarien deutlich an, liegt an dem Standort Nedlitz höher als für Klötze und unterstreicht damit die stärkere Trockenstressbelastung für diesen Standort.

**Tab. 3.4.6: Simulationsergebnisse für den Level II-Standort Klötze (1501)**  
**Simulation mit dem Waldwachstumsmodell 4C für das Klimaszenario A1B nach den Modellen WETTREG, REMO und STAR**

		1961-1990			2011-2040			2041-2070		2071-2100	
		mittel	normal		mittel	normal		normal		normal	
Größe	Maßeinheit	STAR	WETTREG	REMO	STAR	WETTREG	REMO	WETTREG	REMO	WETTREG	REMO
NPP	t C/ha/a	6,59	6,55	7,00	7,54	6,92	7,38	7,38	7,87	7,63	8,35
SZ	t DW/ha/a	6,11	6,13	6,56	7,09	6,46	6,91	6,90		7,13	7,91
LAI		3,58	3,66	3,90	4,08	3,80	3,92	3,95	4,04	4,00	4,25
GB	t DW/ha	517,79	532,92	543,01	577,57	537,07	545,97	546,71	553,64	556,58	577,68
GC	t C/ha	552,22	544,43	556,62	570,76	558,03	567,72	573,17	586,24	579,69	596,37
BCA	t C/ha/a	1,40	1,25	1,29	1,37	1,39	1,40	1,51	1,45	1,53	1,41
WBI		2,06	2,20	1,81	2,39	2,24	1,79	2,49	1,90	2,76	2,03
V	mm	215,7	116,2	280,2	178,5	106,6	255,4	56,1	286,8	33,0	225,6
KWB	mm	33,8	- 91,2	103,0	-31,3	-96,2	80,5	- 174,7	111,5	- 223,5	31,4
T	°C	8,4	8,8	9,5	10,1	9,0	10,1	10,1	11,3	11,1	12,5
NS	mm	593,2	488,4	701,4	599,0	498,4	696,1	463,0	750,5	448,3	704,8
NA			- 104,8	108,2		- 100,6	97,1				
R	J/cm <sup>2</sup>	969,4	987,6	1011,4	1020,3	1019,2	1018,9	1036,4	1005,4	1054,9	1020,4

NPP – Nettoprimärproduktion; SZ – jährlicher Stammholzzuwachs; LAI Blattflächenindex nach 30 Jahren; GB- gesamte Biomasse im Bestand nach 30 Jahren; GC – Gesamt-Kohlenstoff im Bestand nach 30 Jahren; BCA – jährliche Bodenkohlenstoffakkumulation; WBI – mittlerer Waldbrandindex (Käse 1969); KWB – Klimatische Wasserbilanz; NS-Niederschlag; NA – Abweichung N von dem Wert für STAR; R – Strahlung

**Tab. 3.4.7: Simulationsergebnisse für den Level II-Standort Nedlitz (1502)****Simulation mit dem Waldwachstumsmodell 4C für das Klimaszenario A1B nach den Modellen WETTREG, REMO, STAR**

		1961-1990			2011-2040			2041-2070		2071-2100	
		mittel	normal		mittel	normal		normal		normal	
Größe	Maßeinheit	STAR	WETTREG	REMO	STAR	WETTREG	REMO	WETTREG	REMO	WETTREG	REMO
NPP	t C/ha/a	7,19	7,19	7,91	7,80	7,27	7,95	7,08	8,24	7,09	8,66
SZ	t DW/ha/a	6,56	6,57	7,32	7,15	6,65	7,38	6,39	7,66	6,39	8,06
LAI		3,99	3,98	4,42	4,32	3,94	4,29	3,77	4,18	4,00	4,65
GB	t DW/ha	426,21	421,74	463,27	454,23	418,05	449,77	402,26	440,22	421,74	488,62
GC	t C/ha	472,39	474,02	490,24	485,95	478,24	494,16	471,84	504,82	465,19	507,05
BCA	t C/ha/a	1,36	1,38	1,40	1,37	1,42	1,40	1,40	1,44	1,29	1,36
WBI		2,14	2,33	1,92	2,40	2,42	1,86	2,62	1,98	2,79	2,10
V	mm	133,20	131,70	254,50	143,70	122,50	261,90	102,20	302,30	123,60	246,80
KWB	mm	- 64,40	- 79,34	91,26	-80,85	-96,35	92,00	- 176,39	122,67	- 184,45	45,15
T	°C	9,00	9,30	9,00	10,60	9,30	9,60	10,50	10,80	11,40	12,00
NS	mm	532,10	534,30	702,90	579,70	531,10	717,70	501,30	775,80	523,00	733,50
NA			2,20	170,80		- 48,60	138,00				
R	J/cm <sup>2</sup>	1006,98	1022,49	1056,12	1053,57	1054,75	1058,00	1076,26	1048,51	1094,63	1063,06

NPP – Nettoprimärproduktion; SZ – jährlicher Stammholzzuwachs; LAI Blattflächenindex nach 30 Jahren; GB- gesamte Biomasse im Bestand nach 30 Jahren; GC – Gesamt-Kohlenstoff im Bestand nach 30 Jahren; BCA – jährliche Bodenkohlenstoffakkumulation; WBI – mittlerer Waldbrandindex (Käse 1969); KWB – Klimatische Wasserbilanz; NS-Niederschlag; NA – Abweichung N von dem Wert für STAR; R – Strahlung

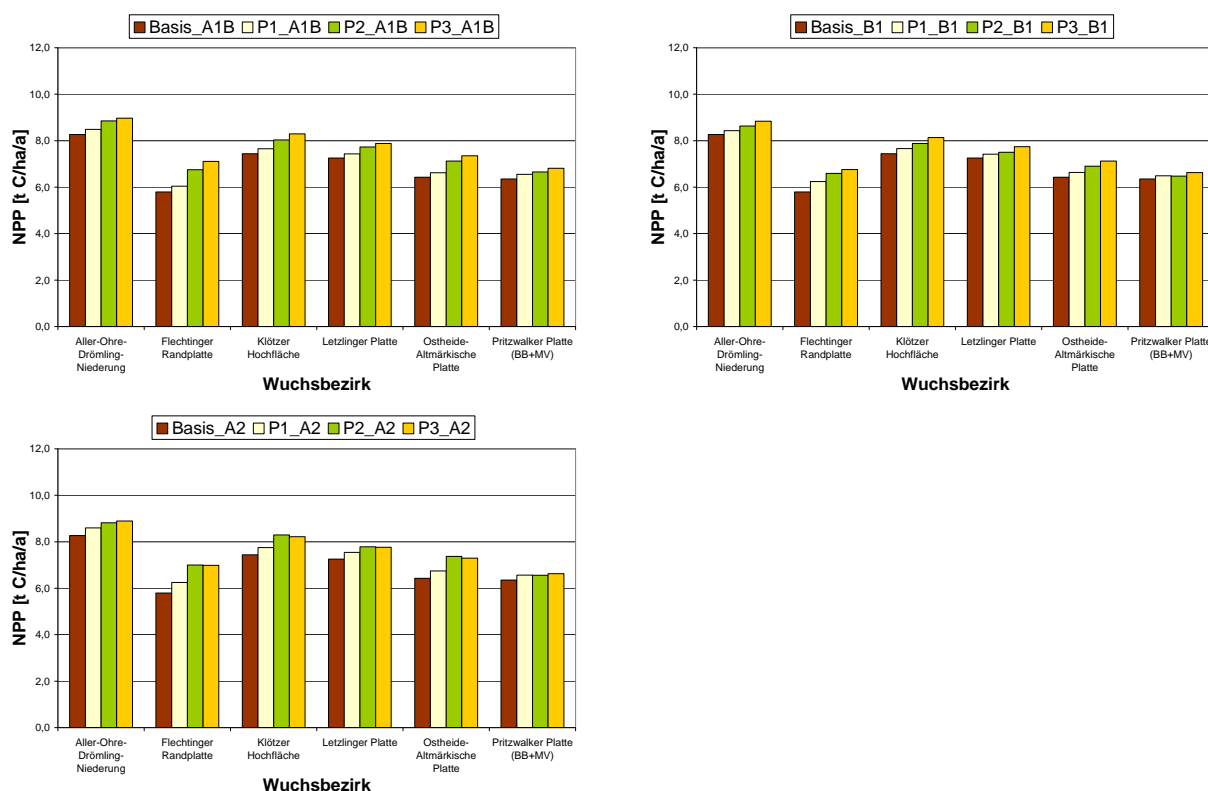
### 3.4.2.6. Ergebnisse der Produktivität der ÖWK-Flächen

Entsprechend der Einteilung der Bestände der ÖWK-Flächen nach Wuchsgebieten (WG) und -bezirken (WB) (siehe Tab. 3.4.4) werden die Ergebnisse für die vier betrachteten Baumarten für die jährliche Nettoprimärproduktion (NPP, t C /ha/a) und die relative Änderung des Stammholzzuwachses (rSZ, %) gegenüber dem Basiszeitraum (100%) dargestellt.

#### A) Kiefer im Wuchsgebiet Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland

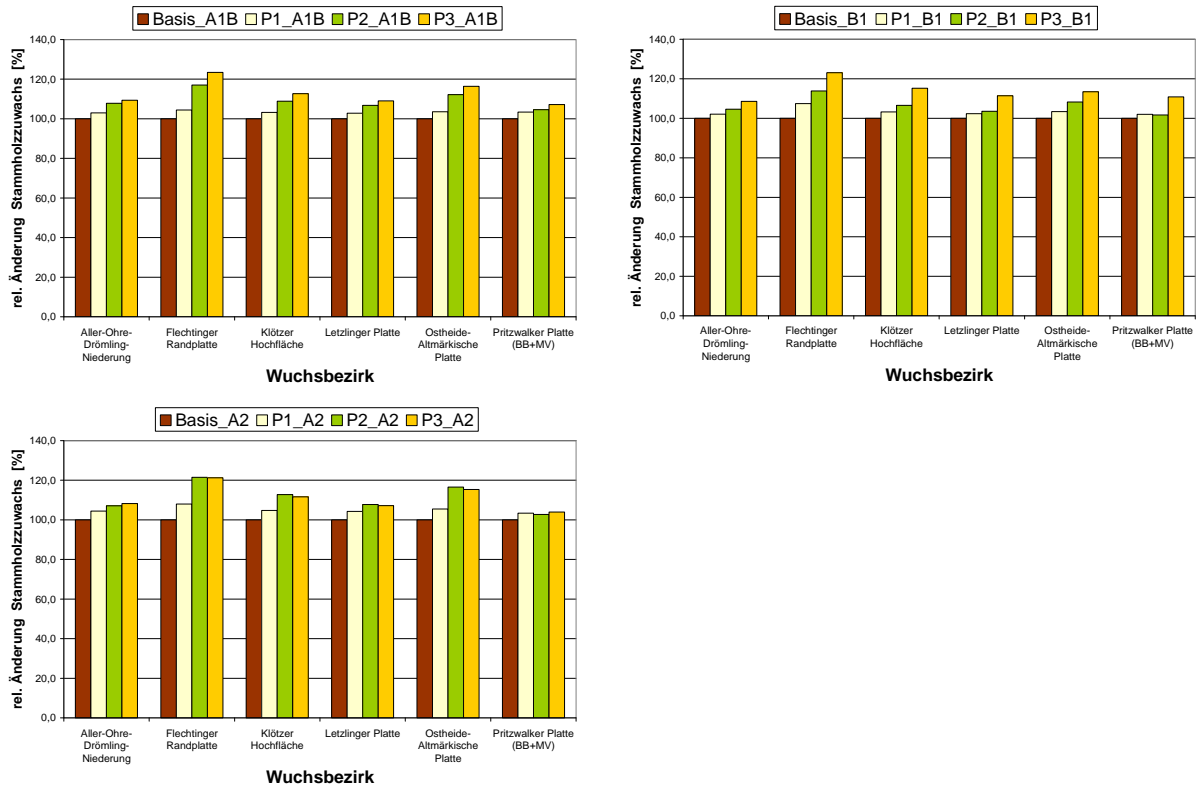
##### I. WETTREG

Eine kontinuierliche Zunahme der Nettoprimärproduktion wurde für alle drei Zukunftszeiträume unter den Szenarien A1B und B1 berechnet, für das Szenario A2 und den Zeitraum 2071 - 2100 ist die Zunahme der mittleren Nettoprimärproduktion geringer als in den Zeiträumen 2011 - 2040 und 2041 - 2070 (Abb. 3.4.4). Die Aussagen für die Änderung des relativen Stammholzzuwachses sind hier ähnlich, die Änderungsraten steigen kontinuierlich, nur unter dem Szenario A2 zeigen sich teilweise Rückgänge in dem Zeitraum 2071 - 2100 (Abb. 3.4.5).



**Abb. 3.4.4: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände im Wuchsgebiet Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland nach dem Modell WETTREG<sup>5</sup>**

<sup>5</sup> In allen Abbildungen zu Veränderungen in den Wuchsgebieten sind die Mittelwerte über alle Bestände innerhalb eines Wuchsbezirkes im Basiszeitraum 1961-1990 und unter den Szenarien A1B, B1 und A2 für die Zukunftsperioden P1 (2011 - 2040), P2 (2041 - 2070) und P3 (2071 - 2100) dargestellt.

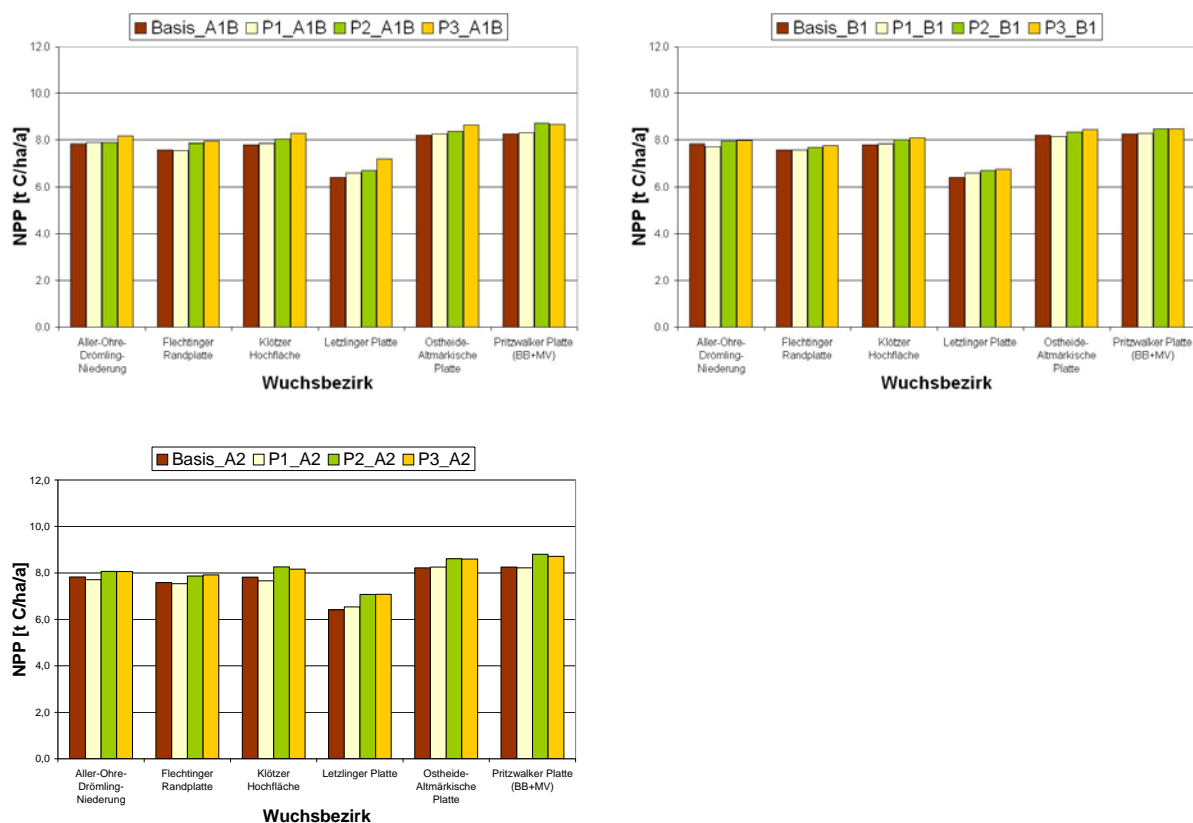


**Abb. 3.4.5: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände im Wuchsgebiet Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland nach dem Modell WETTREG**

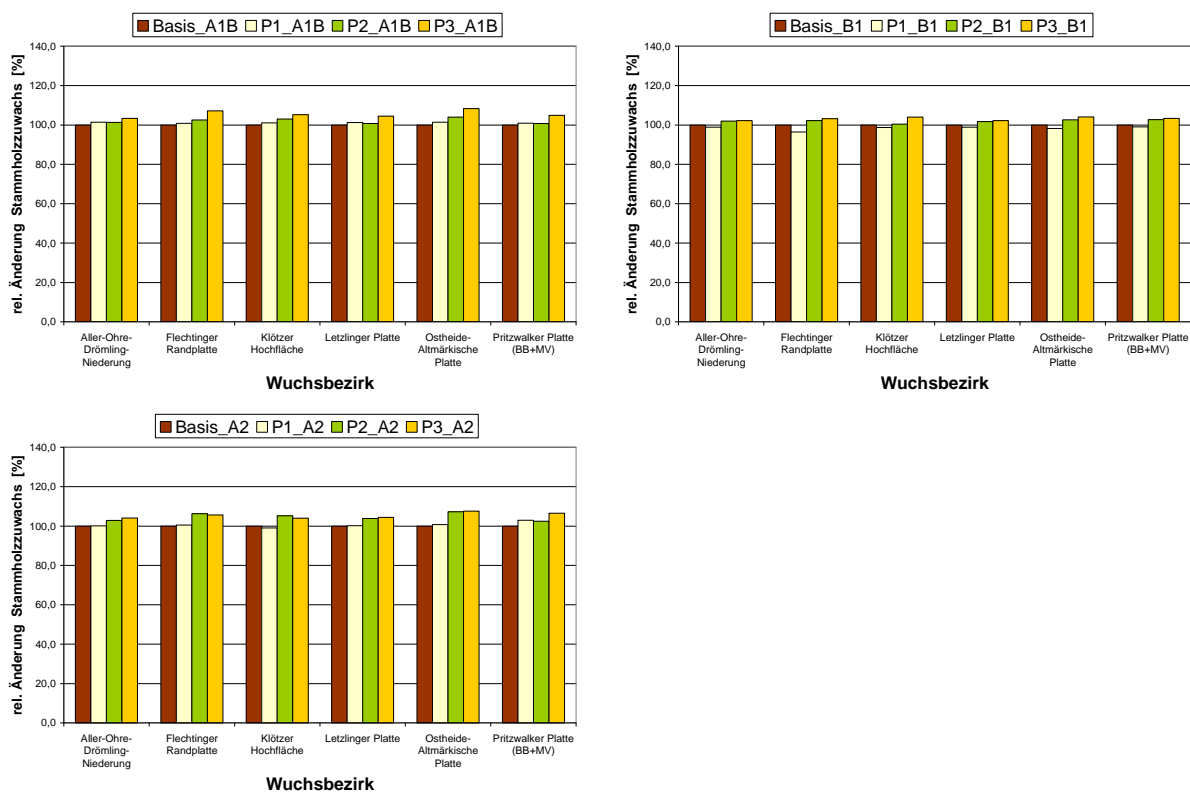
## II. REMO

Das Modell simuliert eine schwache, aber kontinuierlich steigende Nettoprimärproduktion unter den Szenarien A1B und B1 mit einer teilweisen Reduktionen in dem Zeitraum 2071 – 2100 unter dem Szenario A2 und eine teilweise Reduktionen der Nettoprimärproduktion in dem Zeitraum 2011 - 2040 unter die Werte des Basiszeitraumes 1961 – 1990 (Abb. 3.4.6). Die Aussage für die relative Änderung des Stammholzzuwachses ist analog dazu (Abb. 3.4.7).





**Abb. 3.4.6: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) der Kiefernbestände im Wuchsgebiet Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland nach dem Modell REMO**



**Abb. 3.4.7: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände im Wuchsgebiet Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland nach dem Modell REMO**

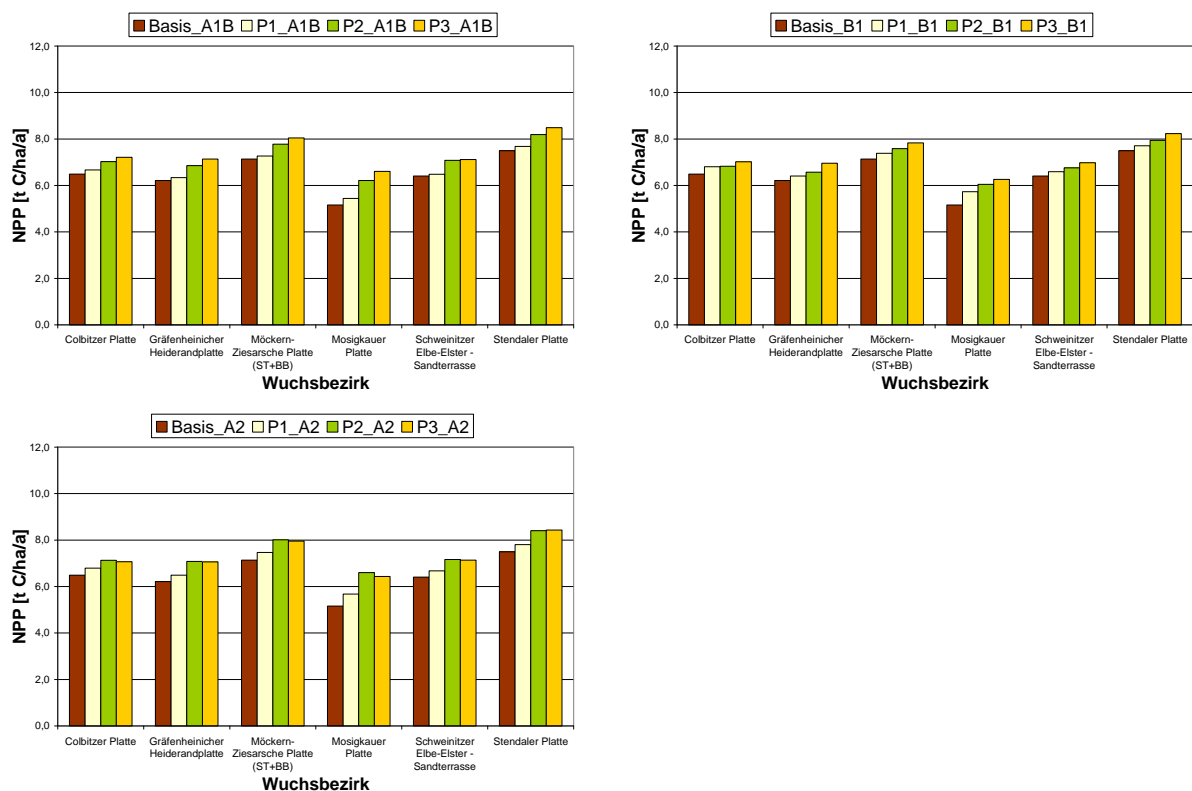
### III. Vergleich der Ergebnisse unter den Modellen WETTREG und REMO

Unter REMO-Szenarien wird generell eine höhere Nettoprimärproduktion simuliert, es gibt jedoch unterschiedliche Reaktionen einzelner Wuchsbezirke z.B. eine deutlich niedrigere Nettoprimärproduktion für die Flechtlinger Platte unter dem Modell WETTREG als unter REMO, aber für den Wuchsbezirk Klötzer Hochfläche ähneln sich die Ergebnisse beider Klimamodelle.

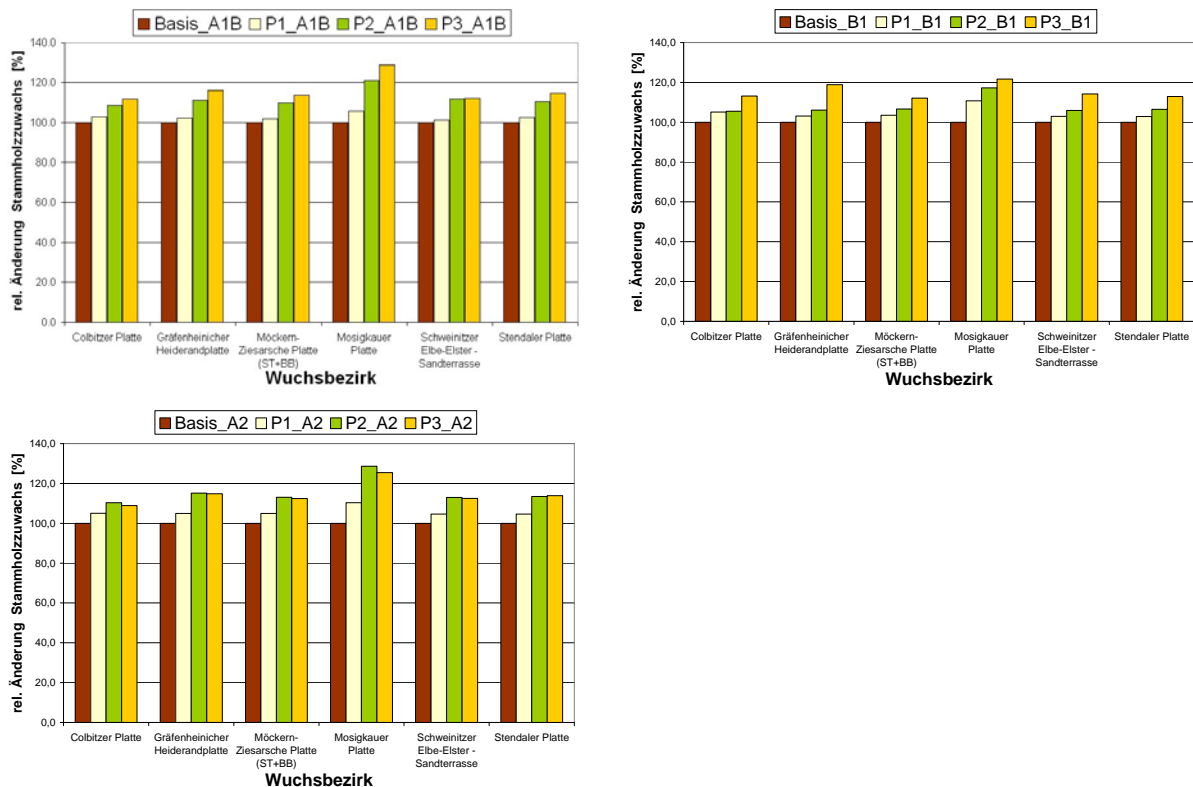
#### **B) Kiefer im Wuchsgebiet Mittleres nordostdeutsches Altmoränenland**

##### I. WETTREG

Unter dem Szenario B1 wird meist die geringste Nettoprimärproduktion berechnet (geringster Temperaturanstieg im Vergleich zu den Szenarien A1B und A2), die Nettoprimärproduktion unter dem Szenario A2 ist in den Zeiträumen 2011-2040 und 2041-2070 am höchsten, für den Zeitraum 2071-2100 ist dann aber das Szenario A1B das produktivste Szenario (Abb. 3.4.8). Für die relative Änderung des Stammholzzuwachses stellt sich für die Zeiträume 2011-2040 und 2041-2070 das Szenario A2 als das produktivste dar. Allerdings stagnieren die Änderungen für den Zeitraum 2071-2100, während unter den Szenarien A1B und B1 eine Zunahme der Stammholzzuwachse für alle Zeitperioden simuliert wird (Abb. 3.4.9).



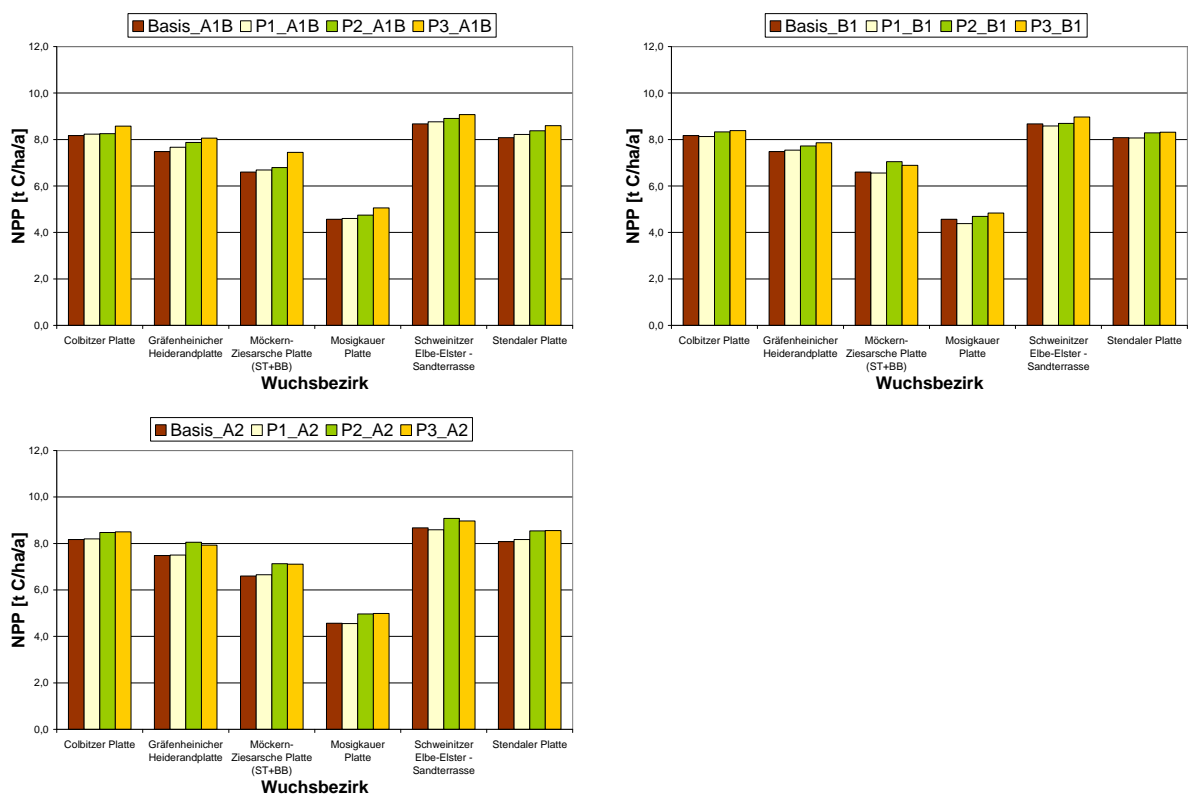
**Abb. 3.4.8: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände im Wuchsgebiet mittleres nordostdeutsches Altmoränenland nach dem Modell WETTREG (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt)**



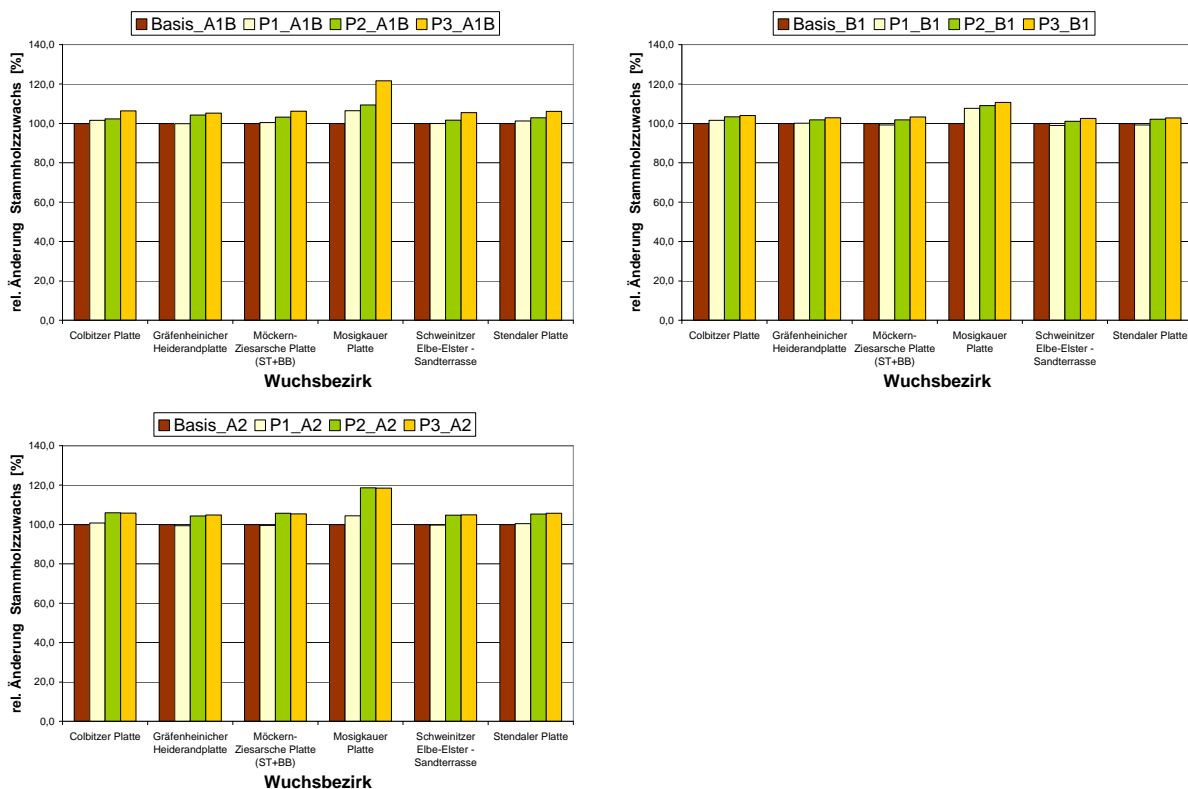
**Abb. 3.4.9: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände im Wuchsgebiet mittleres nordostdeutsches Altmoränenland nach dem Modell WETTREG (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt)**

## II. REMO

Unter dem Szenario B1 wird meist die geringste Nettoprimärproduktion simuliert, unter dem Szenario A2 sind die simulierten Bestände in dem Zeitraum 2041-2070 oft am produktivsten (Effekt höherer Niederschläge), aber weniger produktiv in den Zeiträumen 2011-2040 und 2071-2100. Das Szenario A1B ist am produktivsten in den Zeiträumen 2011-2040 und 2071-2100 (Abb. 3.4.10). Der relative Stammholzzuwachs ist auch unter den Projektionen des Szenarios B1 am geringsten, unter dem Szenario A2 ist er im Zeitraum 2041-2070 am höchsten (Abb. 3.4.11).



**Abb. 3.4.10: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände im Wuchsgebiet mittleres nordostdeutsches Altmoränenland nach dem Modell REMO (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt)**



**Abb. 3.4.11: Änderung des relativen Stammholz Zuwachses der Kiefernbestände im Wuchsgebiet mittleres nordostdeutsches Altmoränenland nach dem Modell REMO (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt)**

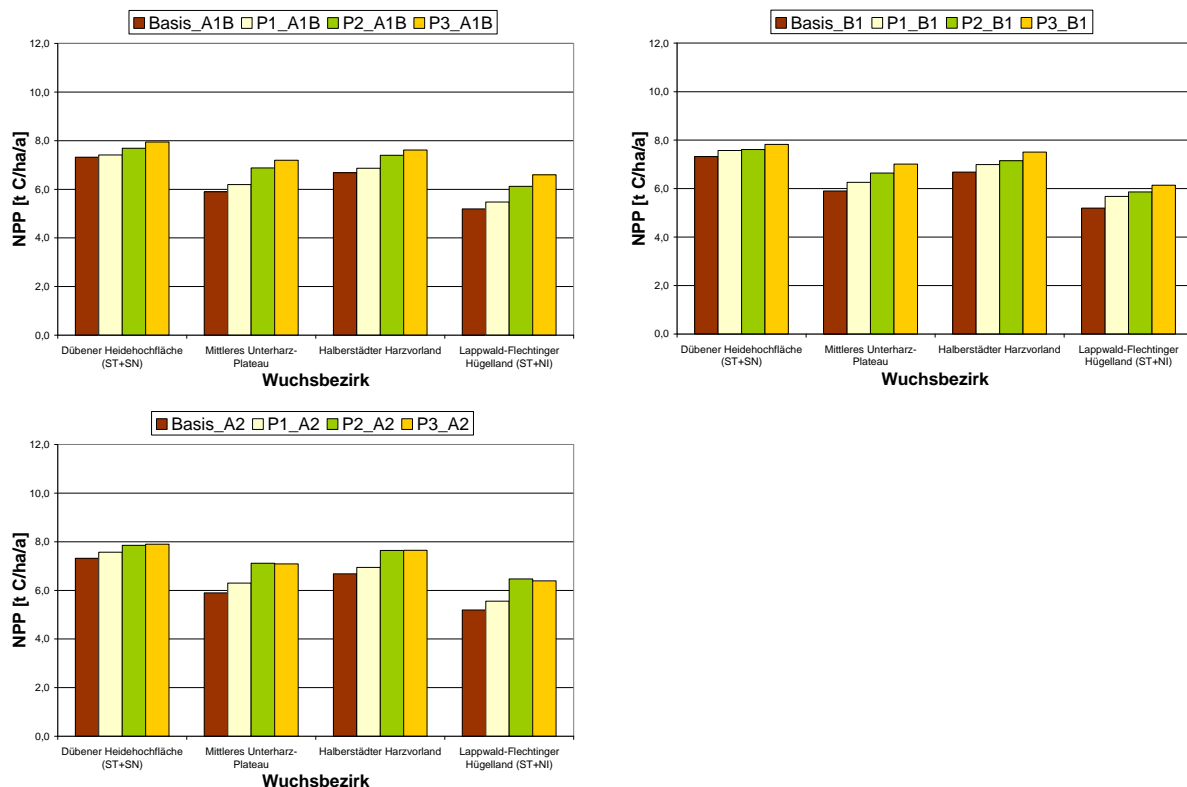
### III. Vergleich der Ergebnisse unter den Modellen WETTREG und REMO

Unter den Projektionen des Modells REMO wird eine höhere Nettoprimärproduktion ( $5,4-9,0 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) im Vergleich zu dem Modell WETTREG ( $5,8-8,8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ), mit einer Ausnahme für den Wuchsbezirk Mosigkauer Platte, simuliert. Die relativen Änderungen des Stammholzzuwachses sind allerdings nach dem Modell WETTREG aufgrund der meistens geringeren Produktivität in dem Basiszeitraum höher.

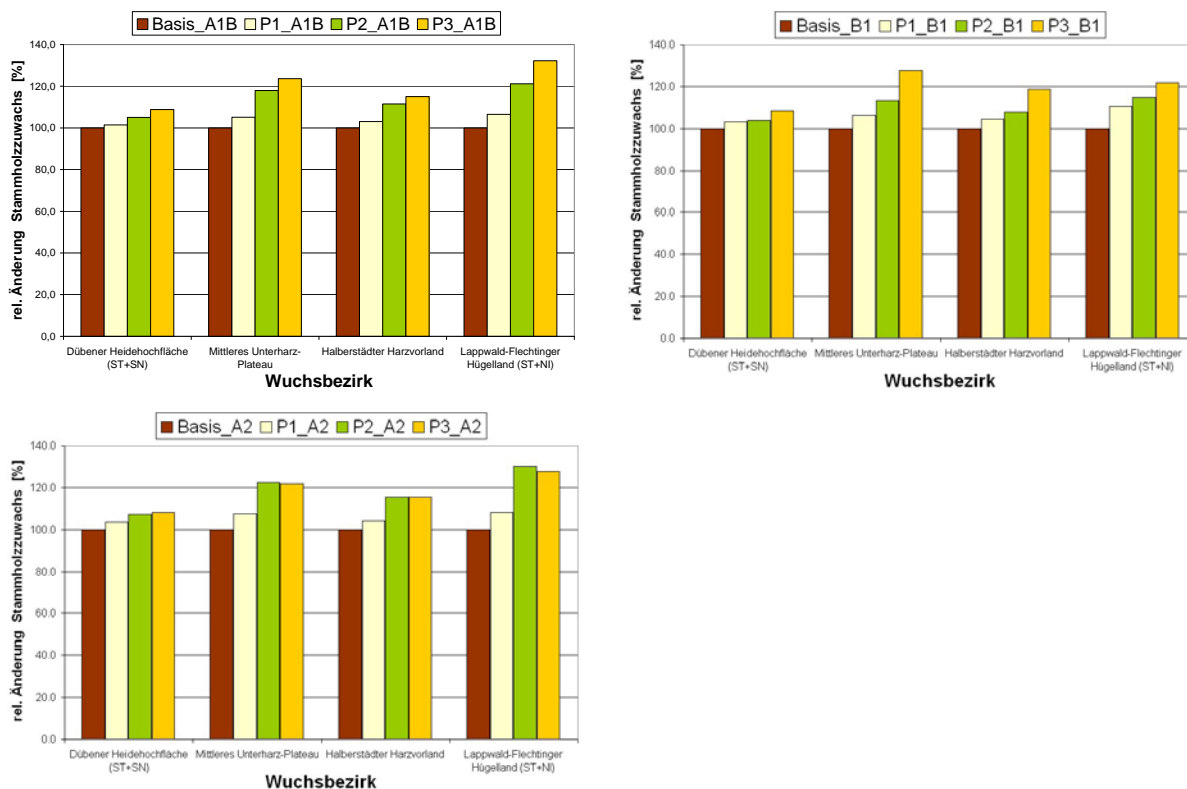
#### **C) Kiefer in den Wuchsgebieten Düben-Niederlausitzer Altmoränenland, Harz, Nordöstliche Harzvorländer und Nordwestliches Harzvorland**

##### I. WETTREG

Die Produktivität der Kiefernstandorte im Harz bzw. in der Harzregion (Wuchsgebiete Harz, Nordöstlicher Harzvorländer und Nordwestliches Harzvorland) ist geringer als im Wuchsgebiet Düben-Niederlausitzer Altmoränenland, zeigt aber unter den Szenarien A1B und B1 steigende Werte für alle Zeitperioden. Nur unter dem Szenario A2 kommt es in der Periode 2071-2100 zu einer Stagnation der Produktivität (Abb. 3.4.12). Für den Stammholzzuwachs sieht man besonders große positive Änderungsraten für die Harzstandorte (Abb. 3.4.13).



**Abb. 3.4.12: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Düben-Niederlausitzer Altmoränenland und der Harzregion nach dem Modell WETTREG (SN Sachsen, ST Sachsen-Anhalt)**

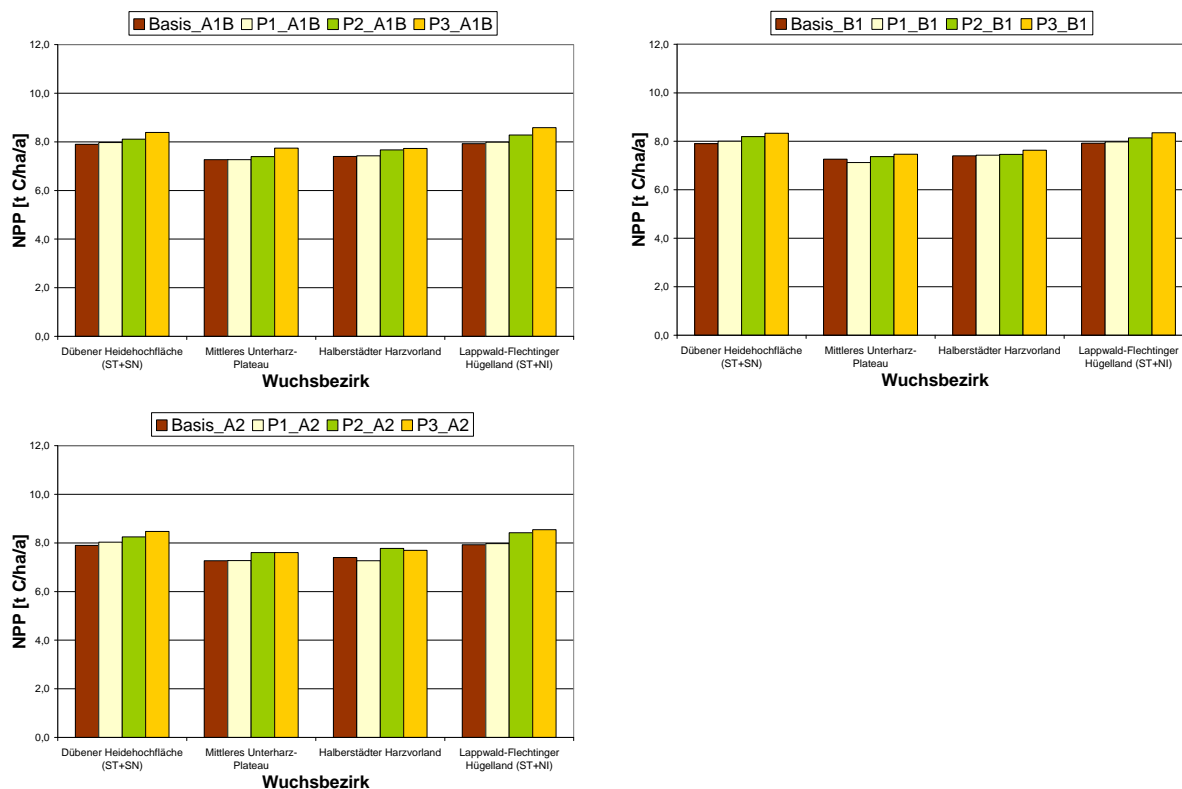


**Abb. 3.4.13: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Dübener-Niederlausitzer Altmoränenland und der Harzregion nach dem Modell WETTREG (SN Sachsen, ST Sachsen-Anhalt)**

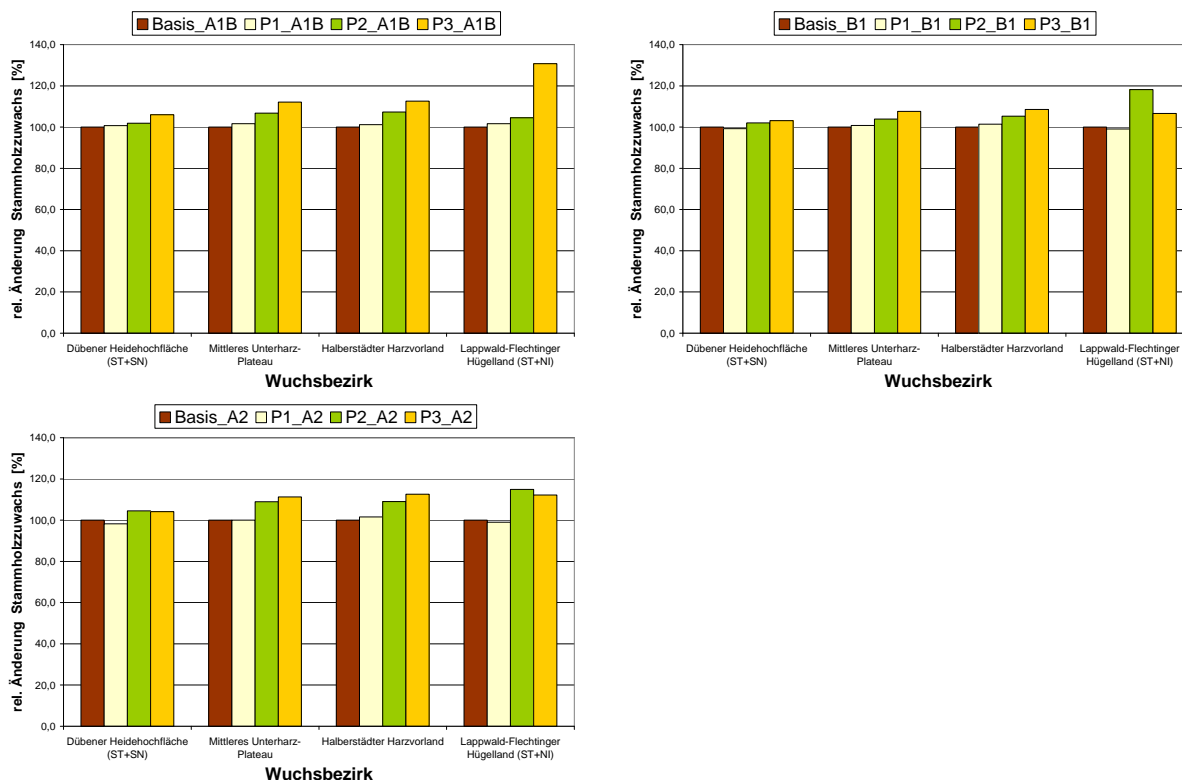
## II. REMO

Unter den Projektionen des Modells REMO sind die Kiefernbestände der Harzstandorte etwas produktiver und die Steigerung der Nettoprimärproduktion über die Zeiträume fällt für alle Klimaszenarien geringer aus. Für den Zeitraum 2071-2100 unter dem Szenario A2 zeigt sich ein leichter Rückgang bzw. eine Stagnation gegenüber dem Zeitraum 2041-2070 (Abb. 3.4.14). Unter dem Szenario B1 sind die relativen Änderungen des Stammholzzuwachses am geringsten verglichen mit den Szenarien A1B und A2, für das Szenario A2 in dem Zeitraum 2071-2100 wird teilweise eine Stagnation bzw. ein Rückgang des Stammholzzuwachses simuliert (Abb. 3.4.15).





**Abb. 3.4.14: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Düben-Niederlausitzer Altmoränenland und der Harzregion nach dem Modell REMO (SN Sachsen, ST Sachsen-Anhalt)**



**Abb. 3.4.15: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Düben-Niederlausitzer Altmoränenland und der Harzregion nach dem Modell REMO (NI Niedersachsen, SN Sachsen, ST Sachsen-Anhalt)**

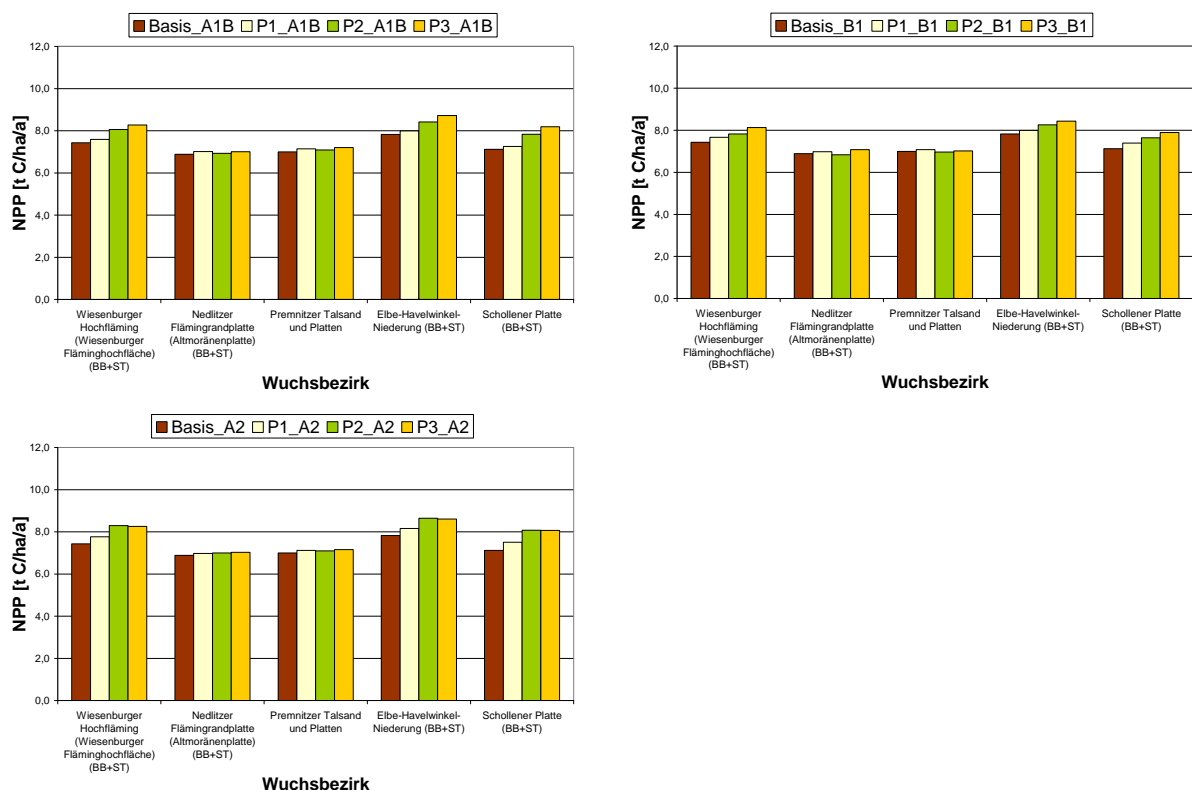
### III. Vergleich der Ergebnisse unter den Modellen WETTREG und REMO

An den einzelnen Beständen in den betrachteten Wuchsgebieten wird unter dem Modell WETTREG eine Nettoprimärproduktion im Bereich von jährlich 3,8 - 7,7 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar und unter dem Modell REMO im Bereich von jährlich 3,9 - 8,1 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar simuliert. Die Bestände im Harzgebiet profitieren von den Klimaänderungen der Szenarien, ausgenommen in dem letzten Zeitraum 2071 -2100 unter dem Szenario A2.

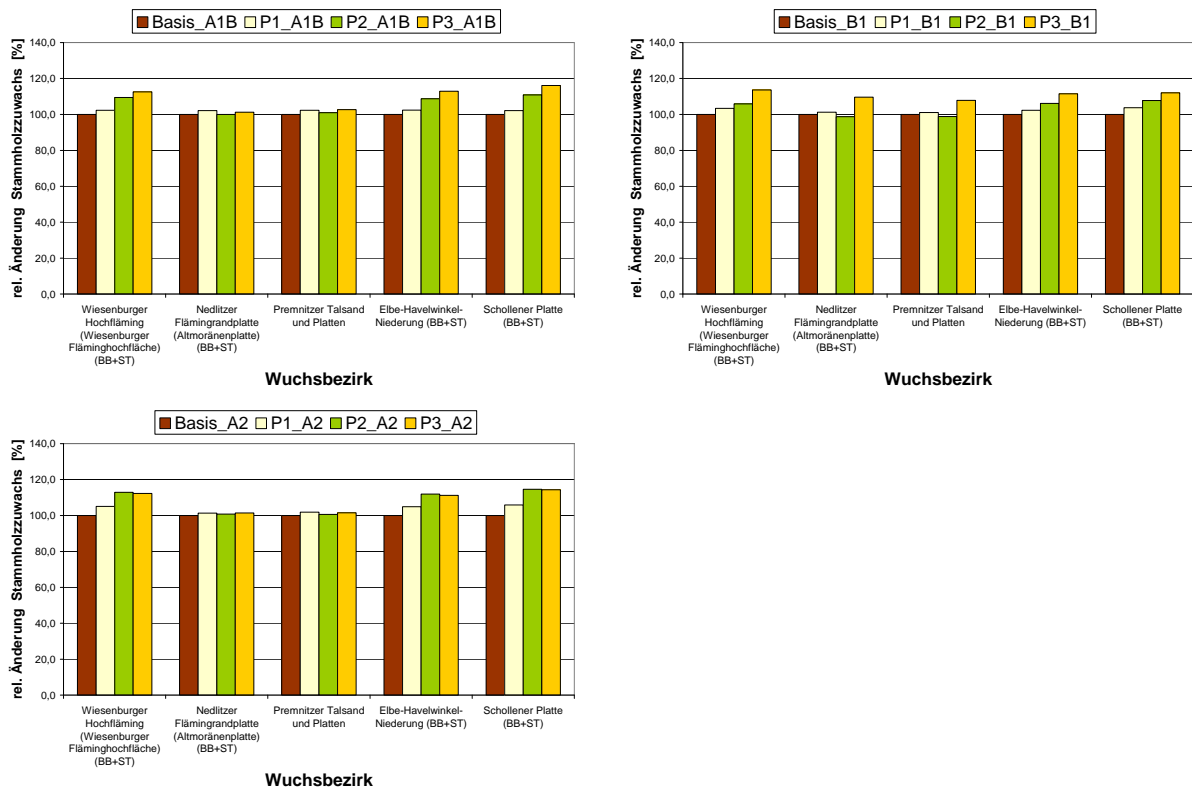
#### **D) Kiefer in den Wuchsgebieten Hoher Fläming und Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland**

##### **I. WETTREG**

Für den Wuchsbezirk Nedlitzer Flämingrandplatte (Altmoränenplatte) wird eine beinahe konstante Reaktion über fast alle Zeiträume und für alle Szenarien simuliert. Auch für den Wuchsbezirk Premnitzer Talsand und Platten wird nur eine minimale Reaktion auf verschiedene Szenarien und Zeiträume berechnet. Die anderen Wuchsbezirke zeigen eine Zunahme von dem Basiszeitraum bis zum Zeitraum 2071-2100 (Abb. 3.4.16). Die Änderungen des Stammholzzuwachses zeigen das gleiche Verhalten (Abb. 3.4.17).



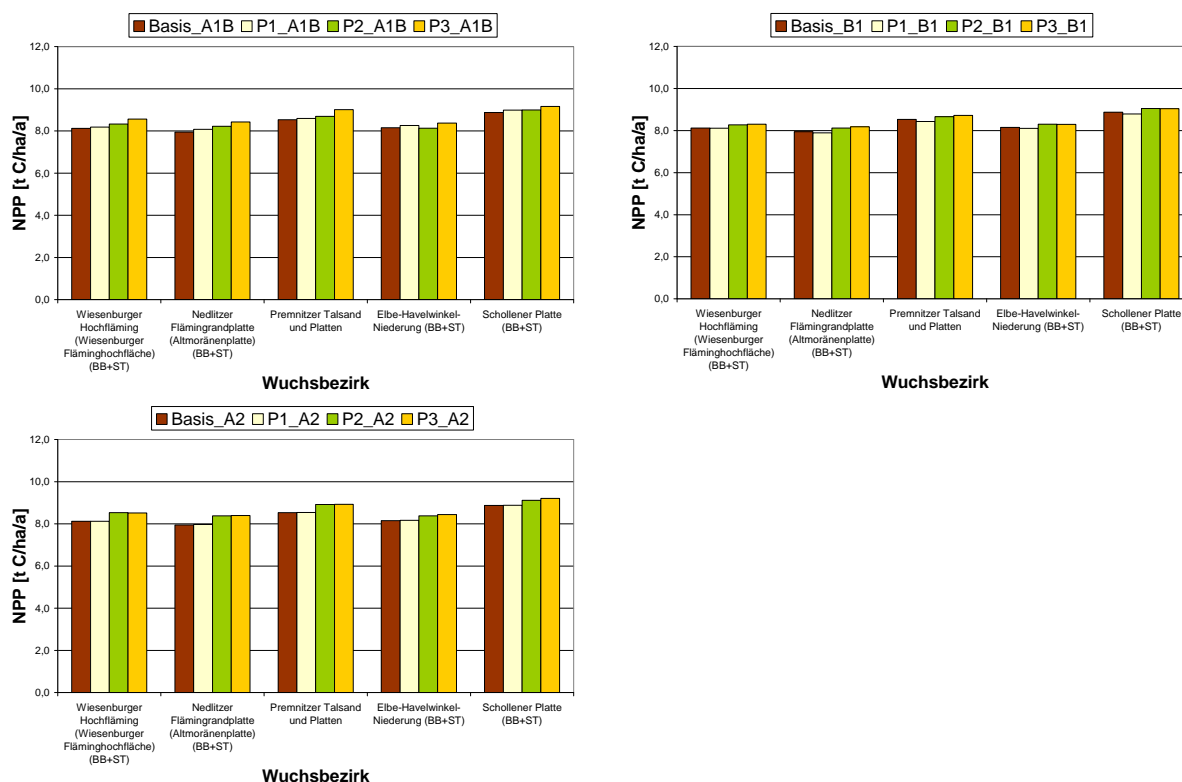
**Abb. 3.4.16: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Hoher Fläming und Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland nach dem Modell WETTREG (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt)**



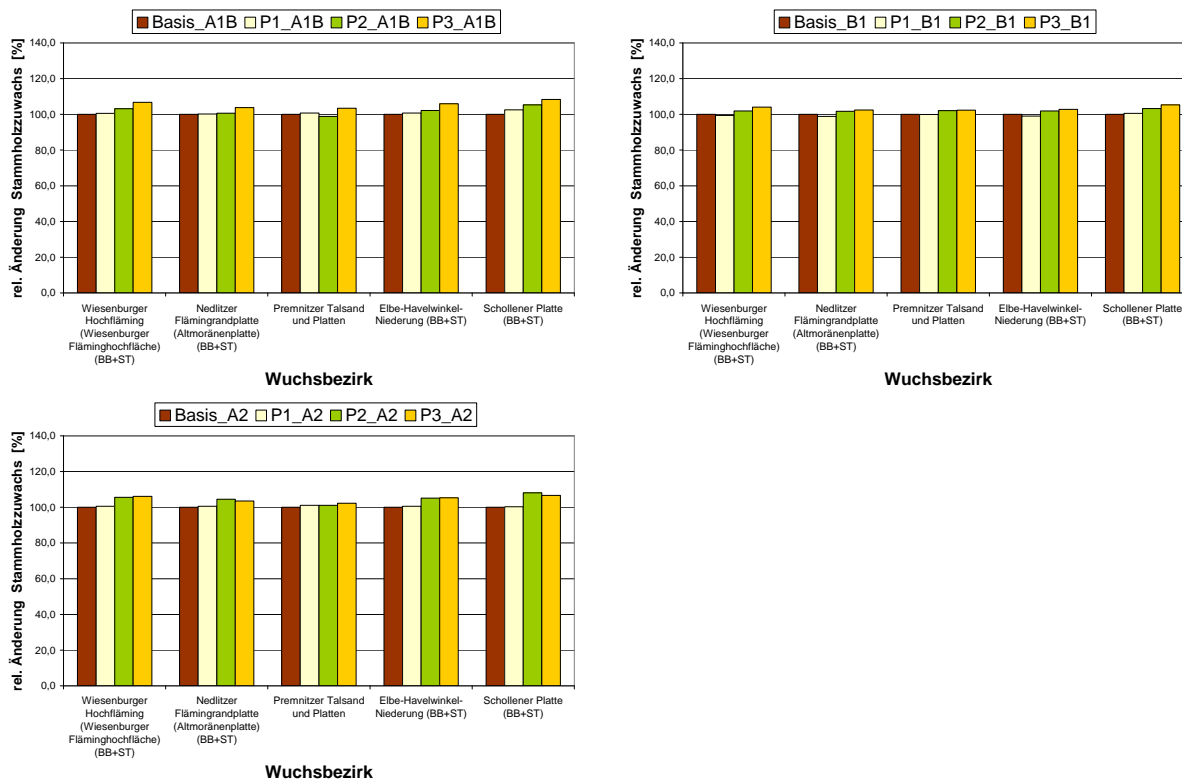
**Abb. 3.4.17: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Hoher Fläming und Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland nach dem Modell WETTREG (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt)**

## II. REMO

Unter allen Szenarien wird eine geringe Steigerung der Nettoprimärproduktion für den Wuchsbezirk Nedlitzer Flämingrandplatte simuliert. Auch für die anderen Wuchsbezirke sind die Steigerungen gering und können ein Hinweis darauf sein, dass hier eventuell standörtliche Limitierungen eher eine Rolle spielen (Abb. 3.4.18). Die simulierten Werte für den Stammholzzuwachs zeigen ebenfalls nur geringfügige Änderungen in allen Szenarien und Zeiträumen (Abb. 3.4.19).



**Abb. 3.4.18: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Hoher Fläming und Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland nach dem Modell REMO (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt)**



**Abb. 3.4.19: Änderung des Stammholzzuwachses der Kiefernbestände in den Wuchsgebieten Hoher Fläming und Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland nach dem Modell REMO (BB Brandenburg, ST Sachsen-Anhalt)**

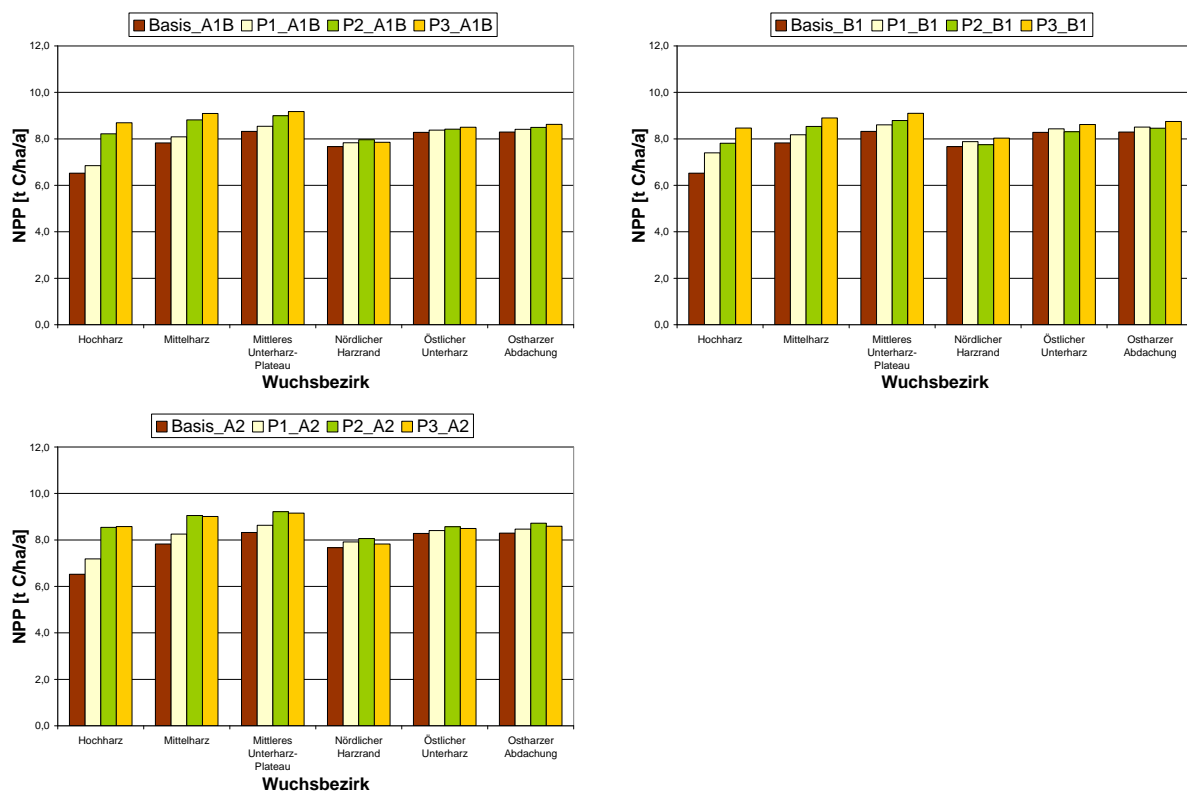
### III. Vergleich der Ergebnisse unter den Modellen WETTREG und REMO

Unter den Projektionen beider Klimamodelle zeigen einige Wuchsbezirke keine deutliche Reaktion. Die jährliche Nettoprimärproduktion liegt für die simulierten Bestände unter dem Modell WETTREG zwischen 4,4 und 9,0 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar und unter dem Modell REMO zwischen 4,4 und 9,2 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar.

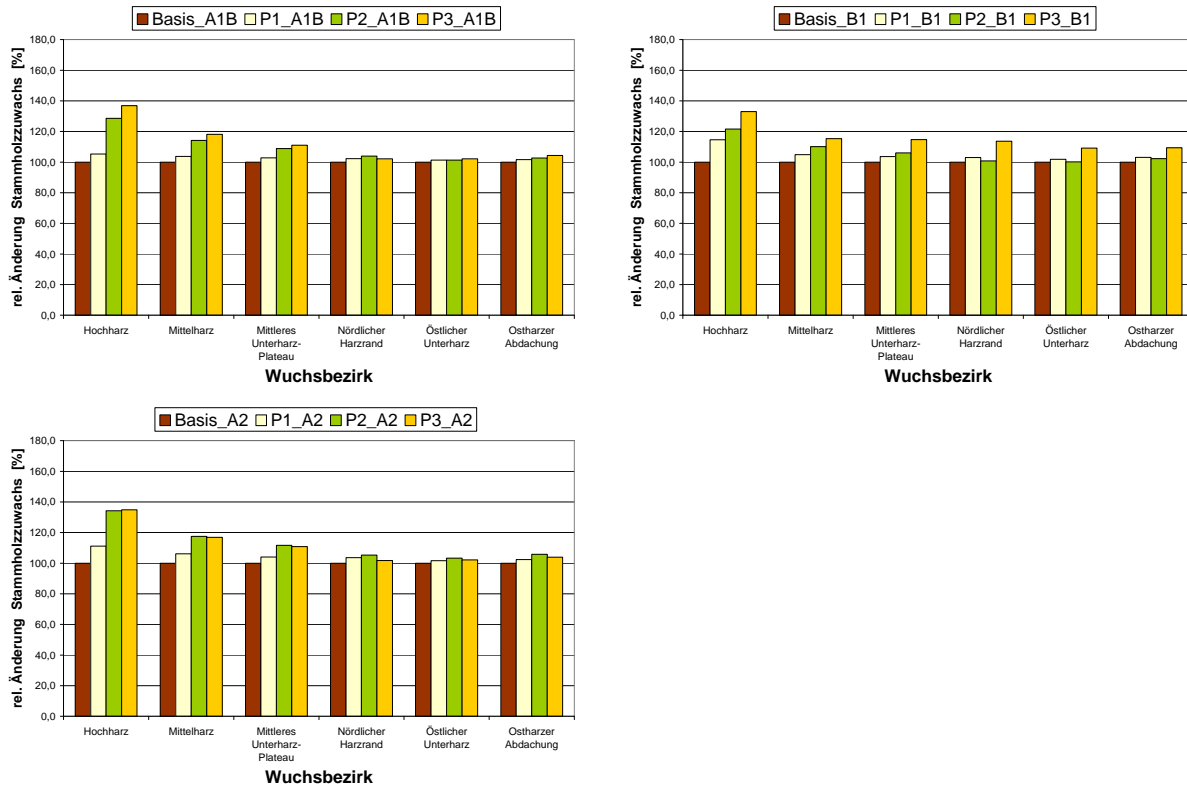
#### **E) Fichte im Wuchsgebiet Harz**

##### **I. WETTREG**

Für die simulierten Fichtenbestände in den Wuchsbezirken dieses Wuchsgebietes ist ein deutlicher Unterschied in der Entwicklung der Nettoprimärproduktion zwischen den hohen Lagen (z.B. Hochharz, Mittelharz) und den tieferen Lagen zu sehen (Abb. 3.4.20). Letztere profitieren kaum von den klimatischen Änderungen und es kommt sogar zu Einbußen in den Zeiträumen 2041-2070 und 2071-2100. Analog verhält es sich für die Veränderung des Stammholzzuwachses im Vergleich zum Basiszeitraum (Abb. 3.4.21).



**Abb. 3.4.20: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Fichtenbestände im Wuchsgebiet Harz nach dem Modell WETTREG**

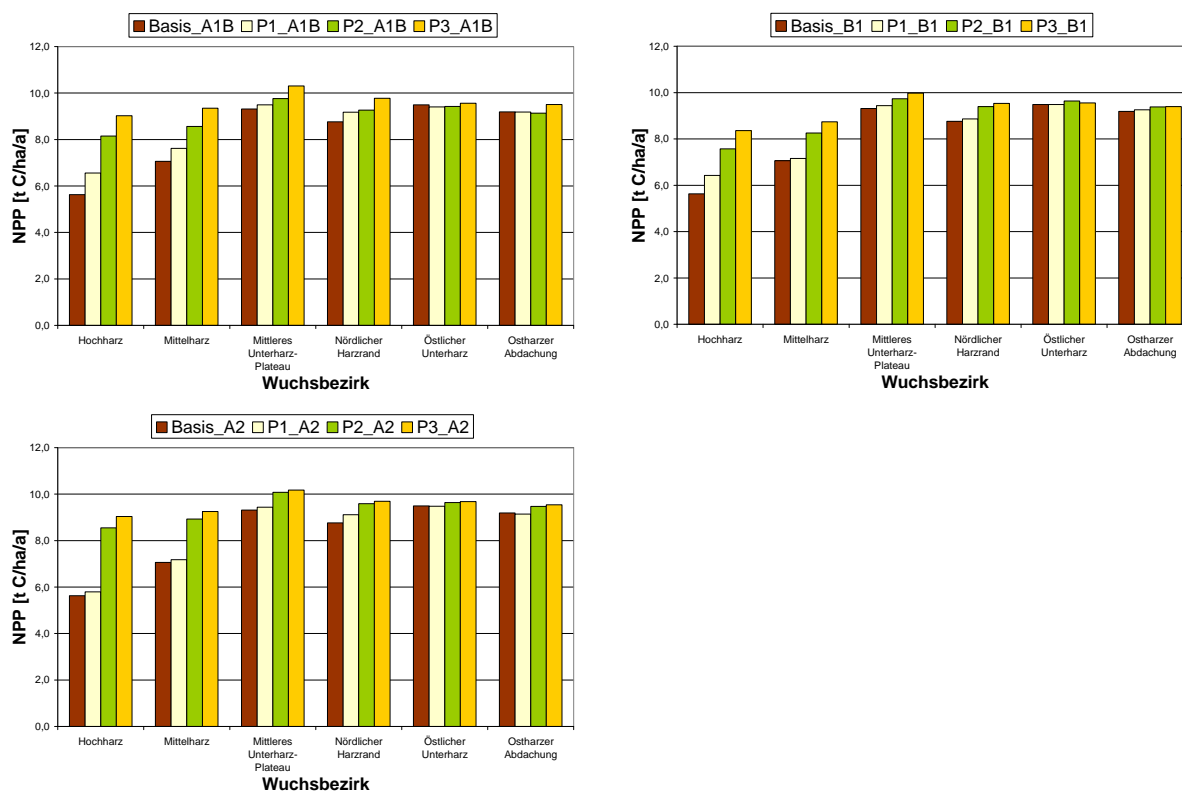


**Abb. 3.4.21: Änderung des relativen Stammholzzuwachse der Fichtenbestände im Wuchsgebiet Harz nach dem Modell WETTREG**

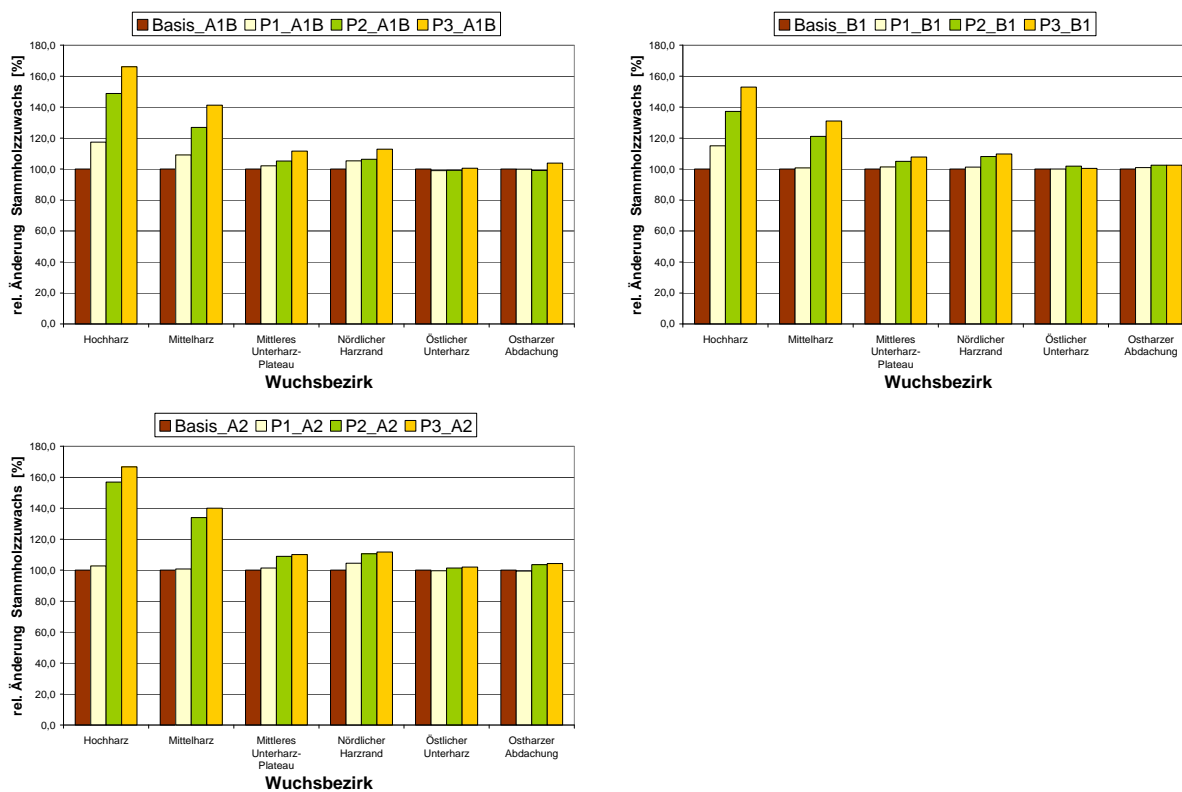
## II. REMO

Die Unterschiede in der Entwicklung der Nettoprimärproduktion zwischen den Standorten im Wuchsbezirk Hochharz und Mittelharz einerseits und in den Wuchsbezirken der tieferen Lagen andererseits sind unter den Projektionen des Modells REMO besonders groß. Für alle Emissionsszenarien gibt es einen Anstieg in der Nettoprimärproduktion des Basiszeitraums bis zum Zeitraum 2071-2100 (Abb. 3.4.22), der für die höheren Lagen besonders groß ausfällt. Der relative Stammholzzuwachs spiegelt diesen Trend wieder (Abb. 3.4.23).





**Abb. 3.4.22: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Fichtenbestände im Wuchsgebiet Harz nach dem Modell REMO**



**Abb. 3.4.23: Änderung des relativen Stammholzzuwachse der Fichtenbestände im Wuchsgebiet Harz nach dem Modell REMO**

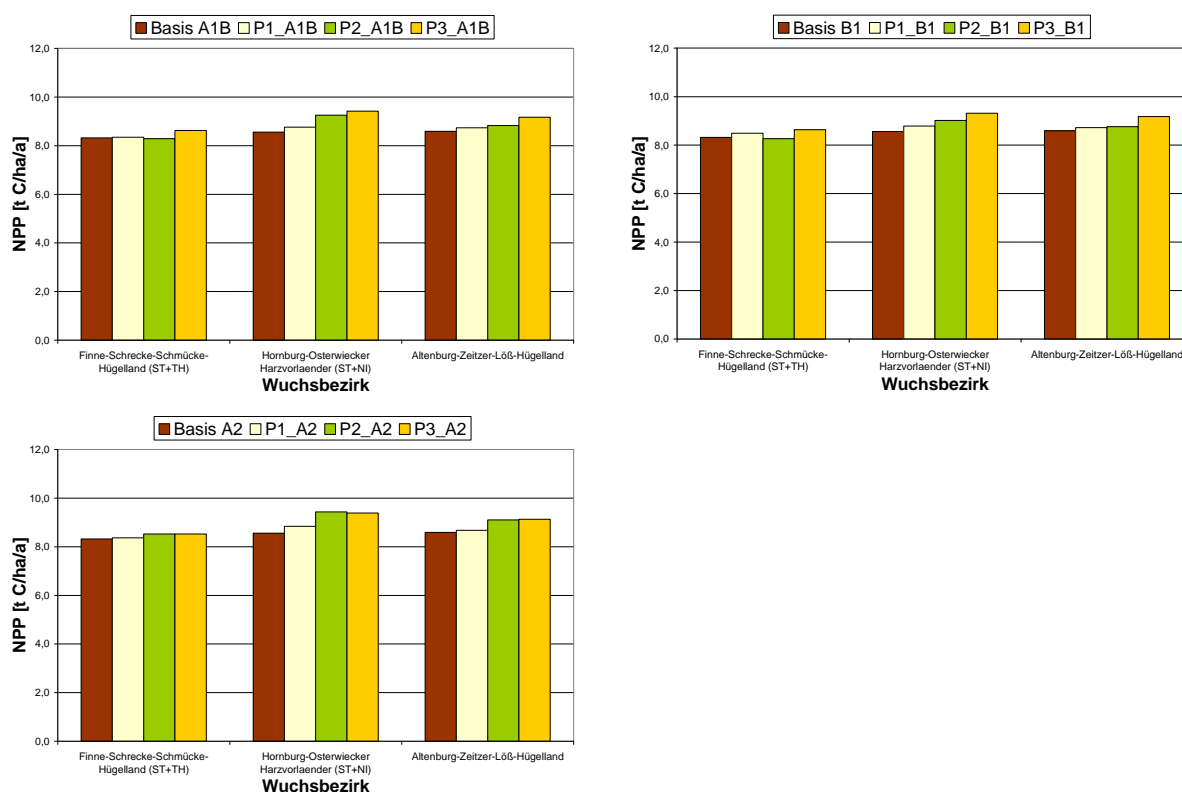
### III. Vergleich der Ergebnisse unter den Modellen WETTREG und REMO

Gemäß der REMO-Szenarien sind die Auswirkungen für die Fichtenbestände in den hohen und mittleren Lagen des Harzes deutlich stärker, vor allen in den Zuwachsgewinnen des Stammholzes. Diese Bestände haben unter dem heutigen Klima nach dem Modell REMO eine geringere Produktivität als unter dem Modell WETTREG, können sich aber stärker unter REMO- als unter den WETTREG-Szenarien steigern.

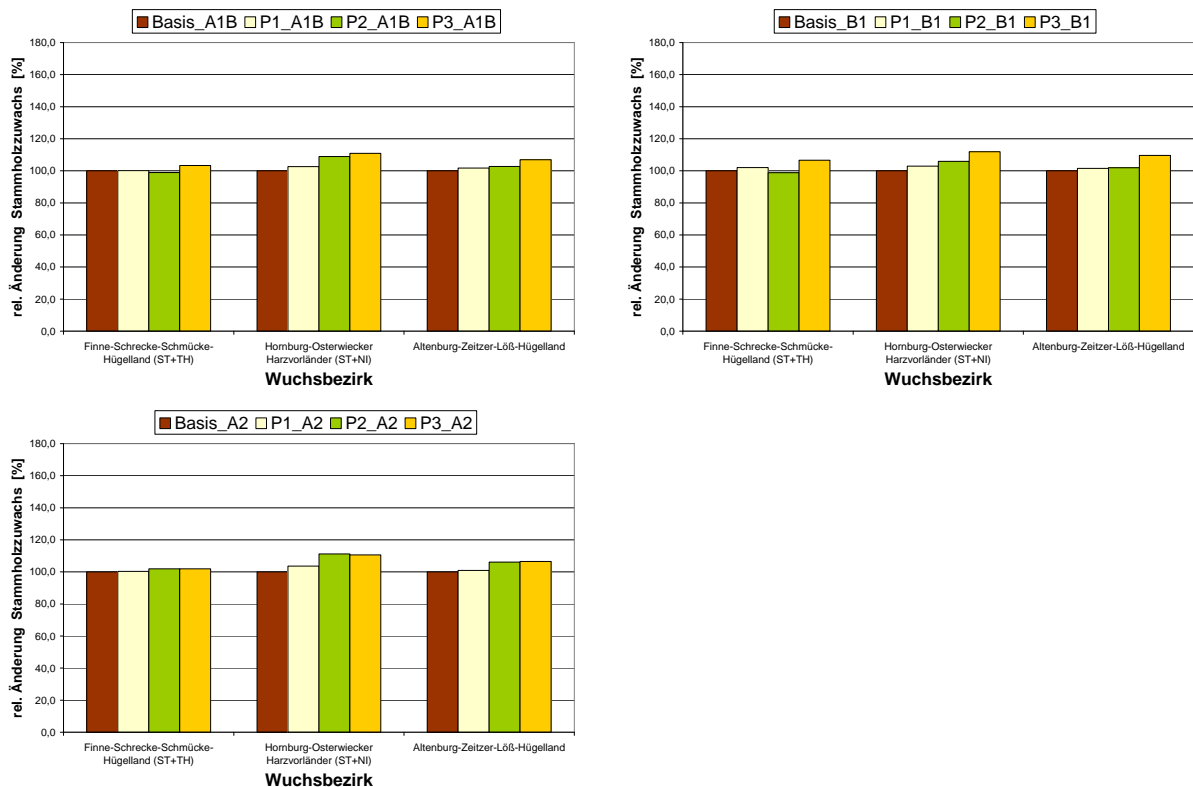
#### **F) Fichte in den Wuchsgebieten Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland und Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland**

##### I. WETTREG

Die betrachteten Fichtenbestände zeigen nur im Wuchsgebiet Nordwestliches Harzvorland eine etwas stärkere Reaktion auf die Klimaänderungen unter den Szenarien A1B, A2 und B1 für die drei Zukunftsperioden bis 2100, für die harzferneren Standorte ist kaum eine positive oder negative Reaktion berechnet worden (Abb. 3.4.24). Nach dem Szenario A2 zeigt sich in dem Zeitraum 2071-2100 der geringste Effekt in der Steigerung der Netto-primärproduktion sowie in der des relativen Stammholzzuwachses im Vergleich zu den Szenarien A1B und B2 (Abb. 3.4.25).



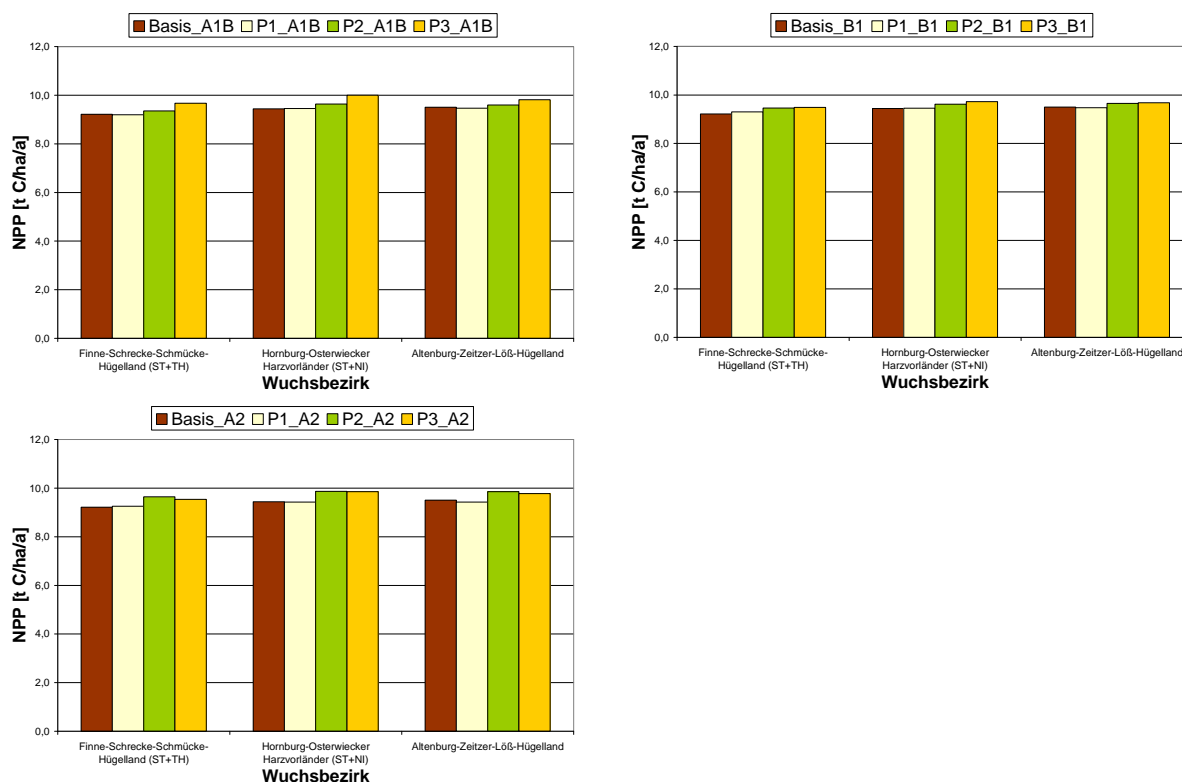
**Abb. 3.4.24: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Fichtenbestände in den Wuchsgebieten Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland und Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland nach dem Modell WETTREG (NI Niedersachsen, ST Sachsen-Anhalt, TH Thüringen)**



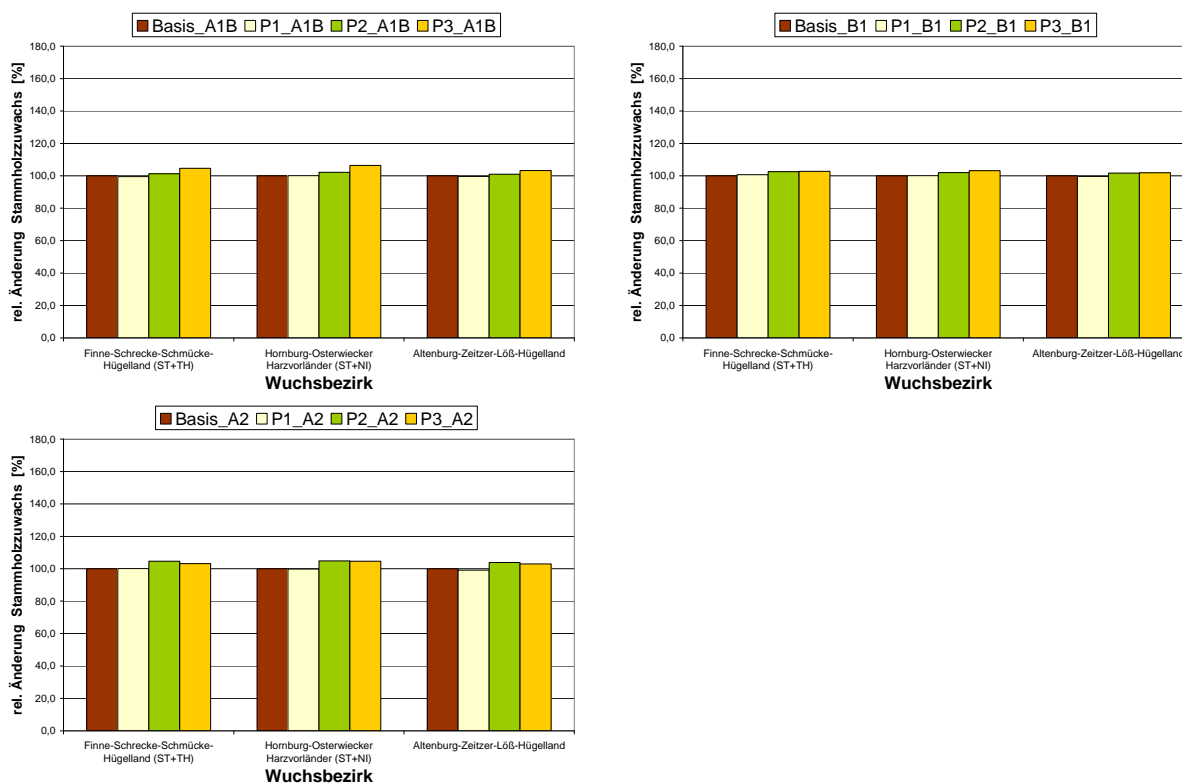
**Abb. 3.4.25 Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Fichtenbestände in den Wuchsgebieten Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland und Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland nach dem Modell WETTREG (NI Niedersachsen, ST Sachsen-Anhalt, TH Thüringen)**

## II. REMO

Für die simulierten Fichtenbestände in den Wuchsbezirken ist die Reaktion auf die Klimaänderungen relativ schwach, sowohl für die Nettoprimärproduktion als auch noch stärker für den relativen Stammholzzuwachs. Hier sind nur geringe Zugewinne vom Basiszeitraum 1961-1990 bis zum Zeitraum 2071-2100 zu erkennen (Abb. 3.4.26 und Abb. 3.4.27).



**Abb. 3.4.26: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die Fichtenbestände in den Wuchsgebieten Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland und Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland nach dem Modell REMO (NI Niedersachsen, ST Sachsen-Anhalt)**



**Abb. 3.4.27: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Fichtenbestände in den Wuchsgebieten Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland und Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland, Modell REMO; Simulation unter den Szenarien A1B, A2, B1, Mittelwerte für alle Bestände eines Wuchsbezirkes (NI Niedersachsen, ST Sachsen-Anhalt)**

### III. Vergleich der Ergebnisse unter den Modellen WETTREG und REMO

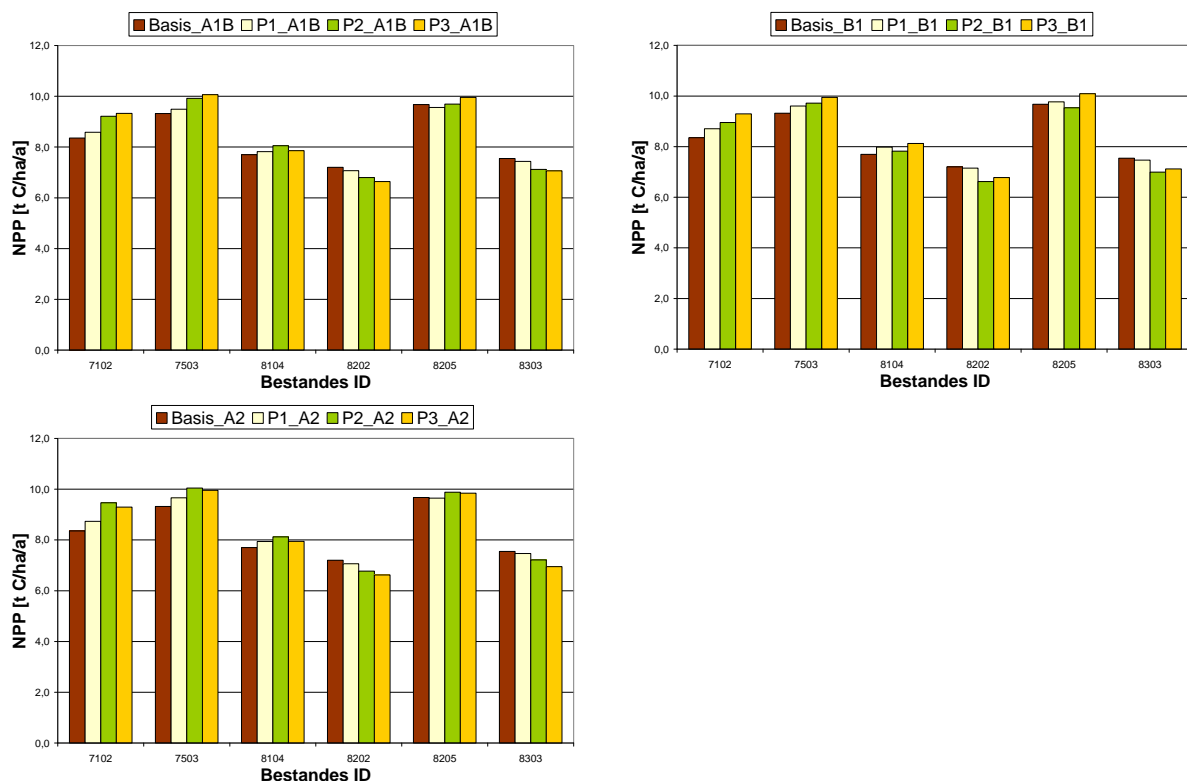
Die simulierten Werte der Nettoprimärproduktion der Fichtenbestände sind unter den Szenarien des Modells REMO höher als unter denen des Modells WETTREG. Die Reaktion auf klimatische Änderungen ist jedoch unter den Projektionen des Modells REMO schwächer und zeigt insbesondere für den relativen Stammholzzuwachs eine geringere Ausprägung als unter den Klimaszenarien des Modells WETTREG.

#### G) Buche

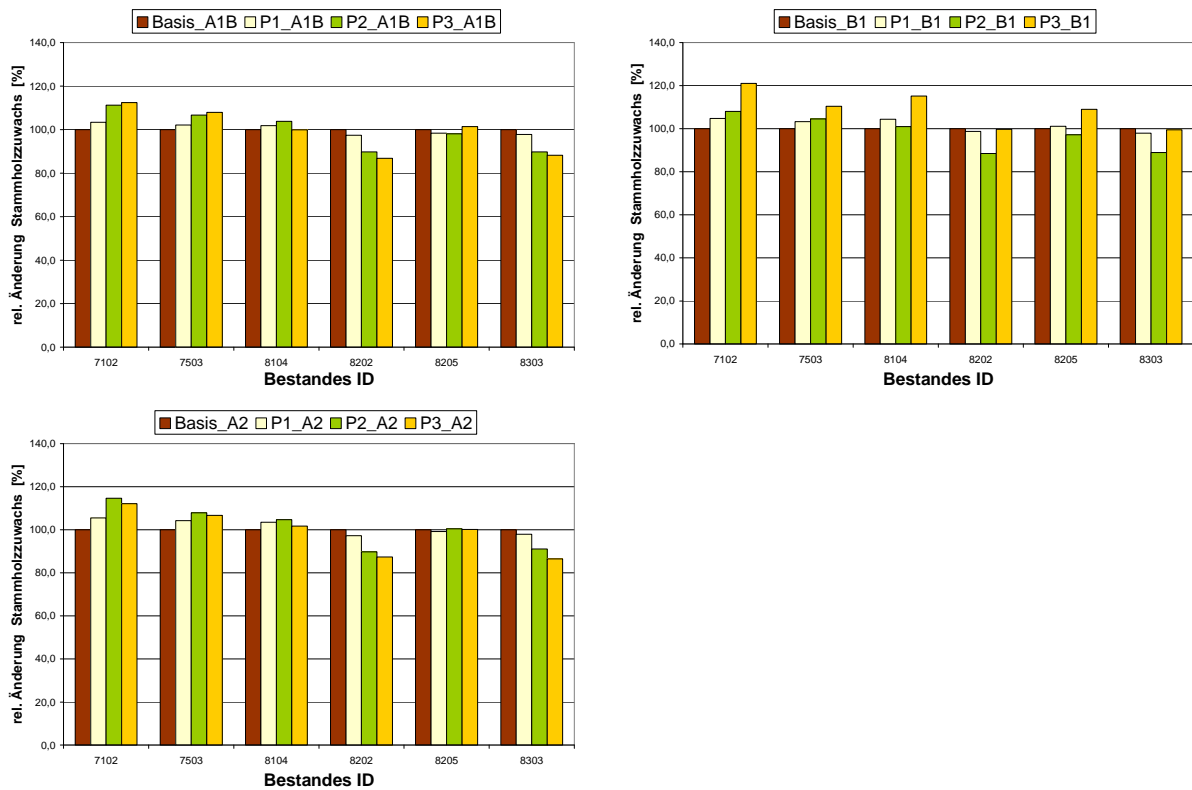
Die Untersuchung der sechs Buchenbestände (Rein- bzw. Mischbestände mit Hauptanteil Buche) erfolgte aufgrund ihrer geringen Anzahl anhand der einzelnen Bestände und nicht nach Wuchsgebieten und -bezirken.

##### I. WETTREG

Für die betrachteten Buchenbestände zeigt sich in Abhängigkeit von der räumlichen Lage ein differenziertes Bild. Zwei Bestände reagieren auf die Klimaänderungen mit einem klaren Rückgang der Nettoprimärproduktion, zwei weitere Bestände zeigen eine schwache Reaktion und nur die Bestände in den Wuchsgebieten Harz und Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland zeigen eine deutlich positive Reaktion vom Basiszeitraum 1961-1990 zum Zeitraum 2071-2100 (Abb. 3.4.28). Die gleichen Reaktionsmuster sind für den relativen Stammholzzuwachs festzustellen (Abb. 3.4.29), die stärksten Zuwachsgewinne werden für den Buchenbestand im Harz berechnet, die stärksten Verluste vom Basiszeitraum zum Zeitraum 2071-2100 für die Bestände Schiefergraben (8202) und Rodishayn (8383).



**Abb. 3.4.28: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die einzelnen Buchenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell WETTREG**

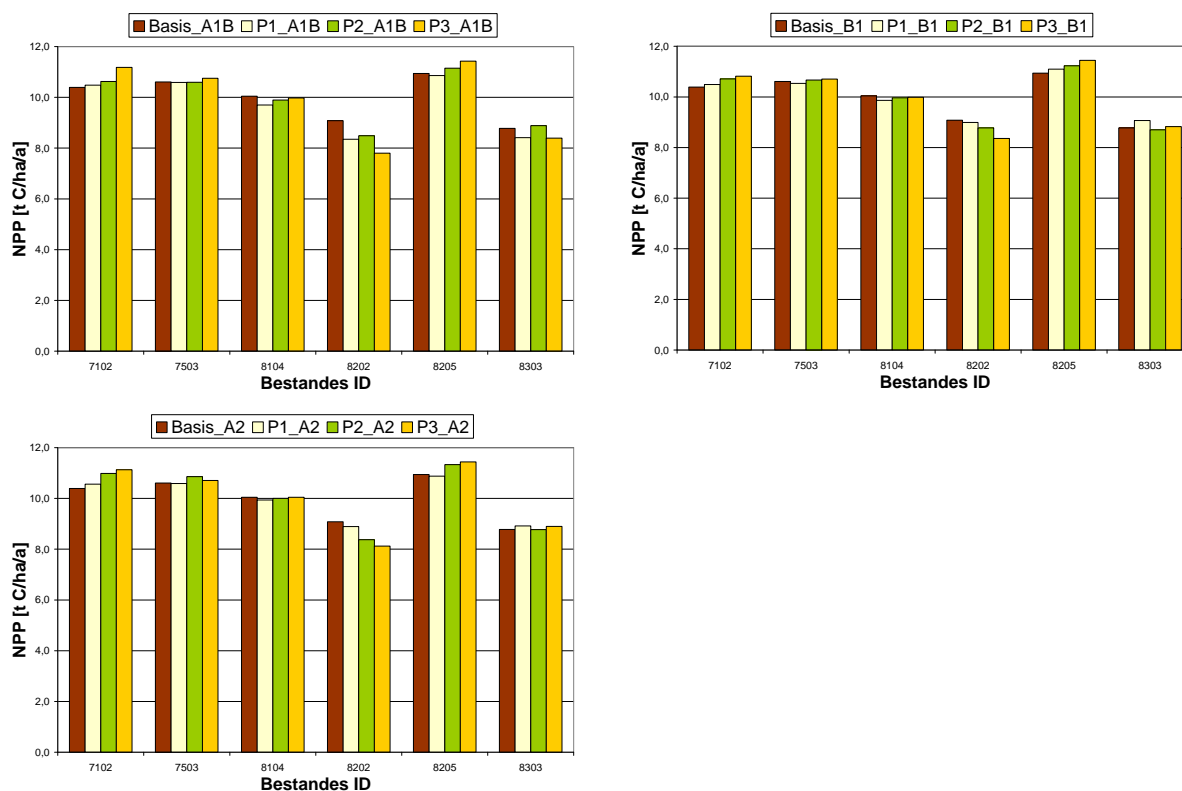


**Abb. 3.4.29: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der einzelnen Buchenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell WETTREG**

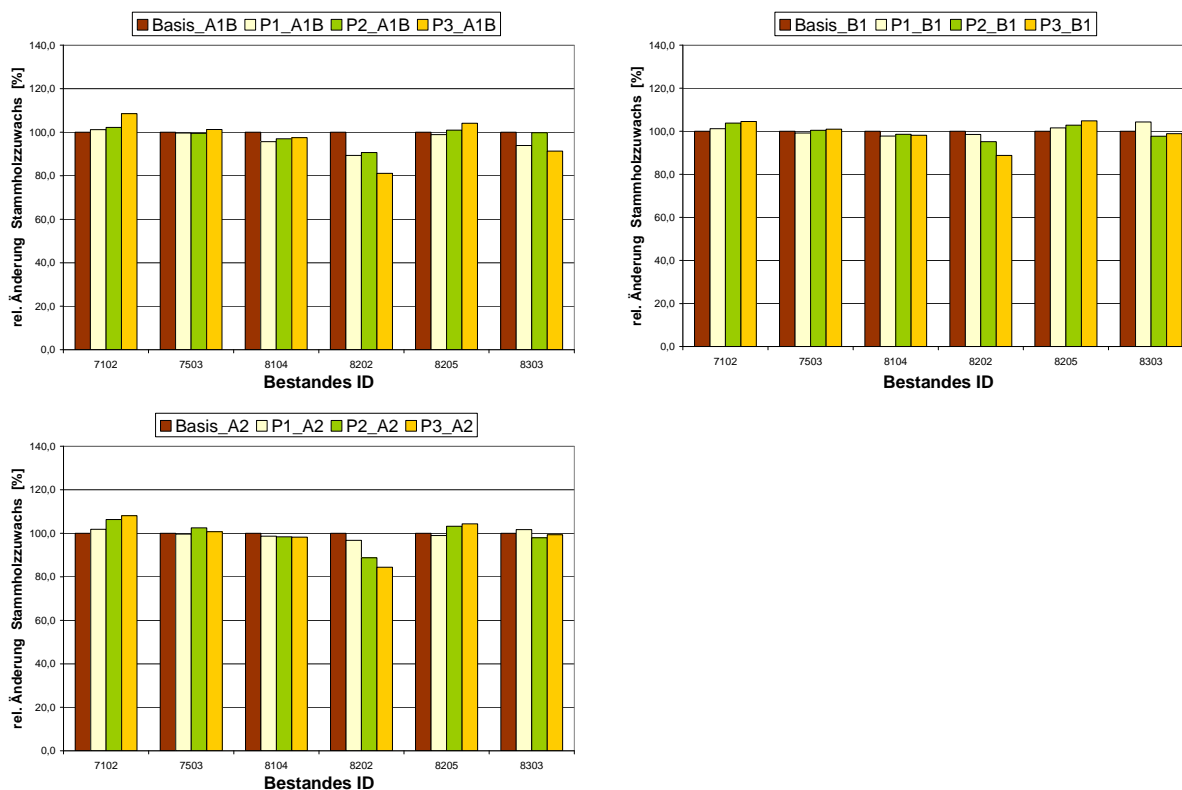
## II. REMO

Unter den Szenarien des Modells REMO reagiert ein Bestand (8202) klar mit Rückgängen in der Nettoprimärproduktion und im relativen Stammholzzuwachs (Abb. 3.4.30 und Abb. 3.4.31). Die anderen Bestände zeigen kaum Änderungen bzw. leichte Gewinne oder Rückgänge in der Nettoprimärproduktion sowie für den relativen Stammholzzuwachs.





**Abb. 3.4.30: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die einzelnen Buchenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell REMO**



**Abb. 3.4.31: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der einzelnen Buchenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell REMO**

### III. Vergleich der Ergebnisse unter den Modellen WETTREG und REMO

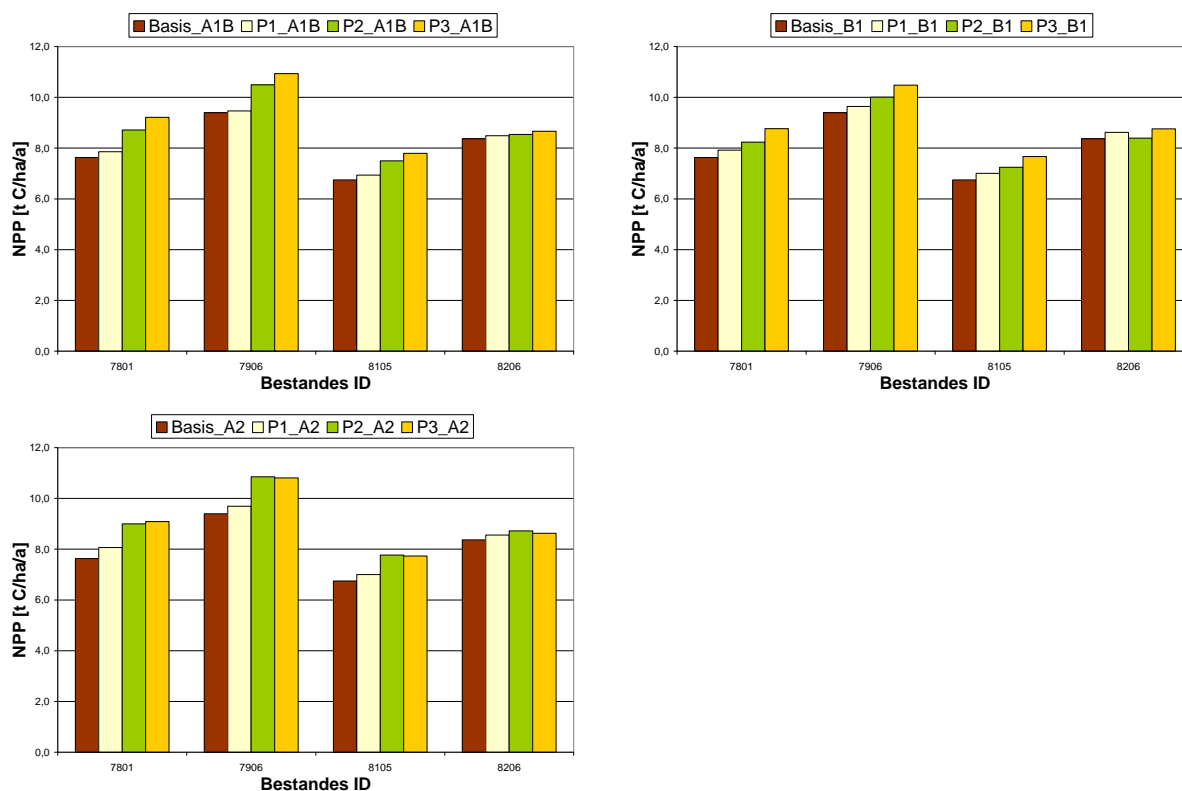
Die Nettoprimärproduktion ist unter den Szenarien des Modells REMO deutlich höher als unter denen des Modells WETTREG. Die Tendenzen der positiven Reaktionen auf die Klimaänderungen sind unter dem Modell WETTREG stärker als unter dem Modell REMO. Dies ist vermutlich durch die niedrigeren Nettoprimärproduktionswerte und damit verbundenen stärkeren relativen Zunahmen bedingt. Dagegen fallen die Rückgänge der Nettoprimärproduktion und des relativen Stammholzzuwachses unter den Szenarien des Klimamodell REMO stärker aus.

#### **H) Eiche**

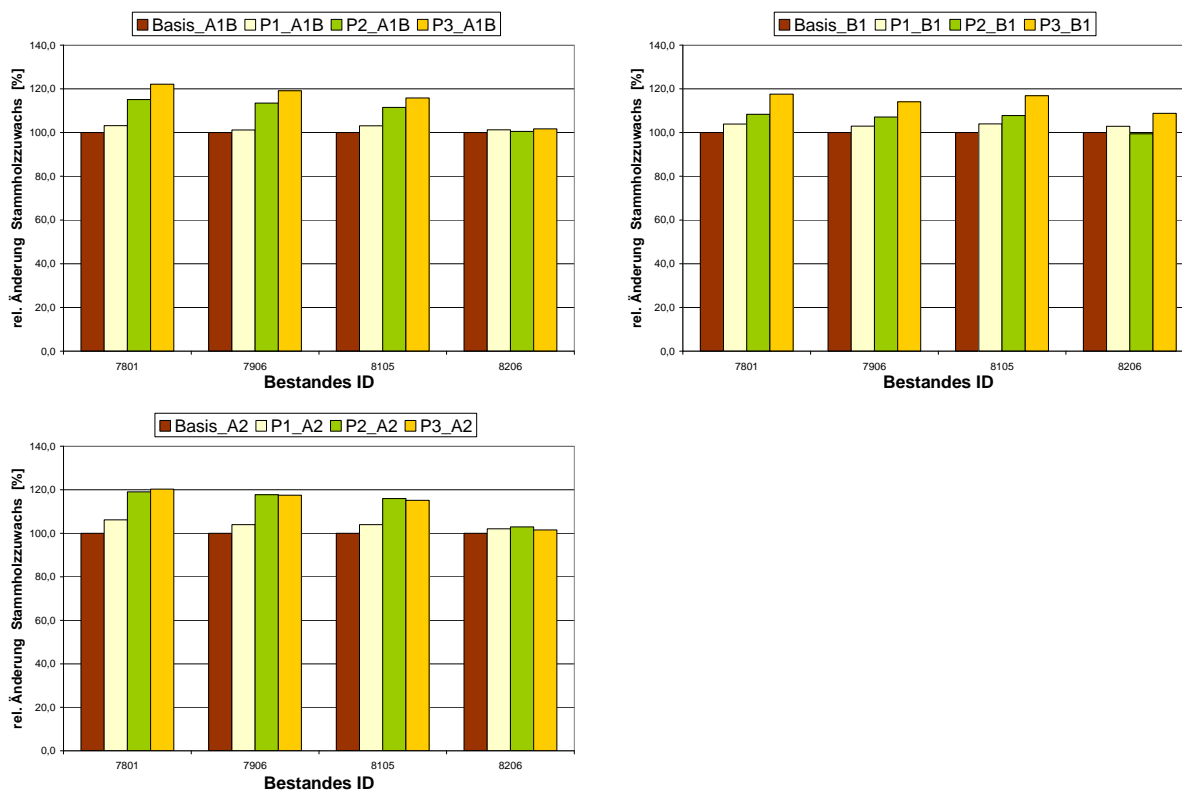
Die Untersuchung der vier Eichenbestände (Rein- bzw. Mischbestände mit Hauptanteil Eiche) erfolgte aufgrund ihrer geringen Anzahl anhand der einzelnen Bestände und nicht nach Wuchsgebieten und -bezirken.

##### **I. WETTREG**

Die Eichenbestände in den Regionen Altmark und Fläming sowie im Wuchsgebiet Nordöstliche Harzvorländer (7801, 7906 und 8105) zeigen unter allen Szenarien eine deutlich positive Reaktion vom Basiszeitraum 1961-1990 zur Zeitperiode 2071-2100 (Ausnahme: Zeitraum 2071-2100 nach dem Szenario A2) für die Nettoprimärproduktion und den relativen Stammholzzuwachs. Gemäß den Klimaszenarien zeigt der Bestand 8206 kaum eine Reaktion auf die Klimaänderungen. Offenbar führen die höheren Temperaturen hier zwar zu einer längeren Vegetationsperiode, der dadurch erzielte Gewinn könnte aber durch zunehmenden Trockenstress aufgrund der Niederschlagsrückgänge kompensiert werden (Abb. 3.4.32 und Abb. 3.4.33).



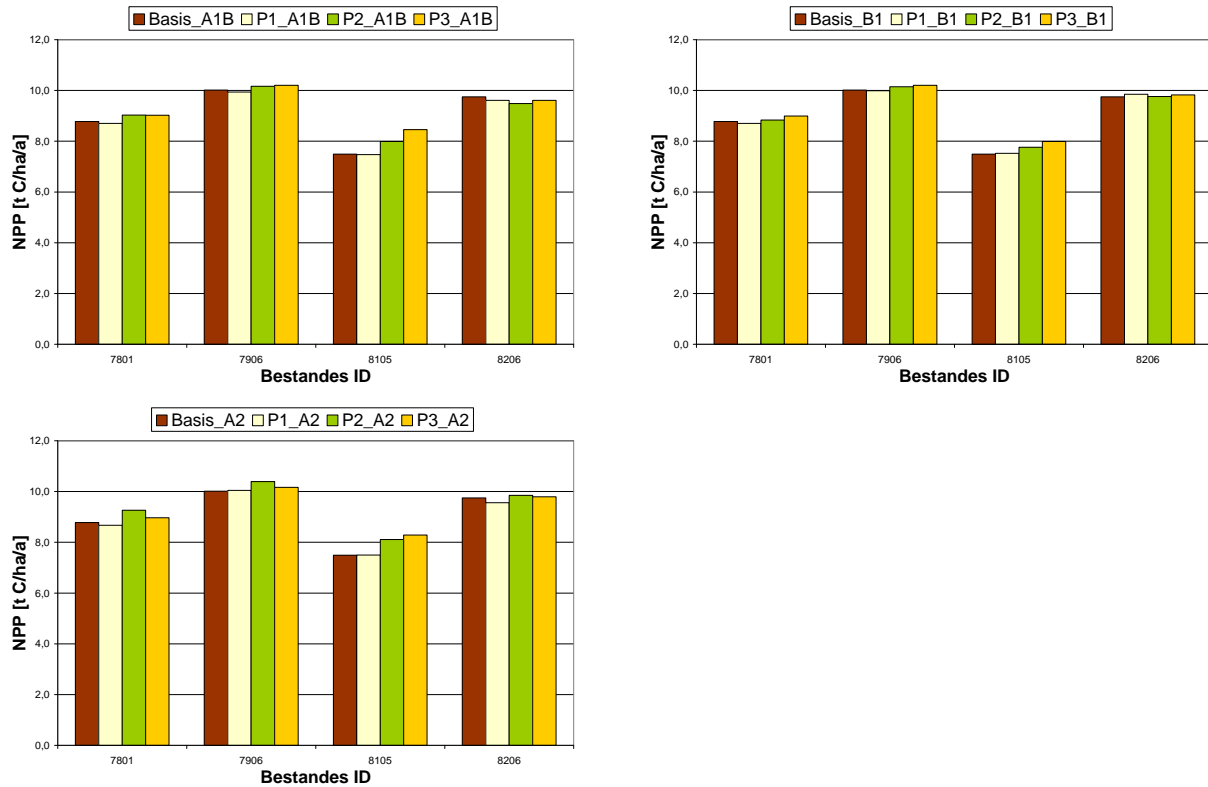
**Abb. 3.4.32: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die einzelnen Eichenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell WETTREG**



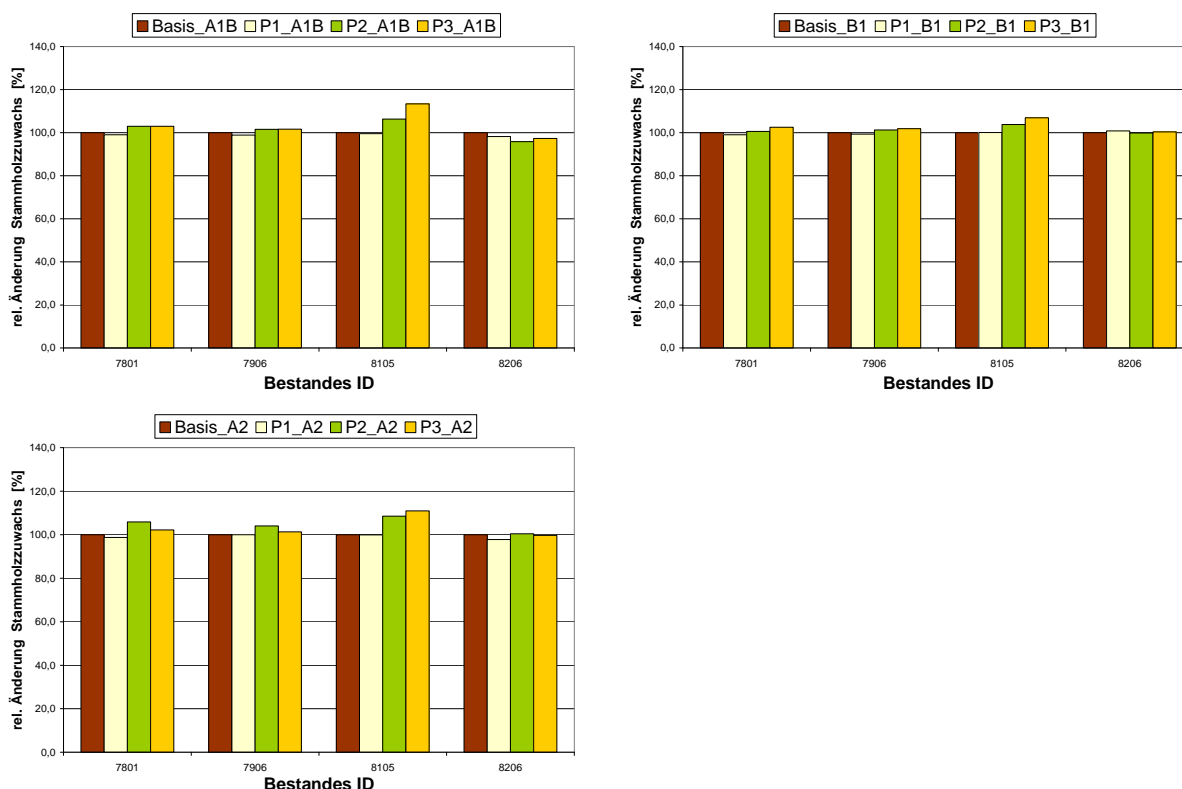
**Abb. 3.4.33: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der einzelnen Eichenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell WETTREG**

## II. REMO

Es wird nur eine geringe Wirkung auf die Nettoprimärproduktion und den relativen Stammholzzuwachs unter den Klimaszenarien berechnet. Nur der Bestand 8105 (Nord-östliche Harzvorländer) zeigt tendenziell positive Reaktionen für die Nettoprimärproduktion und den relativen Stammholzzuwachs (Abb. 3.4.34 und Abb. 3.4.35).



**Abb. 3.4.34: Mittlere Nettoprimärproduktion (NPP) für die einzelnen Eichenbestände (Bestandes ID siehe Tabelle 3.4.3) nach dem Modell REMO**



**Abb. 3.4.35: Änderung des relativen Stammholzzuwachses der einzelnen Eichenbestände (Bestandes ID s. Tabelle 3.4.3) nach dem Modell REMO**

#### IV. Vergleich der Ergebnisse unter den Modellen WETTREG und REMO

Die Trends der Reaktion der Eichenbestände auf Klimaänderungen unter den Modellen WETTREG und REMO sind ähnlich, unter dem Modell WETTREG aber stärker ausgeprägt. Da unter dem Klima des Modells REMO die Bestände deutlich produktiver sind, ist ihr Änderungspotential hin zu höherer Produktivität geringer.

#### I) Zusammenfassung für alle Baumarten

Eine zusammenfassende Bewertung der simulierten Trends für die vier untersuchten Baumarten Kiefer, Fichte, Eiche und Buche und die Größen für die Nettoprimärproduktion sowie den relativen Stammholzzuwachs ist in Tab. 3.4.8 und Tab. 3.4.9 dargestellt. Der direkte Vergleich der Ergebnisse der Simulationen nach den Modellen WETTREG und REMO zeigt, dass unter den Annahmen des Modells WETTREG deutlichere Trends in der Produktivität für die jeweiligen Szenarien und Zeiträumen simuliert werden, wohingegen für das Modell REMO mehrfach keine eindeutigen Trends in der Produktivität und im relativen Stammholzzuwachs zu erkennen sind. Im Prinzip wird aufgrund höherer Niederschläge in den Szenarien des Modells REMO im Vergleich zu denen des Modells WETTREG (s. Kap. 2.5) für die meisten Bestände eine höhere Produktivität berechnet. Übereinstimmungen der Aussagen unter beiden Klimamodellen lassen jedoch generelle Trends erkennen. Auffällig ist, dass es vor allem in den Szenarien A1B und B1 zu einer Erhöhung der Produktivität für alle Baumarten mit teilweisen Ausnahmen für Buche und Fichte kommt. Das Szenario A2 verzeichnet zwar meist die höchste Produktivität (größte Erwärmung, siehe vorherige Abschnitte). Allerdings werden auch Rückgänge bzw. eine Stagnation der Nettoprimärproduktion und des Stammholzzuwachses für den Zeitraum

2071-2100 deutlich. Diese erhöhen die Unsicherheit für eine Bestimmung klarer Trends unter dem Szenario A2, was wiederum die forstliche Planung erschwert. Für die Fichten- und Buchenbestände zeigt sich die zentrale Rolle der Niederschläge und der Niederschlagsverteilung für zukünftige Produktivitätsabschätzungen. Die höheren Lagen mit weiterhin hohen Niederschlägen profitieren von steigenden Temperaturen und einer längeren Vegetationsperiode. Für niederschlagslimitierte Standorte unter steigenden Temperaturen werden hingegen vermehrt Produktivitätseinbußen simuliert, obwohl die Vegetationsperiode unter allen Klimaszenarien deutlich steigt und damit auch das Produktionspotenzial (Menzel et al. 2008).

**Tab. 3.4.8: Vergleich der Berechnungen der Nettoprimärproduktion der Baumarten**

Wuchsgebiet	WETTREG			REMO		
	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
<i>Kiefer</i>						
Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland	++	++	+/-	+/-	+/-	+/-
Mittleres nordostdeutsches Altmoränenland	++	++	+/-	++	+/-	+/-
Düben-Niederlausitzer Altmoränenland, Harz, Nordöstliche Harzvorländer, Nordwestliches Harzvorland	++	++	+/-	++	+/-	+/-
Hoher Fläming, Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland	++	++	+/-	+/-	+/-	+/-
<i>Fichte</i>						
Harz	+/-	+/-	+/-	++	++	++
Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland, Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland	+/o	+/o	+/-	++	++	+/-
<i>Eiche*</i>						
Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland	++	++	++	+/-	+/-	+/-
Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland	++	++	+/-	+/-	+/-	+/-
Nordöstliche Harzvorländer	++	++	+/-	+/-	+/-	o
Harz	++	+/-	+/-	-/+	o	o
<i>Buche*</i>						
Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland	++	++	+/-	o	o	o
Nordöstliche Harzvorländer	o	o	+/-	-/o	-/o	-/o
Mittleres Unterharz-Plateau**	++	++	+/-	++	++	++
Östlicher Unterharz**	--	--	--	--	--	--
Ostharzer Abdachung**	o	o	o	+/-	+/-	+/-
Südharz**	--	-/+	--	o	o	o

++ = eindeutiger Anstieg

+/- = genereller Anstieg mit Reduktionen (einzelner) Wuchsbezirke in einer oder mehreren Perioden

o = keine klare Reaktion

-/+ = generelle Reduktion mit Anstieg (einzelner) Wuchsbezirke in einer oder mehreren Perioden

-- = eindeutige Reduktion

+/o = genereller Anstieg mit einzelnen Wuchsbezirken ohne eindeutige Reaktion

-/o = generelle Reduktion mit einzelnen Wuchsbezirken ohne eindeutige Reaktion

\* = Einzelbestände

\*\* = Wuchsbezirke



**Tab. 3.4.9: Vergleich der Änderung des relativen Stammholzzuwachses der Baumarten**

Wuchsgebiet	WETTREG			REMO		
	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
<i>Kiefer</i>						
Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland	++	+/-	+/-	++	+/-	+/-
Mittleres nordostdeutsches Altmoränenland	++	++	+/-	++	+/-	+/-
Düben-Niederlausitzer Altmoränenland, Harz, Nordöstliche Harzvorländer, Nordwestliches Harzvorland	++	++	+/-	++	+/-	+/-
Hoher Fläming, Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland	+/o	+/o	+/-	++	+/-	+/-
<i>Fichte</i>						
Harz	+/-	+/-	+/-	++	++	++
Nordthüringisches Trias-Hügelland, Nordwestliches Harzvorland, Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland	o	o	+/-	+/o	+/o	+/-
<i>Eiche*</i>						
Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland	++	++	+/-	o	o	o
Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland	++	++	+/-	o	o	+/o
Nordöstliche Harzvorländer	++	++	+/-	+/o	+/o	+/o
Harz	o	o	+/-	-/o	+/o	-/o
<i>Buche*</i>						
Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland	++	++	+/-	+/o	+/o	+/o
Nordöstliche Harzvorländer	+/-	+/-	+/-	--	--	--
Mittleres Unterharz-Plateau**	++	++	+/-	++	++	++
Östlicher Unterharz**	--	-/+	--	--	--	--
Ostharzer Abdachung**	+/-	+/o	o	+/-	++	+/-
Südharz**	--	-/+	--	--	+/-	+/-

++ = eindeutiger Anstieg

+/- = genereller Anstieg mit Reduktionen (einzelner) Wuchsbezirke in einer oder mehreren Perioden

o = keine klare Reaktion

-/+ = generelle Reduktion mit Anstieg (einzelner) Wuchsbezirke in einer oder mehreren Perioden

-- = eindeutige Reduktion

+/o = genereller Anstieg mit einzelnen Wuchsbezirken ohne eindeutige Reaktion

-/o = generelle Reduktion mit einzelnen Wuchsbezirken ohne eindeutige Reaktion

\* = Einzelbestände

\*\* = Wuchsbezirke

### 3.4.2.7. Ergebnisse der Analyse des Kohlenstoffhaushalts

In der folgenden Analyse werden mögliche Veränderungen des Kohlenstoffhaushaltes für Forstflächen dargestellt. Vorwiegend wird dabei auf das Szenario A1B eingegangen, Darstellungen für die Emissionsszenarien A2 und B1 für die Modelle WETTREG und REMO sind im Anhang zum Kapitel Forstwirtschaft zu finden. Die Datengrundlage befindet sich in der mitgelieferten Datei<sup>6</sup>.

#### a) WETTREG

Für das Szenario A1B zeigt sich für alle Zukunftszeiträume bis 2100, insbesondere für die beiden späteren Szenarienzeiträume, ein Anstieg der gesamten Kohlenstoffspeicherung gegenüber dem Basisszenario (Abb. 3.4.36), vor allem aber im Norden von Sachsen-

<sup>6</sup> ergebnisse\_owk\_lsa.xls

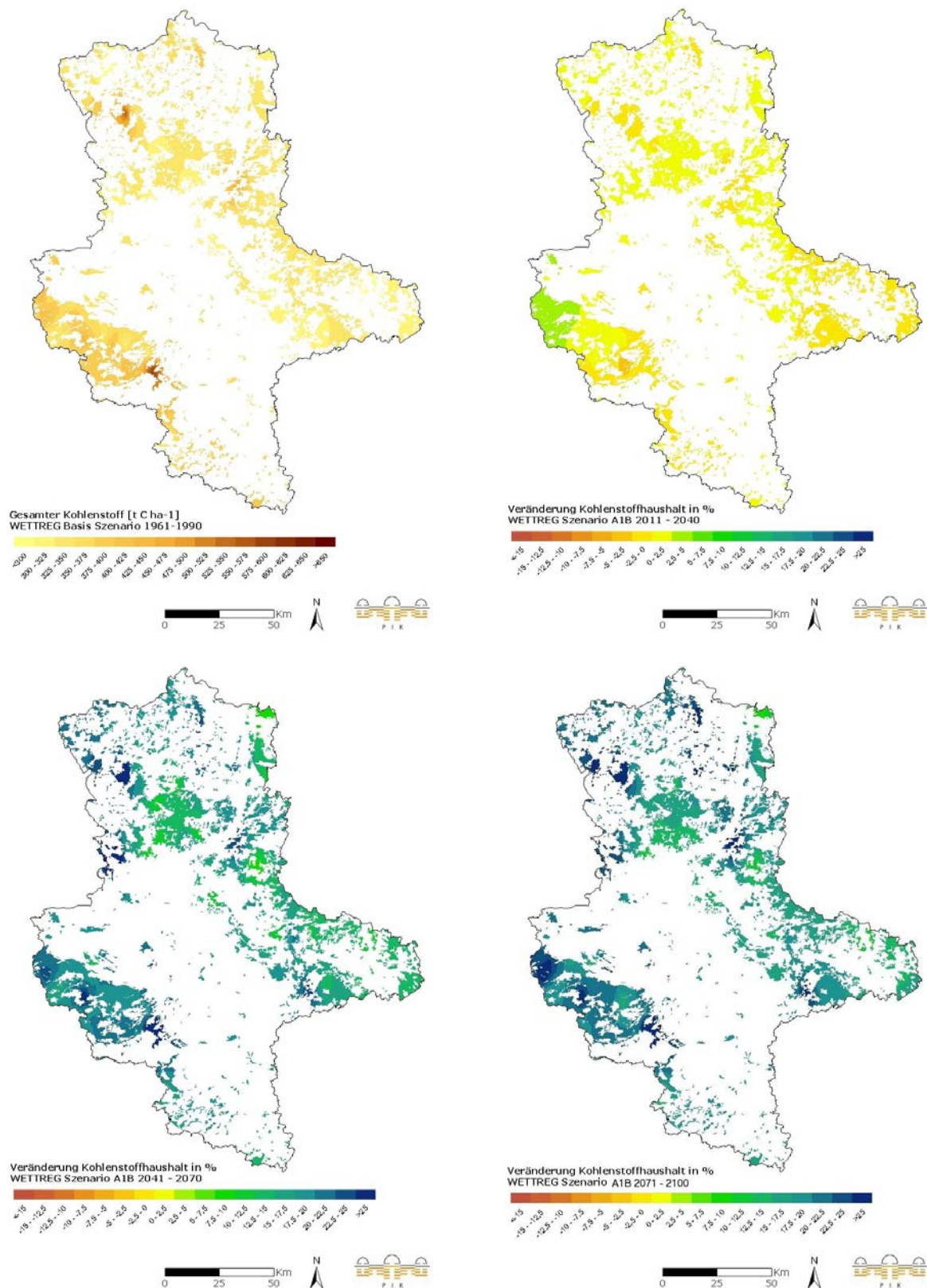
Anhalt (Altmark) sowie im Harz. Dies ist durch höhere Kohlenstoffakkumulation im Boden und im Bestand bedingt. Die für eine Vielzahl von Beständen besseren Wachstumsbedingungen führen durch einen höheren Streueintrag zu einer steigenden Kohlenstoffakkumulation für die meisten Böden (siehe auch BCA in Tab. 3.4.6 und Tab. 3.4.7) und einer höheren Kohlenstoffspeicherung im Gesamtbestand (bei gleichbleibender Bewirtschaftung bzw. Entnahme). Eine wesentliche Ursache dafür sind die projizierten höheren Temperaturen im Laufe des Jahrhunderts gegenüber der Basiszeitraum, vor allem unter nicht stark wasserlimitierten Bedingungen (westlicher Harz, Westprignitz). In einigen kleinen Gebieten (z.B. bedingt durch die Buchenbestände im Harz) simuliert das Modell Rückgänge in der gesamten Kohlenstoffspeicherung für den ersten Szenarienzeitraum 2011 - 2040 für A1B und B1, die durch die abnehmende Produktivität der dort simulierten ÖWK-Flächen verursacht ist.

Die Spanne der relativen Änderung der gesamten Kohlenstoffspeicherung für die zukünftigen Zeitperioden im Vergleich zum Basiszeitraum ist für die 62 untersuchten Bestände der ÖWK-Flächen unter dem Szenario B1 am größten (Tab. 3.4.10). Für die Zeiträume 2041 - 2070 und 2071 - 2100 werden nur positive Änderungen in der Kohlenstoffspeicherung im Vergleich zum Basiszeitraum 1961-1990 simuliert.

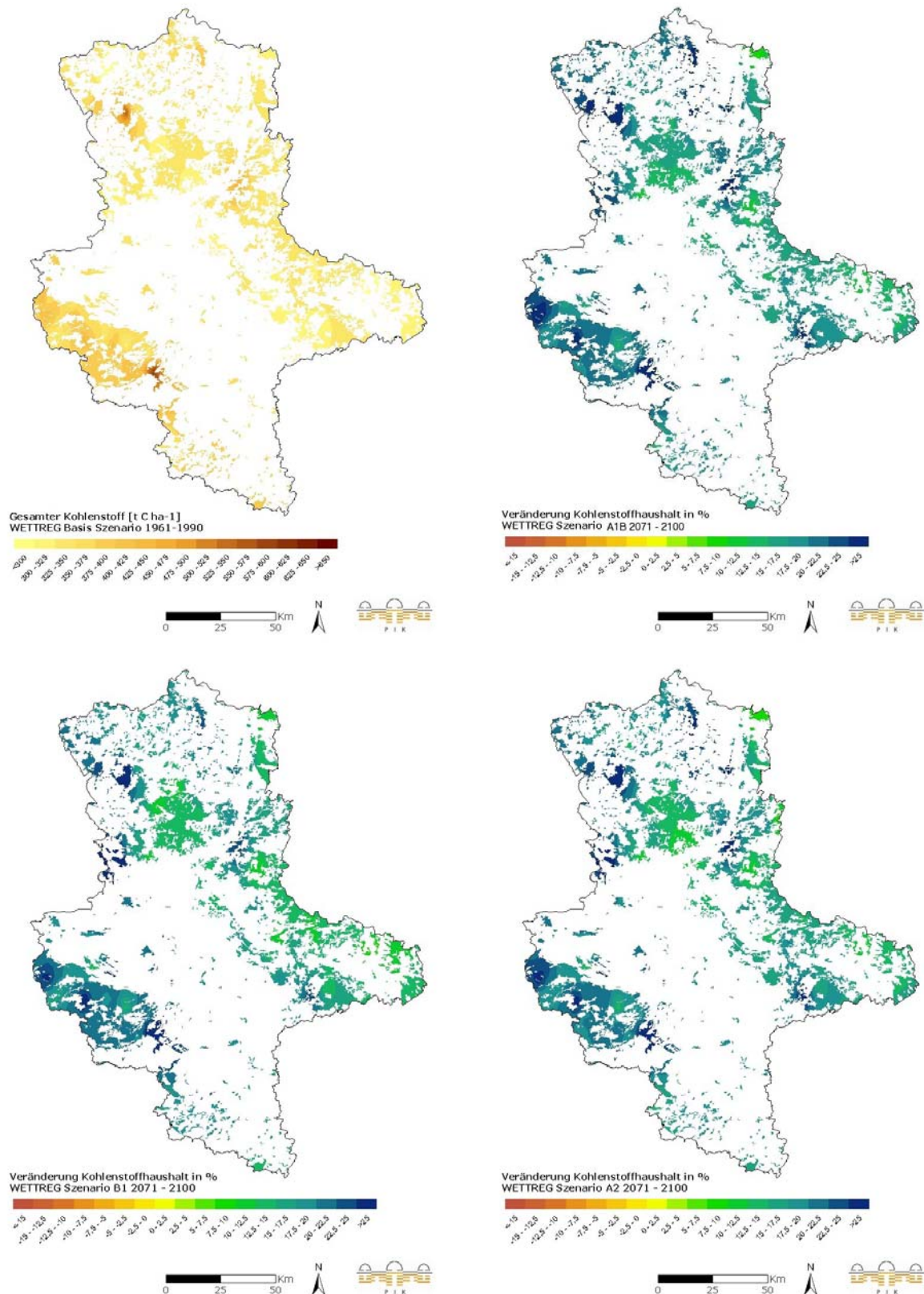
**Tab. 3.4.10: Minimale und maximale Änderungsraten [%] der gesamten Kohlenstoffspeicherung für die Zukunftsperioden im Vergleich zum Basiszeitraum 1961-1990**

WETTREG	2011-2040		2041-2070		2071-2100	
	min	max	min	max	min	max
A2	3,3	25,6	6,9	35,2	5,4	35,0
A1B	- 1,3	20,3	6,1	34,9	8,6	36,1
B1	-0,7	64,6	3,8	36,5	6,8	37,4

Abb. 3.4.37 zeigt, dass für den Zeitraum 2071-2100, in welchem der Temperaturanstieg für die drei Emissionsszenarien deutlich variiert, unter den Szenarien A2 und A1B die höchste Kohlenstoffspeicherung berechnet wird.



**Abb. 3.4.36: Gesamt-Kohlenstoffspeicherung [t C/ha] nach dem Model WETTREG und dem Szenario A1B für den Basiszeitraum (oben links) und die relativen Änderungen [%] gegenüber dem Basiszeitraum für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100, interpoliert für 62 ÖWK-Flächen**



**Abb. 3.4.37: Gesamt-Kohlenstoffspeicherung [t C/ha] nach dem Modell WETTREG für den Basiszeitraum (oben links) und die relativen Änderungen [%] gegenüber dem Basiszeitraum unter den Szenarien A1B, A2, B1 im Zeitraum 2071-2100, interpoliert für 62 ÖWK-Flächen**

## b) REMO

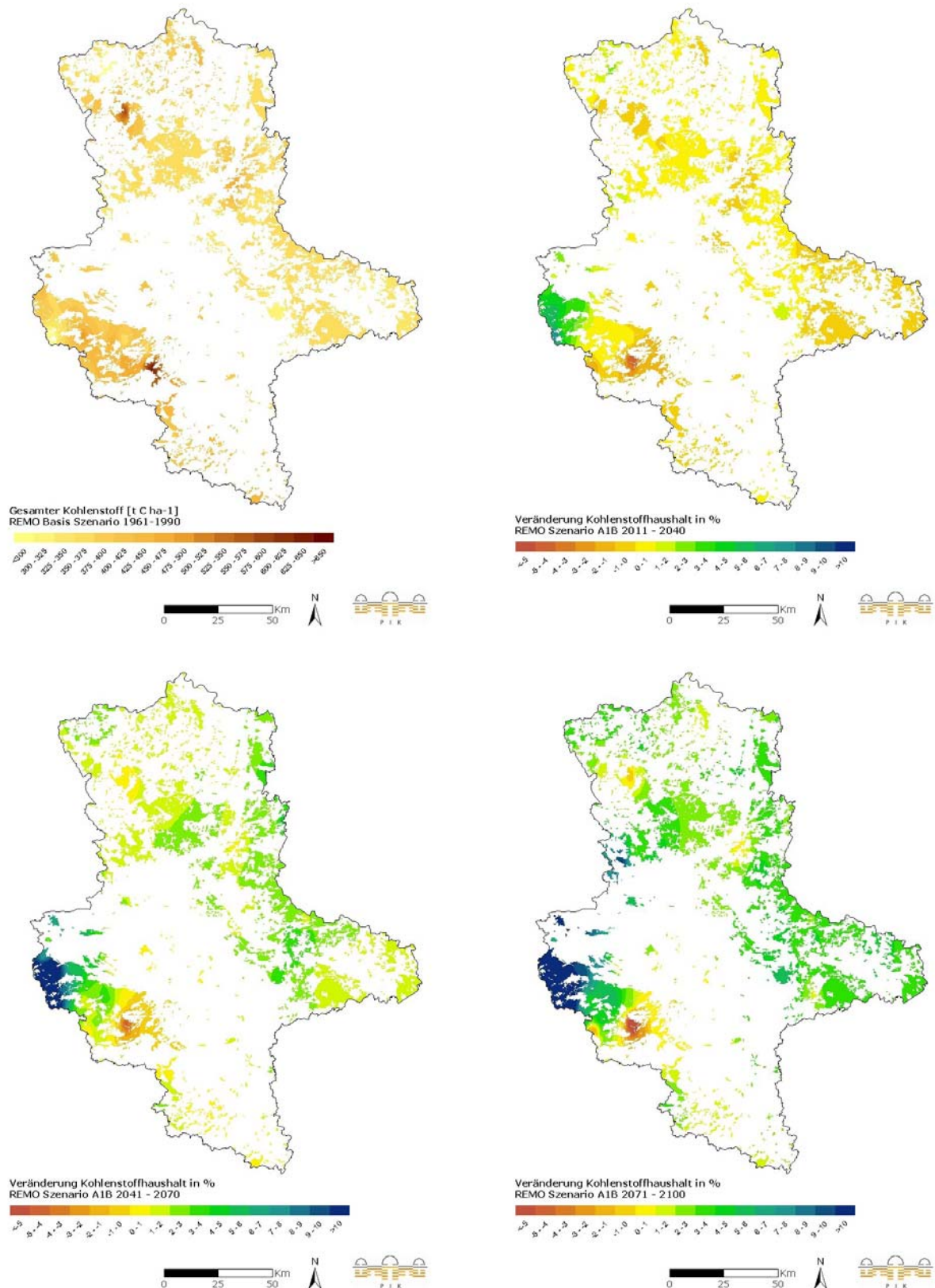
Das Modell 4C berechnet für den Zeitraum 1961-1990 des Klimamodells REMO und des Klimamodells WETTREG sehr ähnliche Gesamtkohlenstoffspeicherung der 62 ÖWK-Bestände, wie der Vergleich der Karten links oben in Abb. 3.4.36 und 3.4.38 zeigt. Unter den Szenarien des Modells REMO zeigt sich eine andere Spannbreite der Änderung der Gesamt-Kohlenstoffspeicherung gegenüber dem Basiszeitraum als unter den WETTREG-Szenarien<sup>7</sup> (siehe Tab. 3.4.11 und Tab. 3.4.10). Für die Zeiträume 2011-2040 bis 2071-2100 werden für einige Standorte (hauptsächlich Buchenbestände) Rückgänge in der Gesamt-Kohlenstoffspeicherung und für andere deutliche Steigerungen (Fichtenbestände im Harz) simuliert (Abb. 3.4.38). Für den Zeitraum 2071-2100 ist aufgrund des hohen Temperaturanstiegs einerseits und der stärkeren Limitierung durch Wasserstress in Folge von höheren Verdunstungsansprüchen andererseits der Unterschied zwischen Verlusten und Gewinnen in der gesamten Kohlenstoffspeicherung besonders hoch (Tab. 3.4.11). Die nicht wasserlimitierten Standorte profitieren deutlich vom Temperaturanstieg, die anderen Standorte sind eher davon benachteiligt. Die Unterschiede zwischen den Szenarien, hier für den Zeitraum 2071-2100 dargestellt (Abb. 3.4.39), zeigen insbesondere unter dem Szenario B1 deutlich, dass vor allem aufgrund der hier geringeren Temperaturen im Vergleich zu den Szenarien A2 und A1B geringere Erhöhungen der Kohlenstoffspeicherung simuliert werden (Altmark).

**Tab. 3.4.11: Minimale und maximale Änderungsraten [%] der gesamten Kohlenstoffspeicherung für die Zukunftszeiträume im Vergleich zum Basiszeitraum 1961-1990**

REMO	2011-2040		2041-2070		2071-2100	
	min	max	min	max	min	max
A1B	- 5,8	8,3	- 5,4	25,7	- 10,2	42,2
B1	- 1,4	6,7	- 2,7	19,4	- 6,1	36,6
A2	- 4,0	4,0	-6,3	38,4	- 7,6	43,4

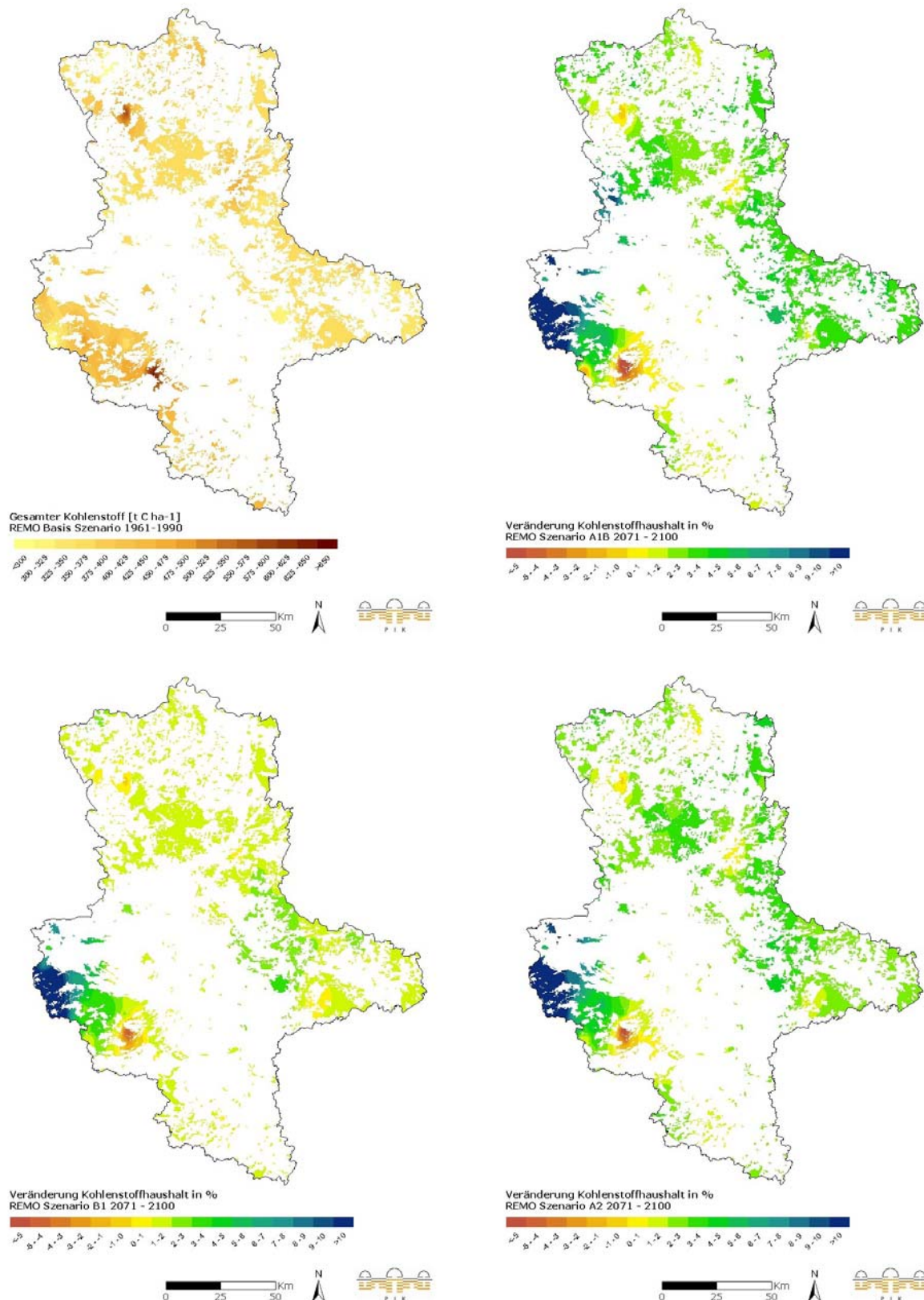
<sup>7</sup> Dies führt zu unterschiedlich skalierten Legenden in Abb. 3.4.36 und 3.4.38





**Abb. 3.4.38: Gesamt-Kohlenstoffspeicherung [t C/ha] nach dem Modell REMO und dem Szenario A1B für den Basiszeitraum (oben links) und die relativen Änderungen [%] gegenüber dem Basiszeitraum für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100, interpoliert für 62 ÖWK-Flächen**





**Abb. 3.4.39: Gesamt-Kohlenstoffspeicherung [t C/ha] nach dem Modell REMO für den Basiszeitraum (oben links) und die relativen Änderungen [%] gegenüber dem Basiszeitraum unter den Szenarien A1B, A2, B1 in dem Zeitraum 2071-2100, interpoliert für 62 ÖWK-Flächen**

### 3.4.2.8. Ergebnisse der Analyse des Wasserhaushalts

Die Wasserverfügbarkeit ist eine bedeutende Einflussgröße für den Bereich der Forstwirtschaft. Mögliche zukünftige Veränderungen des Wasserhaushaltes für Sachsen-Anhalt werden in der folgenden Analyse dargestellt. Dabei werden vorwiegend die Ergebnisse nach dem Szenario A1B betrachtet, Darstellungen für die Emissionsszenarien A2 und B1 unter den Modellen WETTREG und REMO sind im Anhang des Kapitels Forstwirtschaft zu finden. Die Datengrundlage befindet sich in der mitgelieferten Datei<sup>8</sup>.

#### a) WETTREG

Die Werte der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz (KWB) weisen für den Basiszeitraum eine große Spannweite von – 116 mm (Mittleres Nordostdeutsches Altmoränenland) bis 710 mm (Harz) auf. Die Werte sinken in den betrachteten Projektionszeiträumen besonders deutlich unter den Szenarien A1B und A2 (Tab. 3.4.12).

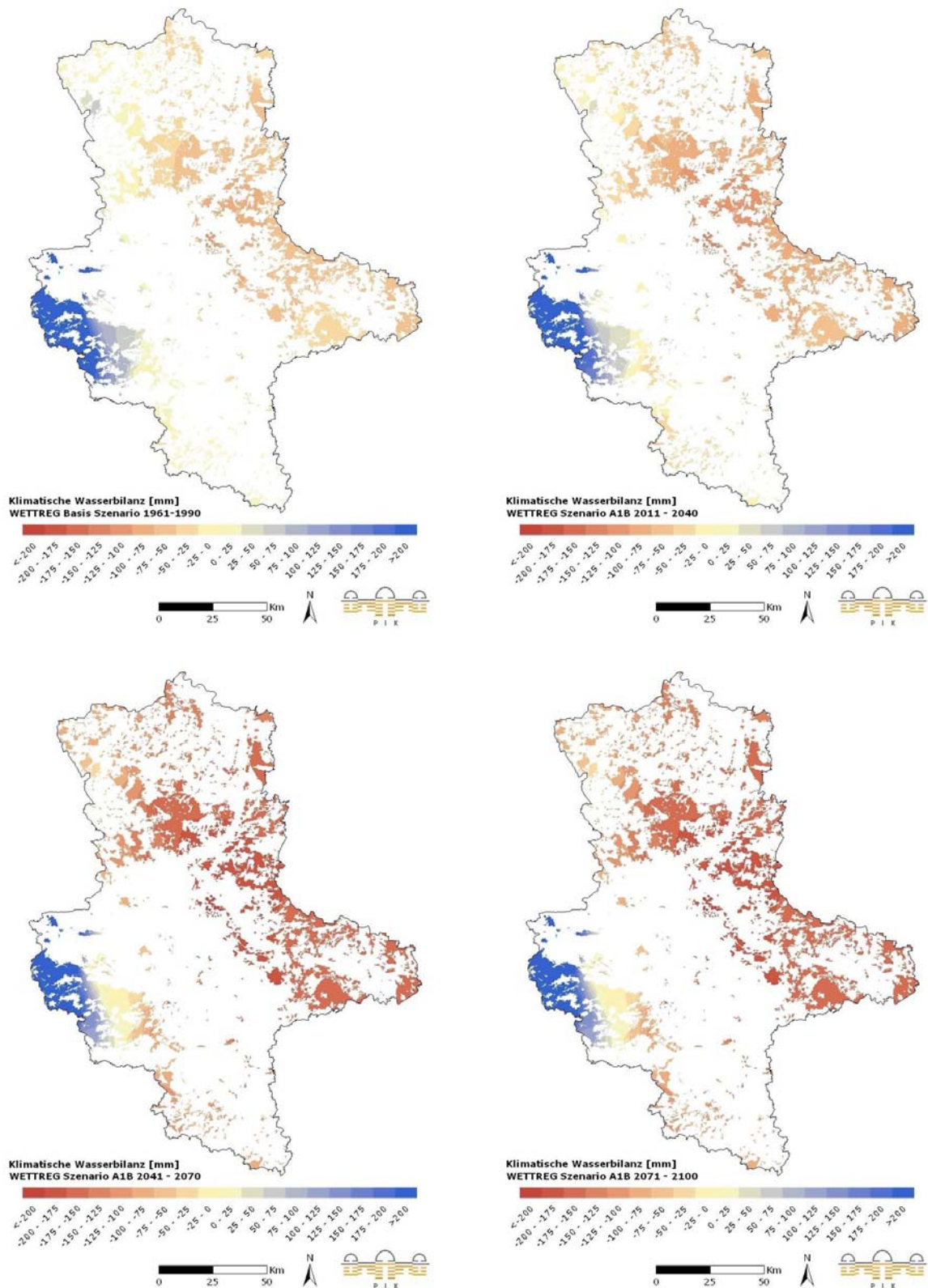
**Tab. 3.4.12: Minimal- und Maximalwerte der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz [mm] nach den Projektionen des Modells WETTREG**

WETTREG	Basis		2011-2040		2041-2070		2071-2100	
	min	max	min	max	min	max	min	max
A1B	- 116,2	710,8	- 143,1	676,0	- 214,8	608,1	- 208,4	609,5
B1	- 116,2	710,8	- 128,4	693,9	- 184,6	605,0	-193,6	650,6
A2	- 116,2	710,8	- 156,0	687,9	- 225,7	617,1	- 209,2	625,7

Die KWB, dargestellt für die Waldgebiete und das Szenario A1B (Abb. 3.4.40), zeigt eine klare räumliche Differenzierung (niedrige Werte im Fläming und Osten von Sachsen-Anhalt gegenüber hohen Werten im Harz). Ein deutlicher Rückgang der Werte der KWB ist im Norden, Osten und Süden von Sachsen-Anhalt über die Zukunftszeiträume ist erkennbar.

Die Szenarien A1B, A2 und B1 führen zu deutlichen Rückgängen der jährlichen Versickerung in den betrachteten Waldbeständen (Tab. 3.4.13). Lediglich im Zeitraum 2071-2100 kommt es in einigen Beständen zu einem leichten Anstieg der Versickerung im Vergleich zum Zeitraum 2041-2070 (Abb. 3.4.41). Es ist davon auszugehen, dass dies durch den höheren Niederschlag im Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zum Zeitraum 2041-2070 verursacht wird (s.a. Kap. 2.5., Tab. ).

<sup>8</sup> ergebnisse\_owek\_lsa.xls

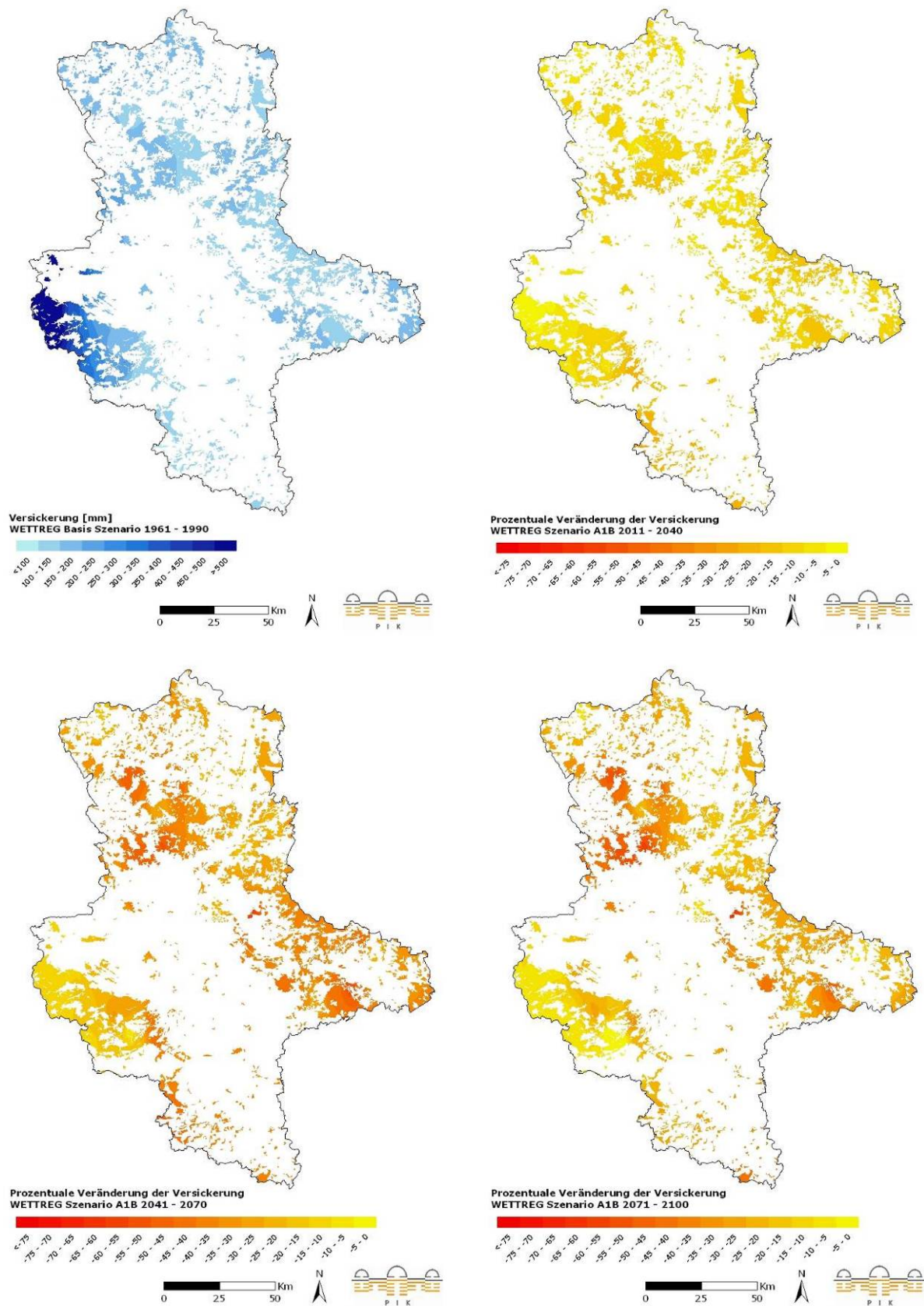


**Abb. 3.4.40: Klimatische Wasserbilanz [mm] nach dem Modell WETTREG für den Basiszeitraum (oben links) unter dem Szenario A1B für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100**

**Tab. 3.4.13: Minimal- und Maximalwerte der Änderung der mittleren jährlichen Versickerung [%] nach den Projektionen des Modells WETTREG gegenüber dem Basiszeitraum 1961-1990**

WETTREG	2011-2040		2041-2070		2071-2100	
	min	max	min	max	min	max
A1B	- 27,4	- 1,7	- 59,6	- 2,5	- 62,8	12,9
B1	- 21,6	6,7	- 49,4	- 2,8	- 42,6	10,9
A2	- 36,8	0,0	- 67,3	2,3	- 63,5	7,7





**Abb. 3.4.41: Versickerung [mm] nach dem Modell WETTREG für den Basiszeitraum (oben links) und die relative Änderung der Versickerung [%] in den Zeiträumen 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 unter dem Szenario A1B**

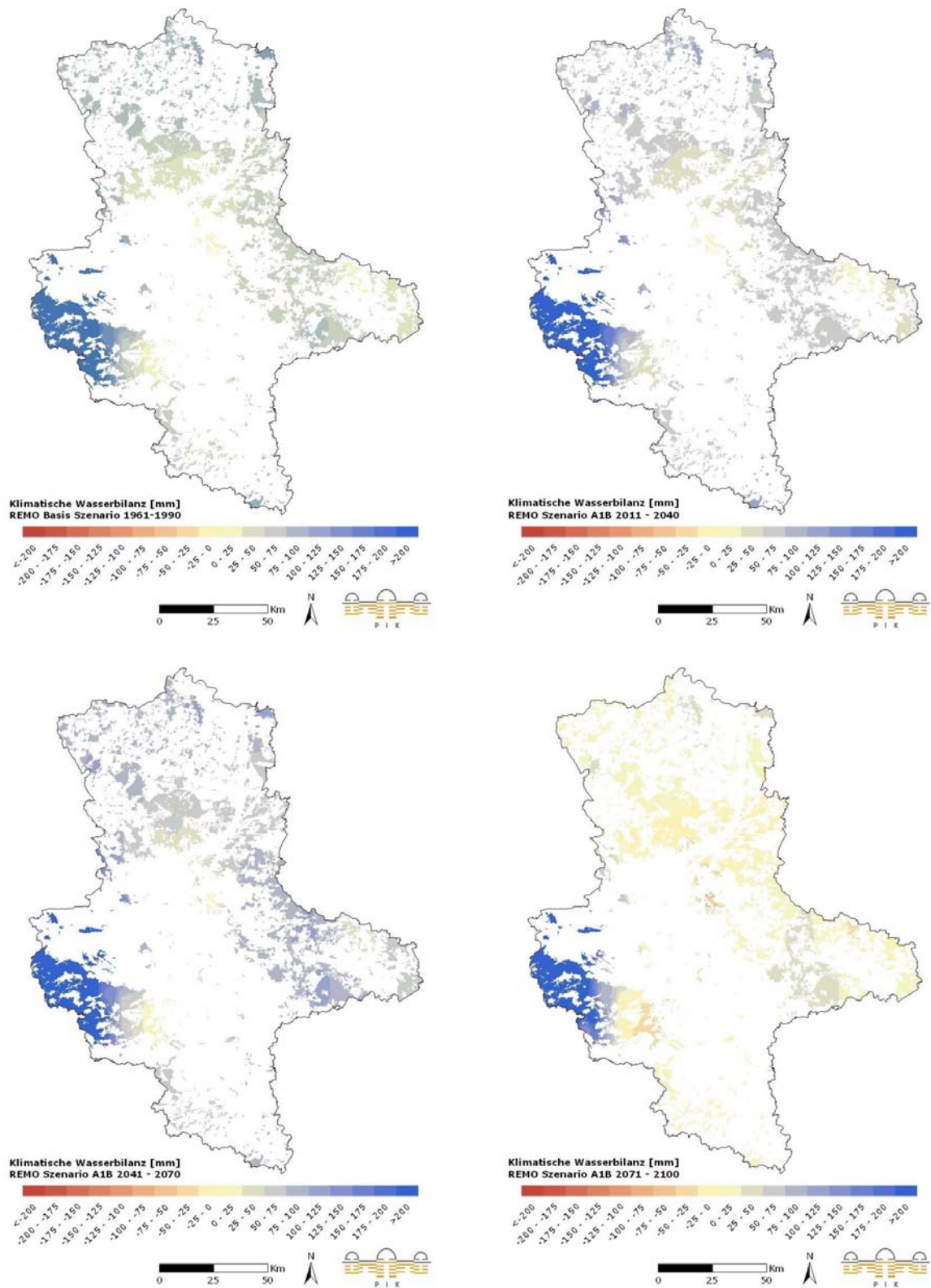
## b) REMO

Die KWB basierend auf den Szenarien unter dem Modell REMO ist deutlich geprägt von den Niederschlagsverhältnissen in diesen Szenarien (Abb. 3.4.42). Daher treten zum Beispiel für das Szenario B1 nur sehr geringe, negative Werte auf und dies auch erst in dem Zeitraum 2071-2100 (Tab. 3.4.14). Dies ist in Übereinstimmung mit der Einschätzung, dass das Szenario B1 bezüglich der KWB und des Niederschlages das feuchteste Szenario im Vergleich mit den Szenarien A1B und A2 ist (s.a. Kap. 2.5).

**Tab. 3.4.14: Minimal- und Maximalwerte der mittleren, jährlichen, klimatischen Wasserbilanz [mm] nach den Projektionen des Modells REMO**

REMO	Basis		2011-2040		2041-2070		2071-2100	
	min	max	min	max	min	max	min	max
A1B	-15,2	971,3	-5,3	1029,1	-15,1	1095,6	-67,6	990,8
B1	-15,2	971,3	21,4	1128,4	33,8	1032,2	-10,4	1027,5
A2	-15,2	971,3	3,4	1020,9	-50,2	972,7	-48,0	1072,1



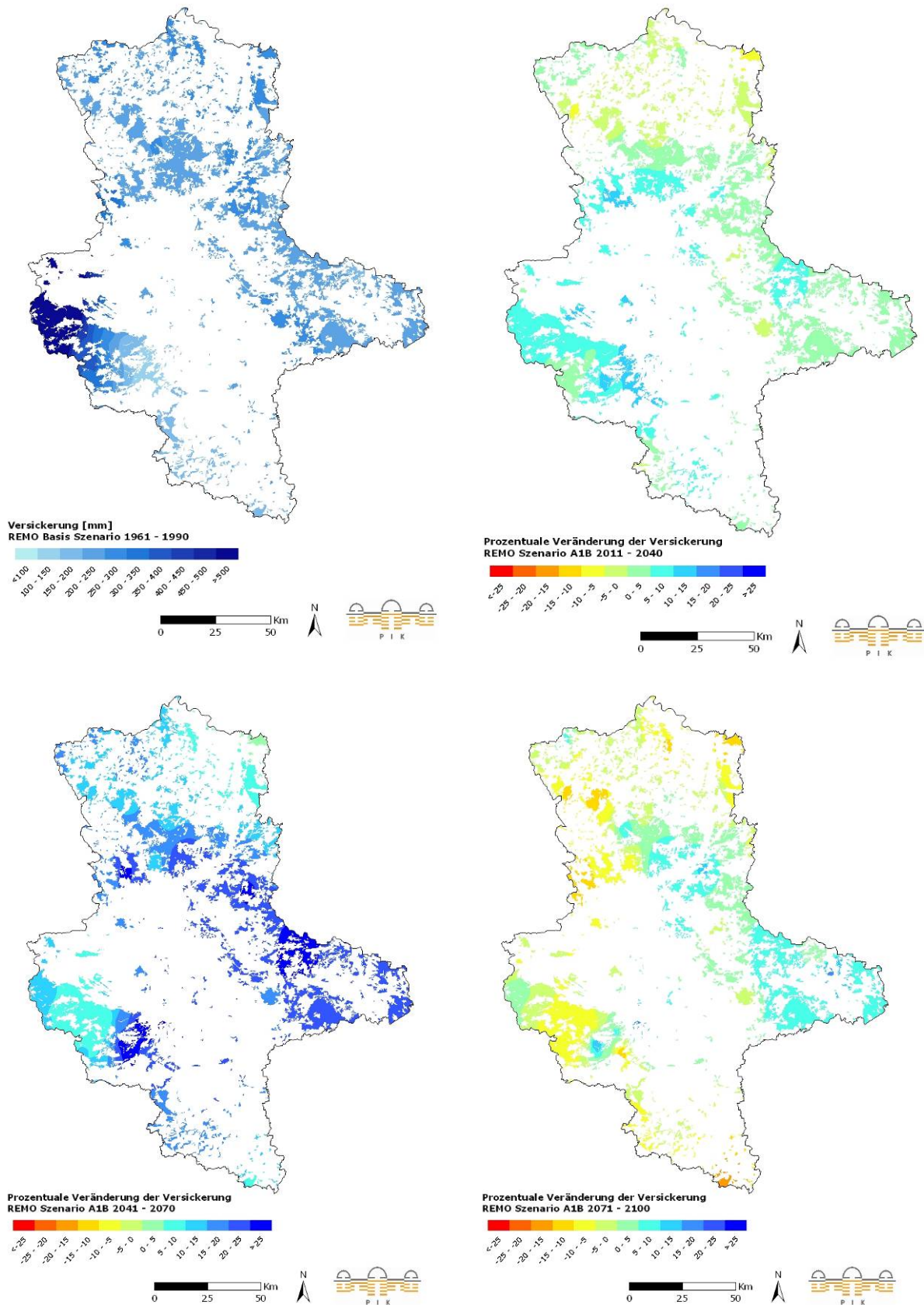


**Abb. 3.4.42: Klimatische Wasserbilanz [mm] nach dem Modell REMO für den Basiszeitraum (oben links) unter dem Szenario A1B für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100**

Die relativen Änderungen der jährlichen Versickerungsraten sind nach den Szenarien für das Modell REMO im Vergleich zum Basiszeitraum in allen Zukunftszeiträumen deutlich höher als nach den Szenarien des Modells WETTREG, d.h. es kommt an vielen Standorten zu geringeren Rückgängen bzw. deutlichen Zunahmen der Versickerung. Vor allem für den Zeitraum 2041-2070 (hier für das Szenario A1B dargestellt) wird eine Zunahme der Versickerungsraten gegenüber dem Basiszeitraum simuliert (Tab. 3.4.15), in dem Zeitraum 2071-2100 gehen dann die Versickerungsraten vor allem in der Altmark zurück. Im Vergleich zu dem Modell WETTREG sind unter diesen Szenarien geringere Rückgänge des Grundwassereintrags durch Versickerung erkennbar (Abb. 3.4.43).

**Tab. 3.4.15: Minimal- und Maximalwerte der Änderung der mittleren jährlichen Versickerung [%] für Projektionen nach dem Modell REMO gegenüber dem Basiszeitraum 1961-1990**

REMO	2011-2040		2041-2070		2071-2100	
	min	max	min	max	min	max
A1B	- 8,1	15,7	- 0,8	37,6	- 19,1	19,4
B1	- 8,9	48,3	- 0,8	48,7	- 8,0	35,4
A2	- 3,2	34,1	- 21,0	12,6	- 12,1	23,7



**Abb. 3.4.43: Versickerung [mm] nach dem Modell REMO für den Basiszeitraum (oben links) und die relative Änderung der Versickerung unter den Szenarien A1B für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100**

Aufgrund der Unterschiede im Niederschlagsmuster der Szenarien der Modelle WETTREG und REMO, die vor allem die Höhe der Niederschläge, aber auch deren räumliche Verteilung betrifft, unterscheiden sich die Werte für die KWB und die Versickerung nach den Modellen WETTREG und REMO deutlich. Es zeigt sich, dass die Rückgänge der Sommer-niederschläge in den Szenarien A1B, A2 und B1 des Modells WETTREG (s. Anhang zu Kap. 2.5) zu Rückgängen der KWB vor allem im Osten und Norden von Sachsen-Anhalt führen. Die langjährigen Mittel liegen hier im negativen Bereich. Die Versickerung geht in allen Waldgebieten des Landes zurück, besonders stark im Osten (Fläming), Norden (Altmark) und Süden. Unter den Szenarien des Modells REMO zeigen sich ähnliche Muster: Für nördliche und östliche Waldgebiete wird ebenfalls eine negative KWB in dem Zeitraum 2071-2100 berechnet, allerdings liegen die Werte in einer anderen Größenordnung (siehe Tab. 3.4.12 und Tab. 3.4.14). Die Versickerung unter den Waldbeständen geht unter dem Modell REMO weitaus geringer zurück als unter den Projektionen des Modells WETTREG.

### **3.4.2.9. Analyse der klimatischen Waldbrandgefahr**

Auch die folgende Analyse der klimatischen Waldbrandgefahr geht vorwiegend auf die Szenarien A1B ein, Darstellungen für die Emissionsszenarien A2 und B1 der Modelle WETTREG und REMO sind im Anhang zum Kapitel Forstwirtschaft zu finden. Die Datengrundlage befindet sich in der mitgelieferten Datei<sup>9</sup>. Die klimatische Waldbrandgefahr beschreibt alleine die klimatischen Randbedingungen für ein mögliches Austreten von Waldbränden.

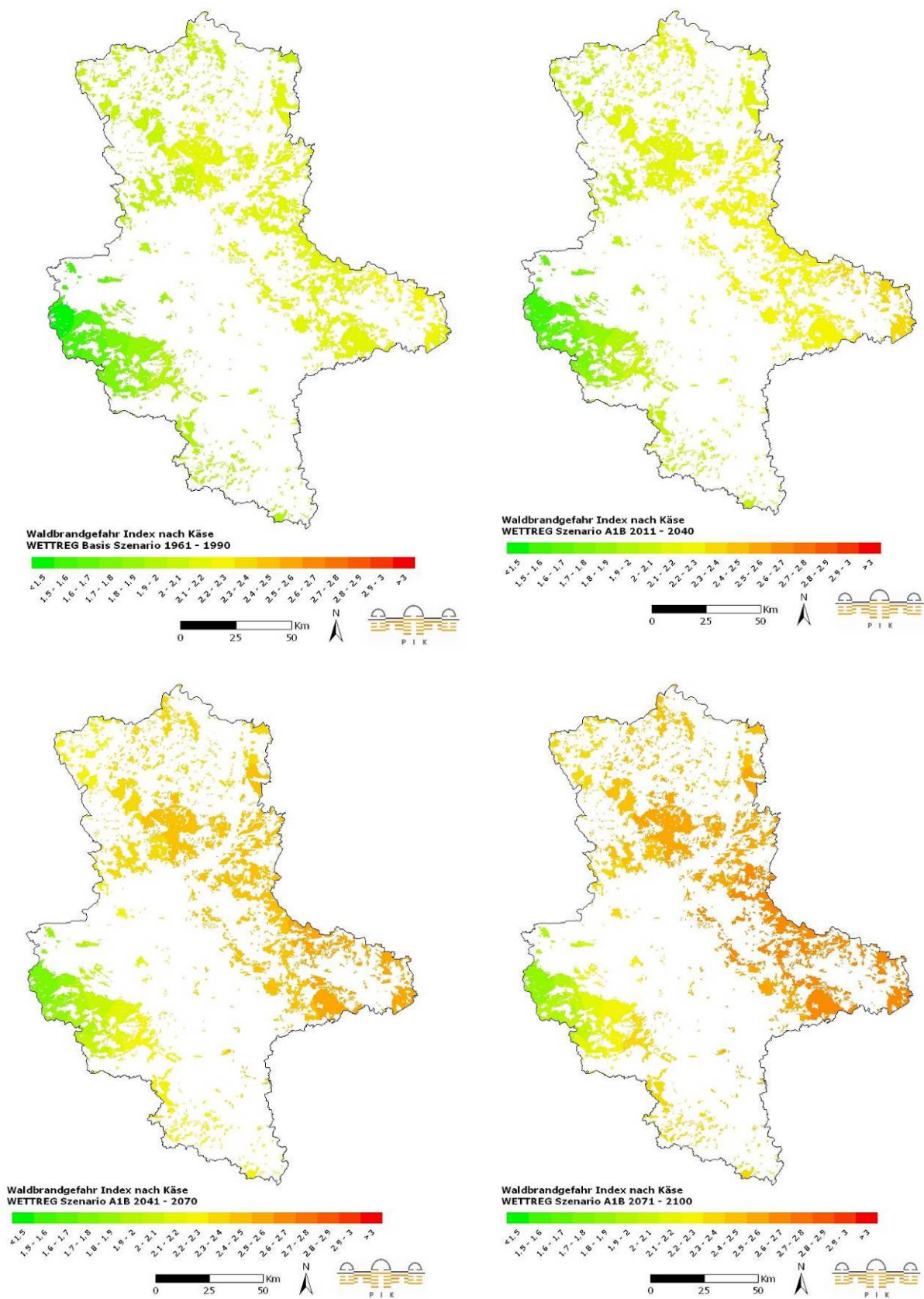
#### **A) WETTREG**

Die mittlere jährliche klimatische Waldbrandgefahr steigt unter den Szenarien des Modells WETTREG (hier für A1B dargestellt in Abb. 3.4.44) vor allem im Norden und Osten (Altmark, Fläming) sowie südlich des Harzes deutlich an. Vor allem für die Zeiträume 2041-2070 und 2071-2100 sind diese Gebiete höher waldbrandgefährdet als im Basiszeitraum 1961-1990. Im Zeitraum 2071-2100 können die Werte in den trockenheitsgefährdeten Regionen für die klimatische Waldbrandgefährdung bis auf 2,7 unter den Szenarien A1B und A2 sowie auf 2,6 unter dem Szenario B1 steigen (s. Anhang Abb. 3.4.13 und 3.4.14). Dies bedeutet im Mittel des Jahres den Anstieg um eine halbe Stufe nach der internationalen Klassifizierung.

---

<sup>9</sup> ergebnisse\_owek\_lsa.xls



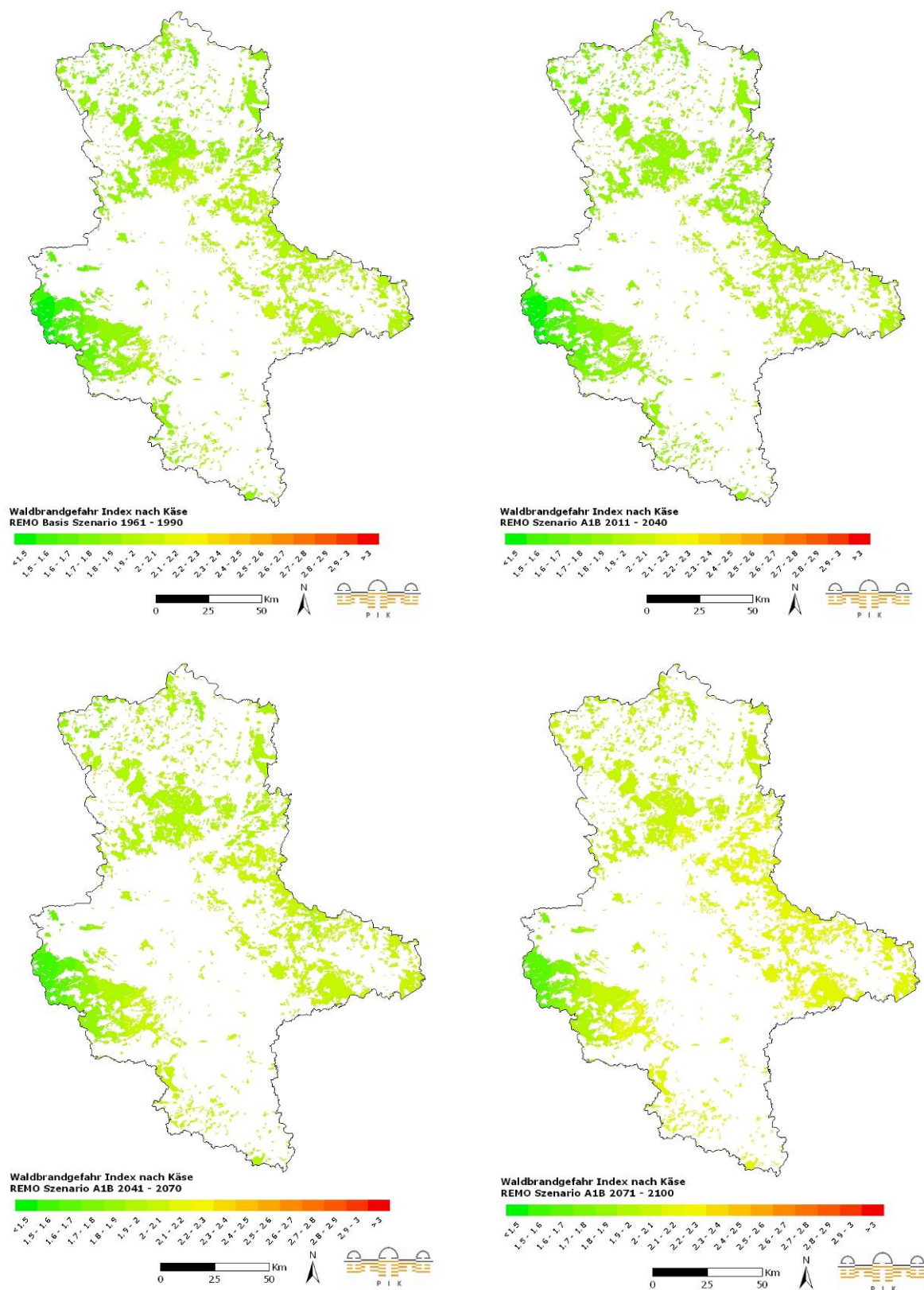


**Abb. 3.4.44: Klimatische Waldbrandgefahr nach dem Modell WETTREG und dem Szenario A1B für den Basiszeitraum 1961-1990 und für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100**

## B) REMO

Unter den Klimaszenarien des Modells REMO wird unter heutigem Klima aufgrund der höheren Niederschläge als in den Szenarien des Modells WETTREG ein deutlich geringeres Risiko der Waldbrandgefahr abgeschätzt als unter den Projektionen des Modells WETTREG (Abb. 3.4.45). In den Zeiträumen 2011-2040 bis 2071-2100 steigt dieses Risiko nur geringfügig (vor allem im Osten, Fläming). Insbesondere im Zeitraum 2071-2100 liegt die klimatische Waldbrandgefahr bei maximal 2,1 (Szenario A2 und B1) bis 2,2 (Szenario A1B) und damit deutlich geringer als unter den Projektionen des Modells WETTREG im Zeitraum 2071-2100. Die räumliche Gliederung der Gefährdung ist ähnlich der unter dem Modell WETTREG und durch die räumliche Differenzierung der Niederschläge bedingt. Die höchste Gefährdung tritt in der östlichen und südlichen Region auf.





**Abb. 3.4.45: Klimatische Waldbrandgefahr nach dem Modell REMO und unter dem Szenario A1B für den Basiszeitraum 1961-1990 und für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100**

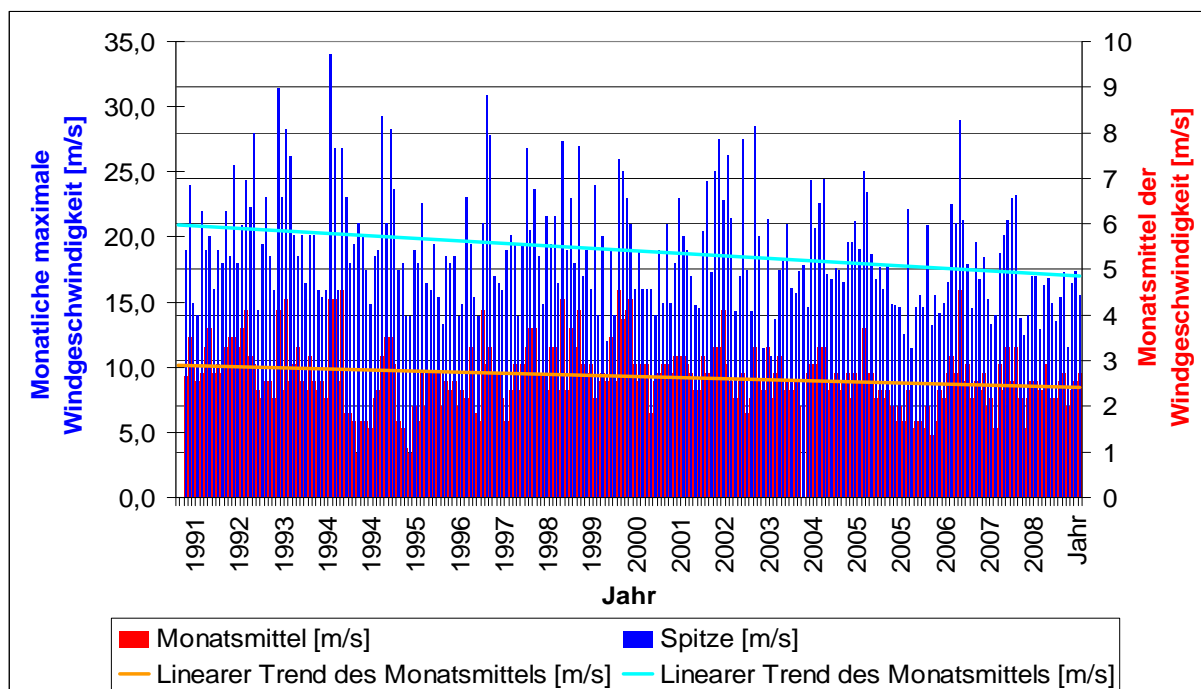
### 3.4.3. Windwurfgefährdung der Wälder

In der folgenden Abschätzung zur Windwurfgefährdung der Wälder wird zuerst auf die Situation in Sachsen-Anhalt eingegangen. Dann werden die Variablen mit Einfluss auf die Gefährdung sowie deren Ausprägung vorgestellt und diskutiert. Dem schließt sich die Abschätzung der potentiellen Windwurfgefährdung durch einen Gefährdungsindex an.

#### 3.4.3.1. Einleitung

Stürme gelten als der „wichtigste kurzfristig wirkende natürliche externe Faktor, der die Struktur von Wäldern maßgeblich beeinflusst“ (Fischer 2003). Sie gehören bezüglich ihrer räumlichen Ausprägung, Eintrittshäufigkeit sowie der durch sie entstehenden Versicherungsschäden zu den verheerendsten Naturkatastrophen weltweit. Im Zeitraum 1950-2007 konnten Stürmen rund 80 % der weltweiten, mit Naturkatastrophen zusammenhängenden, versicherten Schäden zugeschrieben werden (Rauch 2008).

In Deutschland ist derzeit bei Stürmen noch keine Änderung der Stärke oder Häufigkeit nachweisbar (Schönwiese 2007) und deren zukünftige Entwicklung ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Einige Projektionen deuten für die Zukunft auf eine erhöhte Sturmgefahr in Mitteleuropa durch eine Zunahme von starken Zyklonen hin (IPCC 2007), weitere Studien erwarten bis 2100 eine Zunahme der extremen Zyklone in Westeuropa, welche eine Erhöhung der maximalen Windgeschwindigkeiten zur Folge haben könnte<sup>10</sup> (Pinto et al. 2007).



**Abb. 3.4.46: Monatlicher Mittel- und Spitzenwert der Windgeschwindigkeit in Magdeburg von Januar 1991 bis Juli 2009**

<sup>10</sup> Simulationen mit dem Modell ECHAM5/MPI-OM1 unter Verwendung der SRES Szenarien A1B und A2 und Validierung mit ERA40 Winddaten, Vergleich der Zeiträume 1960-2000 und 2070-2100

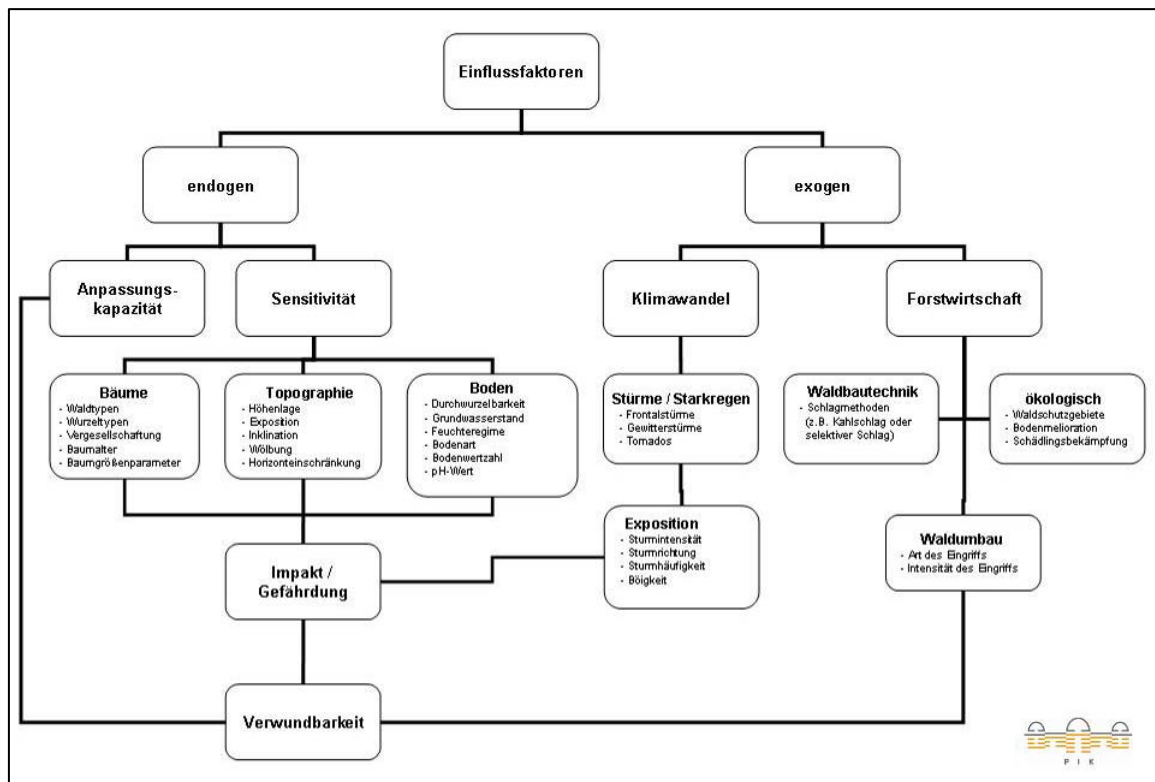
Zwischen Januar 1991 und Juli 2009 haben in Magdeburg sowohl die mittlere monatliche Windgeschwindigkeit, als auch die monatliche Spitzengeschwindigkeit signifikant abgenommen (Basis DWD, Irrtumswahrscheinlichkeit  $<5\%$ ) (Abb. 3.4.46). Der über den Zeitraum 1961 - 1990 gemittelte Tagesdurchschnitt der Windgeschwindigkeit lag in Magdeburg bei 2,17 m/s, in Halle bei 2,05 m/s und auf dem Brocken bei 9,27 m/s. Darüber hinaus ergab sich unter der Annahme eines linearen Trends eine signifikante Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeit (Tab. 3.4.16). Die anschließenden 1990er Jahre waren jedoch durch außergewöhnlich hohe mittlere Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet (Abb. 3.4.46). Aus diesem lokalen Maximum sowie den erwähnten negativen Trends vor und nach 1990 werden die Schwankungen des geostrophischen Windes in der Deutschen Bucht mit einer Periode von ca. 50 Jahren deutlich (Müller-Westermeier 2007). Diese Variabilitäten erschweren ein Abschätzen des zukünftigen Sturmgeschehens.

**Tab. 3.4.16 Mittlere Windgeschwindigkeit an Standorten in Sachsen-Anhalt im Zeitraum 1961-1990 und Veränderung unter Annahme eines linearen Trends mit Angabe des Bestimmungsmaßes ( $r^2$ ), dem empirischen T-Wert ( $T_{emp}$ ) und der Sicherheitswahrscheinlichkeit ( $s$ ) für die Signifikanz des Trends**

Standort	Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	Trend 1961 - 1990	$r^2$	$T_{emp}$	$s$ [%]
Brocken	9,27	- 4,6 %	0,0008	5,1867	99,7560
Magdeburg	2,17	- 9,6 %	0,0031	9,6263	99,9999
Halle	2,05	- 9,1 %	0,0108	10,1659	~100

In den letzten zehn Jahren traten in Sachsen-Anhalt nur wenige, allerdings zum Teil sehr schwere Extremereignisse auf, beispielsweise das Orkantief Kyrill. Dessen Front zog am Abend des 18. Januar 2007 vielerorts mit Orkanböen und Starkregen über Deutschland und den Brocken mit Spitzen von 198 km/h hinweg (Müller-Westermeier 2007). Sachsen-Anhalt wies dabei ein Schadholaufkommen von 1,283 Mio. Festmetern auf einer Fläche von 2250 ha mit den Schwerpunktregionen Harz und Fläming auf (Schuffenhauer 2007). Über 90 % davon entfielen auf Nadelholz. Während im Raum Harz fast ausschließlich Fichten geschädigt wurden, verzeichnete der Raum Anhalt, insbesondere der Fläming, größtenteils geschädigte Kiefern (Dammann et al. 2007). Die beobachteten Schäden geben Anlass dazu, die Gefährdung der Wälder in Sachsen-Anhalt genauer zu untersuchen.

Das Ziel einer Windwurfgefährdungsanalyse der Wälder besteht darin, die zahlreichen biologischen, pedologischen und topographischen Einflussfaktoren mit Hilfe von Indikatoren zu systematisieren und komprimieren. In der vorliegenden Analyse wird zunächst zwischen endogenen und exogenen Faktoren unterschieden (Abb. 3.4.47). Zu den endogenen Faktoren zählen die Sensitivität, die sich aus biologischen, topographischen und pedologischen Parametern zusammensetzt sowie die systemeigene Anpassungskapazität. Exogen wirken der Einfluss des Klimawandels sowie forstwirtschaftliche Entscheidungen ökonomischer und ökologischer Natur. Die Sensitivität sowie der Einfluss des Klimawandels können zu einem Index der Windwurfgefährdung zusammengefasst werden.



**Abb. 3.4.47: Wichtige Einflussfaktoren auf die Windwurfgefährdung von Wäldern**

Aufgrund der Datengrundlage war es nicht möglich, einen zusammenfassenden Indikator basierend auf allen Faktoren in Abb. 3.4.47 zu erstellen. Die Analyse beschränkt sich daher auf die Abschätzung der Windwurfgefährdung anhand der Sensitivität (endogene Faktoren) und des möglichen Einwirkens von Sturmereignissen durch Wind (exogener Faktor). Für die Analyse stand keine empirische Sturmschadensfläche mit entsprechenden Daten zur Verfügung, um die Mechanismen der Einflussfaktoren für Sachsen-Anhalt spezifisch abzuleiten. Daher wird die Bewertung der Einflussfaktoren aufgrund einer Metaanalyse von Literatur und Studien zu diesem Thema durchgeführt. Die daraus resultierende Unsicherheit ist bei der Interpretation des Gefährdungsindex zu berücksichtigen.

### 3.4.3.2. Daten und Methodik

Für die Analyse standen Geländedaten, Bodendaten und Waldbestandsinformationen sowie Klimadaten zu den gemessenen und den in den Klimamodellen WETTREG und REMO simulierten Windgeschwindigkeiten zur Verfügung.

Auf der Grundlage des digitalen Geländemodells wurden Geländehöhe, Hangneigung, Exposition, Wölbungsgrad sowie ein Parameter berechnet, der die Horizonteinschränkung gegenüber Westwind beschreibt. Zudem erfolgte eine kartographische Aufbereitung von fünf pedologischen Parametern, welche für die Sensitivität der Wälder als wesentlich erachtet wurden und für die Daten zu Verfügung standen. Sie basieren auf den Bodendaten der Landesanstalt für Geologie und Bergwesen (LAGB): Skelett- und Tongehalt, pH-Wert, bodenkundliche Feuchtestufe (im Frühjahr) und nutzbare Feldkapazität (nFK). Die Werte wurden für das Bodenprofil über alle Horizonte gemittelt. Dann erfolgte eine äquidistante Klassifizierung der einzelnen Sensitivitätsparameter in fünf Klassen, welche die Werte 1-5 bekamen (1=gut, 5=schlecht). Die pedologischen und topographischen Parameter wur-

den zu einem Boden-Relief-Index vereint, der sich aus dem arithmetischen Mittel der zugeordneten Sensitivitätsklassen sämtlicher Parameter berechnet. Diese wurden gleichgewichtet behandelt, da ihre relative Bedeutung für die Sensitivität mit hoher Unsicherheit behaftet ist. Der Boden-Relief-Index ergibt zusammen mit dem Waldtypenindex (nach Risikogruppen klassifizierte Waldtypen) schließlich den Sensitivitätsindex (gleichgewichtete Mittelwertbildung).

Der exogene Faktor Wind wurde umfassend analysiert. Grundlage waren die Tagesmittel der Windgeschwindigkeiten der regionalen Klimamodelle WETTREG und REMO. Es wurde die mittlere Anzahl der Tage im Jahr mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von  $\geq 4$  Bft bzw.  $\geq 6$  Bft<sup>11</sup> ermittelt. Beruhend auf dem Wertebereich des 30-jährigen Durchschnitts, gemittelt für die Forstwuchsgebiete, wurde der Sturmindex berechnet. Dieser wurde mit dem ebenfalls auf Forstwuchsgebietsebene gemittelten Sensitivitätsindex (2:1-Gewichtung von Sensitivitätsindex und Sturmindex) zum Sturmgefährdungsindex verknüpft. Der auf Forstwuchsgebietsebene vorliegende Sturmgefährdungsindex wurde anschließend in fünf äquidistante Klassen eingestuft.

Eine Untersuchung der Tage mit Windgeschwindigkeiten in der Größenordnung von Stürmen ( $\geq 9$  Bft,  $\geq 20,8$  m/s) war nicht möglich. Diese mittleren Windgeschwindigkeiten sind in den Simulationen von REMO gar nicht und in den Simulationen von WETTREG nur auf sehr vereinzelt Stationen (z.B. Brocken) enthalten. Ein auf Stundendaten basierender Datensatz des Modells REMO zu den Spitzenwindgeschwindigkeiten zeigte extreme Unterschätzungen der Windgeschwindigkeiten auf und wäre innerhalb des Projektes seitens der Klimadatenbank CERA auch nicht für den Basiszeitraum und alle drei Szenarien der Sachsen-Anhalt-Studie verfügbar gewesen. Die vorliegende Analyse bezieht sich daher auf die mittlere Windgeschwindigkeit, welche für die Abschätzung von Sturmereignissen als Annäherung herangezogen werden kann.

### 3.4.3.3. Ergebnisse und Diskussion

#### a) Forstliche Einflussfaktoren

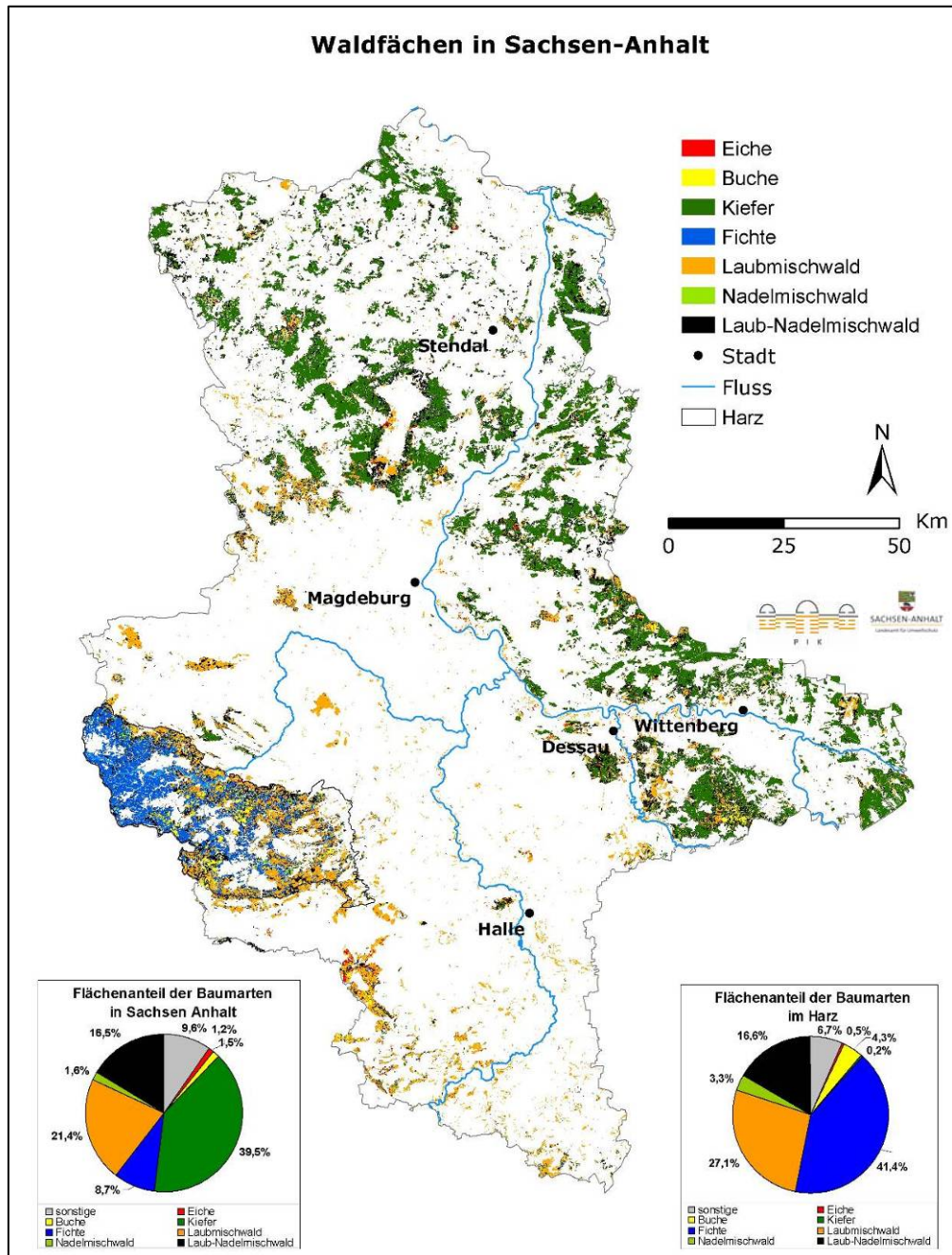
Für die Analyse der Wälder wurde nach den vier wichtigsten Baumarten differenziert (Abb. 3.4.48): Nach den Landbedeckungsdaten Sachsen-Anhalts sind rund 40 % der Waldfläche Kiefernwälder, die sich auf den nördlichen und östlichen Landesteil konzentrieren. Weitere 40 % sind durch Mischbestände charakterisiert, deren Hauptverbreitungsgebiet das Harzvorland ist. Nur ein kleinräumiger, stark auf den Harz konzentrierter Anteil entfällt auf die mit flachen Wurzeln ausgestatteten, schnell- und hochwachsenden und damit stärker gegenüber dem Wind exponierten Fichten (9 %) (Cucchi et al. 2005; Rich et al. 2007). Innerhalb der Harzregion dominieren sie zu 41 %. Im ebenfalls exponierten Gebirgsfußbereich kommen vorwiegend als relativ stabil geltende, winterkahle Laubmischwälder vor (Ruel 1995; Dobbertin 2002).

Auf Grundlage zahlreicher Studien kann bezüglich der Sturmanfälligkeit folgende Rangfolge der Hauptbaumarten definiert werden: Eiche  $\leq$  Buche  $\ll$  Kiefer  $\ll$  Fichte (Aldinger et al. 1996; Gardiner et al. 1999; Ruel 2000; Polonski & Kuhn 2001; Dobbertin et al. 2002; Schulte 2007). Potentiell weniger sensitiv sind Mischwälder (Kropp et al. 2009). In Anbetracht dieser Erkenntnisse werden in der Analyse die Mischwälder wie folgt

<sup>11</sup> Entspricht  $\geq 5,5$  m/s und  $\geq 10,8$  m/s, gemessen in 10 Metern Höhe



eingestuft: Laubmischwald < Laubnadmischwald < Nadelmischwald. Da beinahe die Hälfte aller Wälder in Sachsen-Anhalt aus Monokulturen der anfälligeren Baumarten besteht, kann im Allgemeinen eine relativ hohe Sensitivität der Wälder in Sachsen-Anhalt gegenüber Sturmereignissen angenommen werden.



**Abb. 3.4.48: Waldverbreitung und Flächenanteile der Hauptbaumarten in Sachsen-Anhalt**

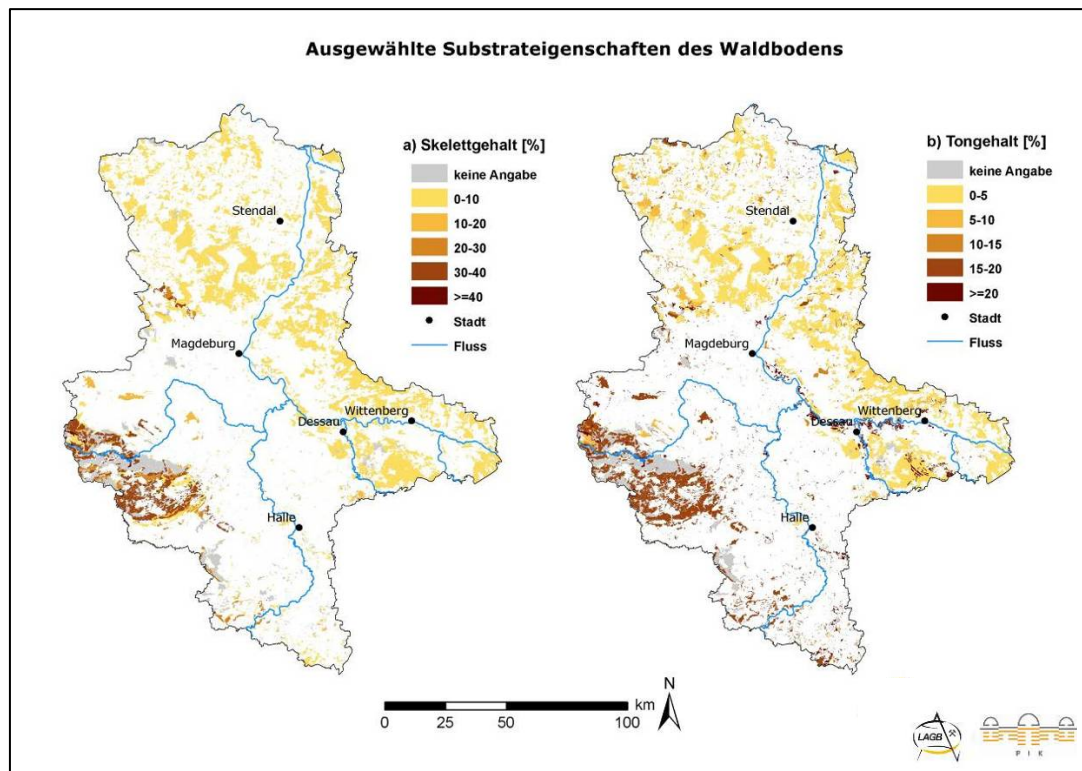
### b) Pedologische Einflussfaktoren

Einen entscheidenden Einfluss auf die Wurzelverankerung hat die Bodenart bzw. der Tongehalt (Ruel 1995; Gardiner et al. 1999). Zahlreiche Studien legen einen Zusammenhang zwischen einer stärkeren Windwurfanfälligkeit und Böden mit einem hohen Tongehalt nahe. Insbesondere bei tiefgründigen tonreichen Böden kann das Wurzelwachstum und die Durchwurzelungstiefe in Abhängigkeit von der Tiefe des anstehenden tonreichen



Horizonts zu Gunsten eines stärkeren Sprosswachstums negativ beeinflusst werden (Aldinger et al. 1996; Polomski & Kuhn 2001). In der vorliegenden Analyse war es jedoch aufgrund der Mittelung des Ton-Gehalts über das gesamte Profil nicht möglich, zwischen sensitivitätsfördernder bzw. sensitivitätslimitierender vertikaler Tonverteilungsmuster zu differenzieren. Die Saidani (2004) und Mitchell et al. (2004; Saidani 2004) zu entnehmende, mit steigendem Tongehalt sinkende Sturmschadenssensitivität wurde vernachlässigt. Stattdessen wurde einem weiteren Effekt eine hohe Bedeutung zugesprochen: feinklastische Böden mit hohem Tongehalt zeigen eine geringe Verschlammungsfestigkeit bei Starkregen (Schmoeckel 2005; Scheffer & Schachtschabel 2008; Schmoeckel & Kottmeier 2008). Dadurch fehlt dem Wurzelwerk ein ausreichender Widerstand, sodass mit steigendem Tongehalt die Sensitivität als zunehmend eingestuft wird. Daher kann ein linearer positiver Zusammenhang zwischen Tongehalt und Windwurfgefährdung angenommen werden. Böden mit vergleichsweise hohen Tongehalten sind in der Harzregion und vor allem in den Buchen- und Laubmischwaldbeständen im Auenlembereich der Elbe verbreitet (Abb. 3.4.49).

Der Skelettgehalt des Bodens ist ebenfalls relevant. Auf Skelett- bzw. Felsböden bilden insbesondere Fichten eher asymmetrische und wenige lange Hauptseitenwurzeln aus, die tief in Felsspalten eindringen und im Vergleich zu feinklastischeren Böden seltener Wurzelfäule aufweisen (Polomski & Kuhn 2001). Ein Grund dafür ist, dass auf für das Baumwachstum günstigeren Böden meist ein geringerer Wurzelraum ausreicht als z.B. auf den relativ ungünstigen skelettreichen Böden (Schulte & Richter 2007). Jedoch ist der Einfluss von Standortbedingungen auf die (effektive) Durchwurzelungstiefe von Baumarten vielfältig, inkl. der Wechselwirkungen untereinander, und wird seit langem untersucht (z.B. Lehnardt & Brechtel 1980), so dass insbesondere lokalspezifisch gegenteilige Erkenntnisse vorliegen können. Mit Stürmen einhergehende Starkniederschlagsereignisse (s. Kap. 3.2.) können zur Bodenvernässung führen, die die Wurzelstabilität der Bäume vermindern kann (Dobbertin 2002; Hanewinkel 2008). Dabei gelten skelettreiche Böden selbst bei Starkniederschlägen als stabil (Moore 2000). Mehrfach erwies sich, dass mit höherem Skelettgehalt die Sturmschadenssensitivität sinkt (Saidani 2004; Mayer et al. 2005; Schmoeckel 2005), sodass diesem Zusammenhang folgend der Skelettanteil in dieser Studie bewertet wurde. Dennoch existieren auch gegenteilige Befunde (Kropp et al. 2009). Die geringsten Skelettanteile (höchsten potenziellen Sensitivitätswerte) treten im Osten Sachsen-Anhalts auf, die höchsten Skelettgehalte (geringste Sensitivität) in der Harzregion (Abb. 3.4.49).

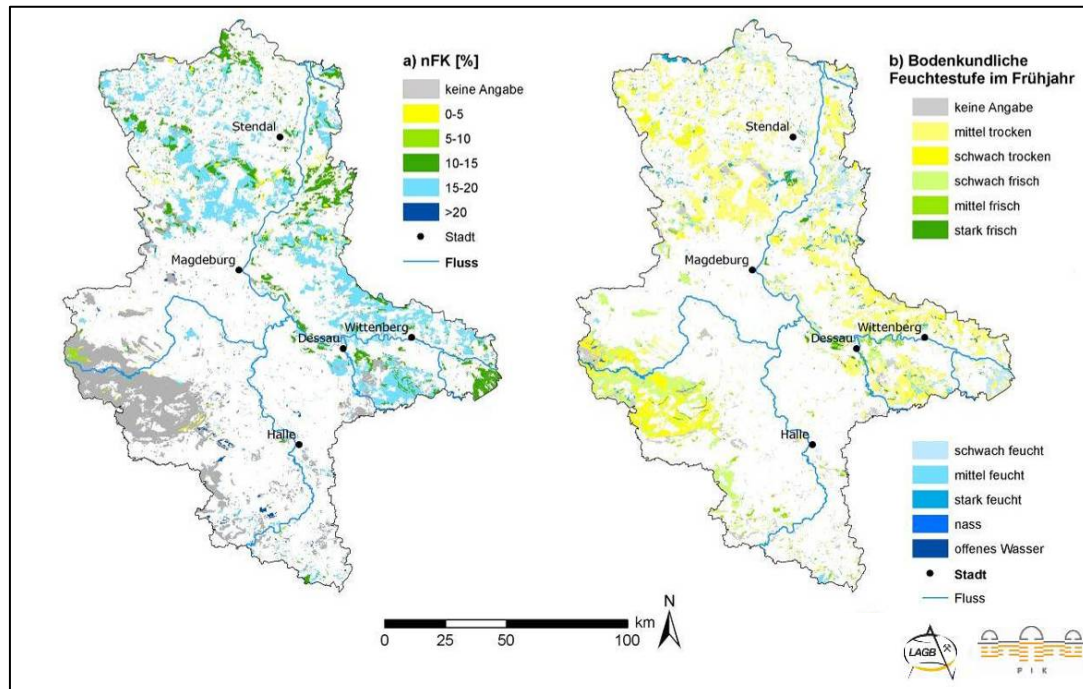


**Abb. 3.4.49: Verteilung der Substrateigenschaften der Waldböden**

Die nutzbare Feldkapazität gibt Aufschluss darüber, wie viel pflanzenverfügbares Wasser entgegen der Schwerkraft im Boden gehalten werden kann. Dementsprechend ist sie indirekt ein Maß darüber, inwiefern der Boden in der Lage ist, z.B. bei Starkregen große Wassermengen aufzunehmen, ohne dass eine für die Wurzelstabilität kritische Übersättigung eintritt. Zudem gibt sie Aufschluss über die Fähigkeit der Böden, auch in Trockenperioden den Bäumen genügend Wasser für ein vitales Wachstum und höhere Sturm-schadensresistenz liefern zu können (Lloret et al. 2004; Scheffer & Schachtschabel 2008). Gegenüber der bodenkundlichen Feuchtestufe im Frühjahr gibt sie also zusätzlich Aufschluss über die potenzielle aktuelle Wassersättigung bei Extremereignissen wie Trockenheit oder Starkregen, die Einfluss auf die Widerstandskraft der Bäume gegenüber Stürmen haben können. Sensitivität und nutzbare Feldkapazität wurden in der Analyse als antiproportional zueinander stehend festgelegt. Niedrige nFK-Werte liegen beispielsweise im Bereich der Eichen-Erlen-Bruchwälder über vermoorten Böden im Tangergebiet und im Drömling vor (Abb. 3.4.50).

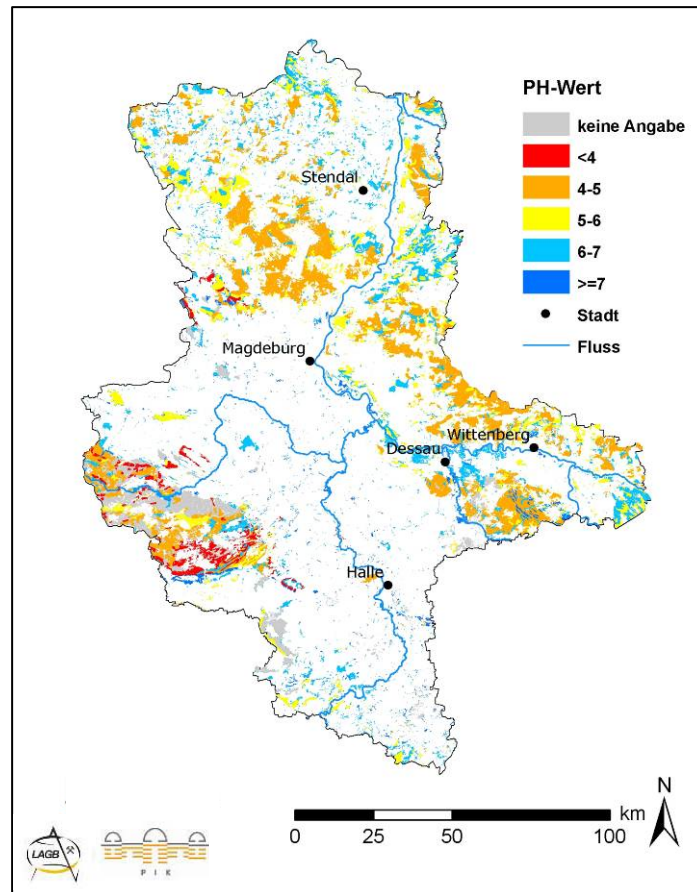
Der bodenkundlichen Feuchtestufe können Aussagen entnommen werden, die den langfristigen Einfluss auf das Wurzelwachstum betreffen. So gelten wechselfeuchte und vernässende grund- und stauwasserbeeinflusste Standorte (Pseudogley-Braunerde, Pseudogley, Stagnogley, Gley, Moor) in hohem Maße als sturmschadensgefährdet, weil sie tendenziell nur die Ausbildung flacher Wurzeln zulassen (Aldinger et al. 1996; Polomski & Kuhn 2001; Dobbartin 2002; Schulte 2007; Hanewinkel 2008). Allerdings können auch die in Sachsen-Anhalt weit verbreiteten trockenen Standorte als sensitiv angesehen werden (Schmoeckel & Kottmeier 2008; Kropp et al. 2009). In Anbetracht dessen wurden mittel-frische und stark frische Standorte als sehr gering sensitiv klassifiziert und den Extrema ‚nass‘ und ‚trocken‘ hohe Sensitivitätsklassen zugewiesen. Besonders hohe Boden-

feuchtwerte zeigen Fichtenstandorte rund um den Brocken (z.B. Drei Annen), Erlenbruchwälder nördlich von Salzwedel, die Kiefernbestände rund um Tangerhütte (südlich von Stendal) oder stellenweise Kiefernbestände auf Niedermooren an den Westhängen des exponierten Fläming (Abb. 3.4.50).



**Abb. 3.4.50: Hydrologische Eigenschaften des Waldbodens**

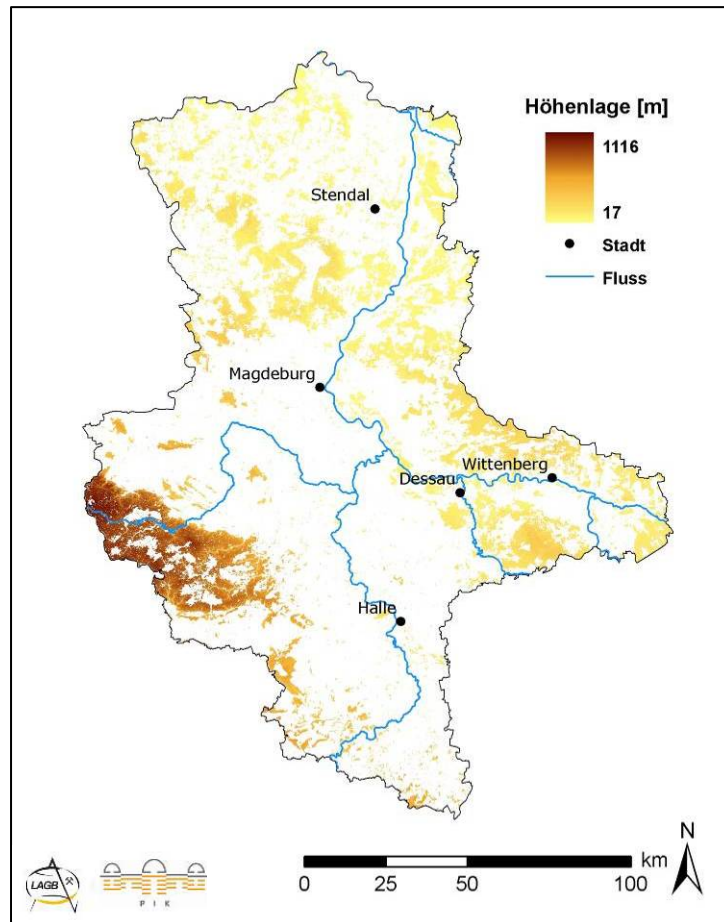
Der Einfluss des pH-Wertes des Bodens auf die Wurzelbeschaffenheit und somit auf die Verankerung des Baumes ist schwer einzuschätzen (Ullrich 1986; Polomski & Kuhn 2001; Mayer et al. 2004; Mayer et al. 2005). Es wird angenommen, dass mit zunehmenden Säuregehalt im Allgemeinen das Nährstoffangebot und die Wurzelverankerung verringert und somit die Sensitivität gegenüber Sturmschäden erhöht wird (Godbold et al. 2003; Mayer et al. 2004). Die Verteilung des pH-Wertes der Böden in Sachsen-Anhalt zeigt ein äußerst differenziertes, kleinräumiges Muster (Abb. 3.4.51). Saure Böden liegen weitläufig im Bereich der Ostharzdecke (Braunerde aus Lösschutt, Fichtenmonokulturen), der Mischwälder der nördlichen Harzkante, sowie den Kiefernbeständen nördlich von Blankenburg sowie der Kiefernforste im Ohre-Aller-Hügelland vor.



**Abb. 3.4.51: Verteilung der pH-Werte der Waldböden**

### c) Topographische Einflussfaktoren

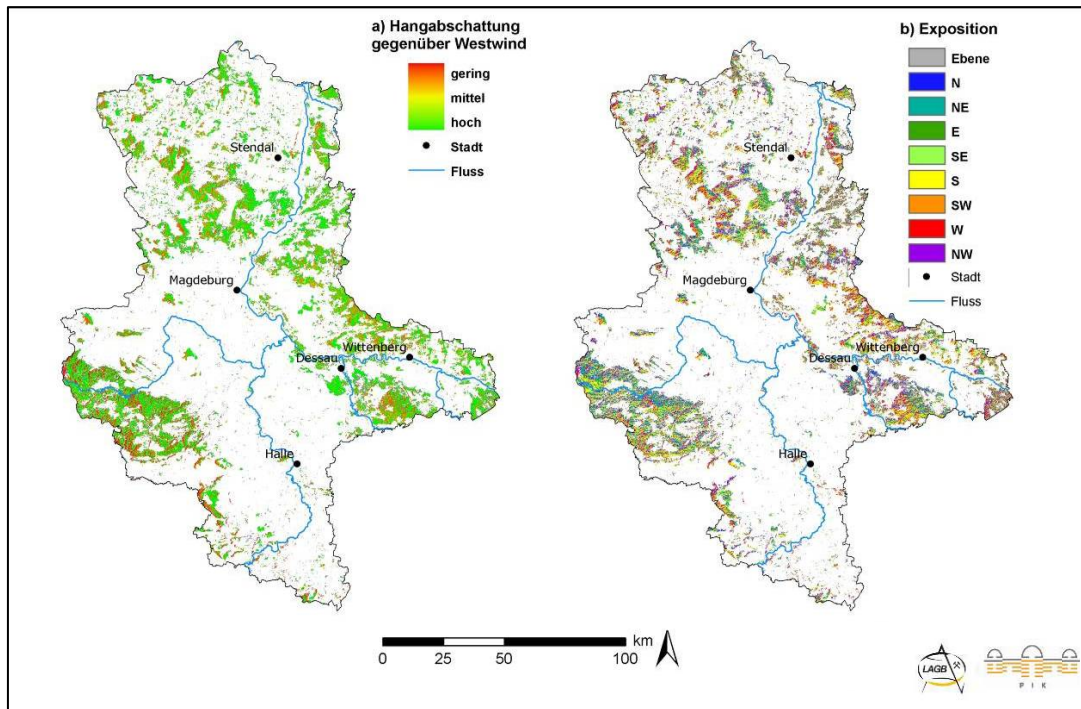
Schwierig ist die Einschätzung der Wirkung des Reliefs. Zwar nimmt im Allgemeinen mit zunehmender Geländehöhe die Sturmschadenssensitivität aufgrund steigender Windgeschwindigkeiten zu (Talkkari et al. 2000; Ruel et al. 2002; Hanewinkel 2008), jedoch kann die Modifikation des Windfeldes durch die lokale Orographie und die Auswirkung auf die Exposition der Wälder variabel sein (Mayer et al. 2005). Einige Studien zeigen keinen direkten Zusammenhang zwischen der Höhenlage und aufgetretenen Sturmschäden, was unter Umständen durch besondere meteorologische bzw. topographische Besonderheiten zu erklären ist (Dobbertin et al. 2002; Mitchell & Lanquaye-Opoku 2004; Saidani 2004). Einen Überblick über die Höhenverteilung der Waldflächen in Sachsen-Anhalt liefert Abb. 3.4.52.



**Abb. 3.4.52: Höhenlage der Waldflächen**

Die Exposition ist ein weiterer Einflussfaktor für die Sensitivität der Wälder gegenüber Windwurf (Schmidtke & Scherrer 1997). Zahlreiche Studien zeigen hohe Windwurfschäden bei Exposition in (zumeist westlicher) Sturmrichtung (Foster & Boose 1992; Mayer et al. 2004; Mitchell & Lanquaye-Opoku 2004; Mayer et al. 2005; Schmoeckel 2005). Deshalb wurde eine sinkende Sensitivität mit zunehmend von der Westausrichtung abweichender Exposition (mit der geringsten Sensitivität an Osthängen) angenommen. In Abb. 3.4.53 ist eine Konzentration westexponierter Hänge vor allem im Bereich Fläming, Altmark und Unterharz zu erkennen, die jedoch zum Teil durch die Kulissenwirkung westlich vorgelagerter Höhenzüge geschützt sind. Die Hangabschattung verdeutlicht besonders sensitive Hänge, die eine nur geringe Horizonteinschränkung in westlicher Richtung aufweisen. Je höher die Hangabschattung ist, desto niedriger kann die Sensitivität eingestuft werden.





**Abb. 3.4.53: Hangabschattung gegenüber Westwind (a) und Exposition der Waldflächen (b)**

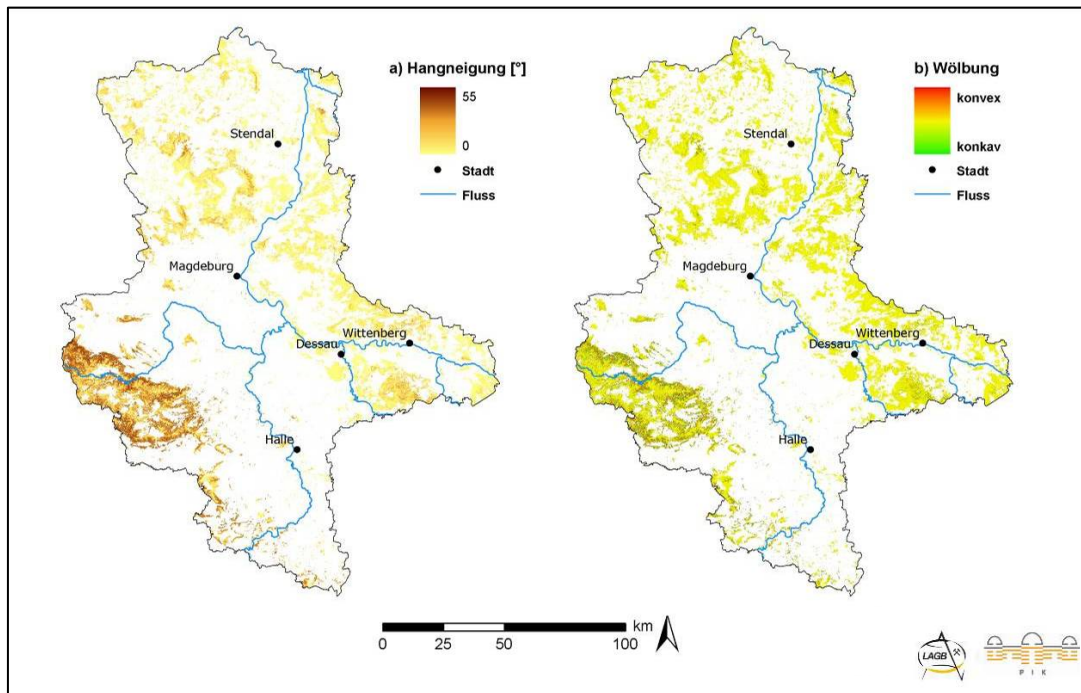
Ebenfalls von Relevanz ist die Hangneigung, die einigen Studien zur Folge positiv mit der Windwurfgefährdung aufgrund zunehmend flachgründiger werdender Böden korreliert (Schmidtke & Scherrer 1997; Kropp et al. 2006). Andere Studien zeigen besonders hohe Sturmschäden auf mittleren bis geringen Hangneigungen (Dobbertin et al. 2002; Mayer et al. 2004; Mitchell & Lanquaye-Opoku 2004; Saidani 2004; Schmoeckel & Kottmeier 2008; Kropp et al. 2009). Letzteres hängt beispielsweise damit zusammen, dass bei mit Stürmen häufig einhergehenden Starkniederschlägen (Müller-Westermeier 2007) aufgrund des an flachen Hängen geringeren Abflusses je nach Substrat die Verschlammungsgefahr des Bodens erhöht ist (Mayer et al. 2004). Zudem kommen Hangneigungen dieser Größenklasse häufig im exponierten Oberhangbereich vieler Täler wie z.B. im Harz vor (Schmoeckel & Kottmeier 2008), (Abb. 3.4.54). Unter dieser Annahme erfolgte die Sensitivitätsklassifizierung<sup>12</sup>.

Ein über die Hangneigung hinausgehender Parameter ist die Geländewölbung (Abb. 3.4.54). Konvexe Vollformen induzieren verglichen mit anderen Reliefelementen die höchsten lokalen Windgeschwindigkeiten (Schmidtke & Scherrer 1997). Insbesondere Sättel, Hochplateaus und Bergkuppen des Harzes mit einer geringen Hangabschattung (Abb. 3.4.53) sind daher sehr sensitiv gegenüber Windwurf. Im Lee von Bergketten können zusätzlich Turbulenzen auftreten (Ruel 1995), in schmalen Tälern sind Düseneffekte zu beachten (Schmidtke & Scherrer 1997; Schmoeckel & Kottmeier 2008). Beispielsweise sind die Täler Krummschlachtbach, Haselbach, Thyra und Rappbode in Sachsen-Anhalt davon betroffen. Die nach Nordosten exponierten Täler des Harzes liegen dagegen geschützt, ebenso wie die in Abb. 3.4.54 grün gekennzeichneten konkaven Hohlformen

<sup>12</sup> Bis 15° Hangneigung steigende, zwischen 15° und 30° sinkende und ab 30° wieder steigende Sensitivität; Klasse der höchsten Sensitivität: 9° bis 15° Hangneigung



(Schmoeckel 2005). Mit zunehmender Wölbung (im positiven und negativen Sinne) wurde eine steigende Sensitivität angenommen.

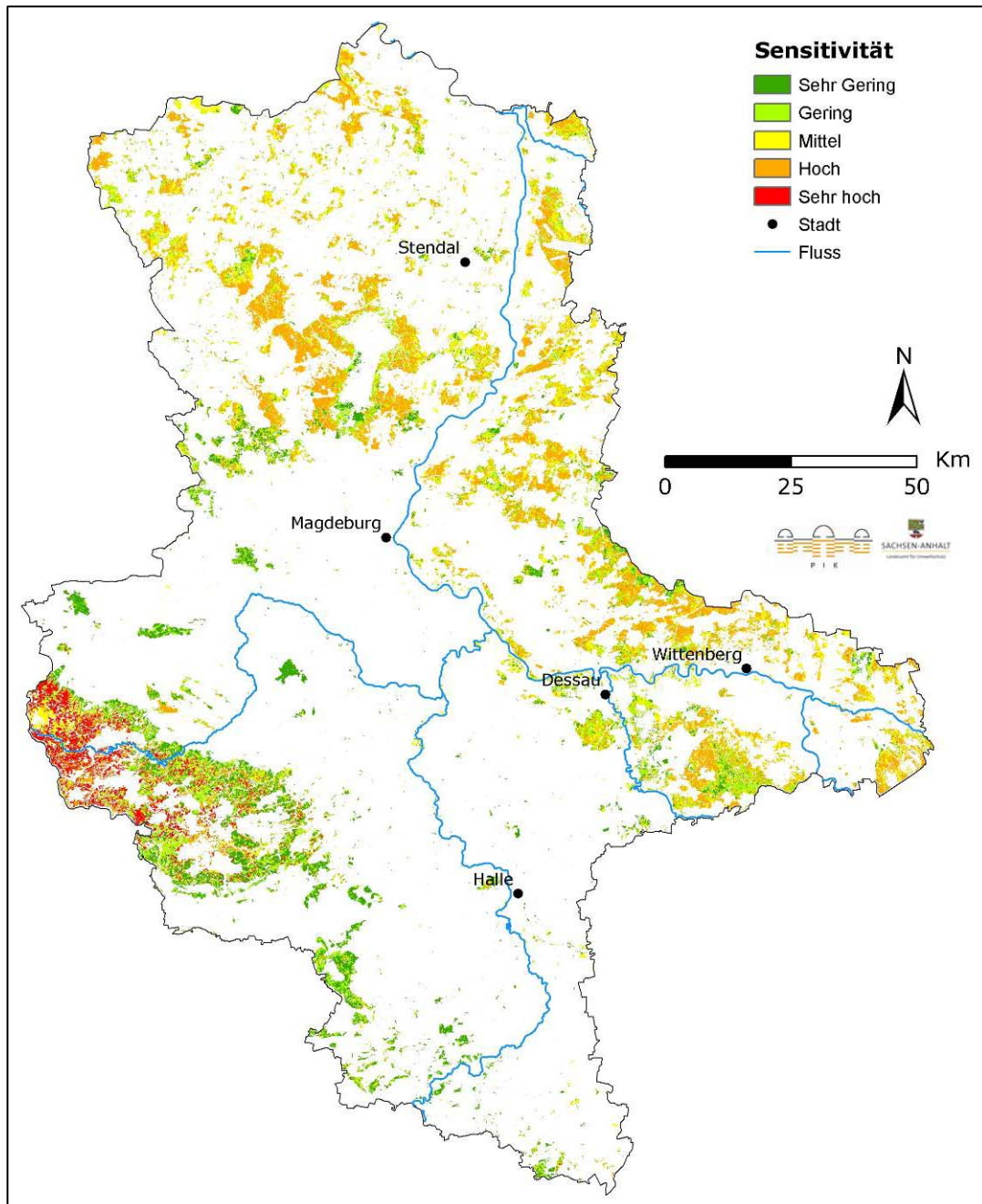


**Abb. 3.4.54: Hangneigung und Wölbung des Waldbodens**

#### d) Sensitivität gegenüber Windschäden

Alle Sensitivitätsparameter auf Grundlage der obigen Diskussion klassifiziert und zusammengefasst, ergeben einen Index der Sensitivität<sup>13</sup> der Wälder Sachsen-Anhalts gegenüber Windschäden (Abb. 3.4.55). Auffällig ist die starke räumliche Differenzierung der Sensitivitätsklassen. Während der Oberharz weiträumig eine sehr hohe Sensitivität aufweist, sind die Randbereiche im Unterharz sowie das nördliche und östliche Harzvorland durch sehr geringe Sensitivitätsstufen charakterisiert. Im Nord- und Ostteil von Sachsen-Anhalt dominieren mittlere Sensitivitätsstufen, die lokal durch geringe Klassen unterbrochen werden.

<sup>13</sup> Der Sensitivitätsindex ergibt sich aus Höhenlagen, Hangneigung, Exposition, Wölbung, Hangabschattung, Ton- und Skelettgehalt, pH-Wert, bodenkundlicher Feuchtestufe, nutzbarer Feldkapazität sowie der Baumart bzw. dem Mischwaldtyp.



**Abb. 3.4.55: Potentielle Sensitivität der Wälder in Sachsen-Anhalt gegenüber Sturm-schäden**

#### e) Klimatische Einflüsse

Die Faktoren der Sensitivität ergänzend hat der externe Faktor Klima Einfluss auf die Windwurfgefährdung der Wälder. Im Folgenden werden wesentliche Ergebnisse der mittleren Windgeschwindigkeiten der beiden Klimamodelle WETTREG und REMO vorgestellt, interpretiert und bewertet.

Die mit dem regionalen Klimamodell WETTREG simulierten Daten der mittleren Windgeschwindigkeit mit täglicher Auflösung wurden anhand der Standorte Magdeburg, Halle und dem Brocken mit beobachteten Daten des DWD für den Referenzzeitraum

1961-1990 validiert<sup>14</sup>. Es zeigten sich signifikante (Sicherheitswahrscheinlichkeit >99,99%) Abweichungen. Die Daten des Modells WETTREG unterschätzen die Windgeschwindigkeit um 3 bis 8 % (Tab. 3.4.17). Eine andere Studie zeigte für das Modell WETTREG eine ähnliche Unterschätzung der Windgeschwindigkeit im Harz von ca. 0,2m/s auf (Spekat et al. 2007). Starke Abweichungen<sup>15</sup> zeigten Vergleiche des Modells REMO mit Messdaten von 1979-1993 (Walter et al. 2006).

**Tab. 3.4.17: Vergleich der mit WETTREG simulierten mittleren Windgeschwindigkeit im Zeitraum von 1961-1990 mit gemessenen Daten (prozentuale Abweichung, Bestimmungsmaß  $r^2$ , Sicherheitswahrscheinlichkeit  $s$  der Signifikanz der Abweichung)**

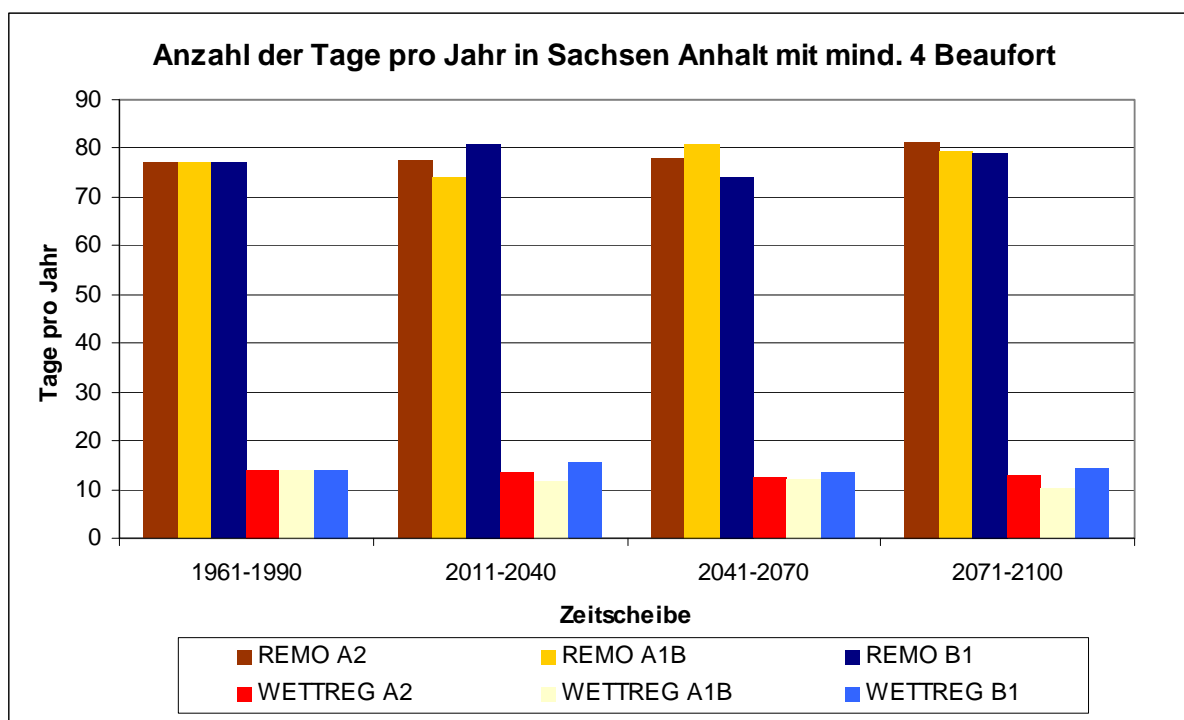
Ort	Windgeschwindigkeit [m/s]		Validierungsergebnisse		
	WETTREG	Beobachtung	Abweichung [%]	$r^2$	$s$ [%]
Brocken	9,00	9,27	- 2,9	0,0008	99,9996
Magdeburg	2,03	2,17	- 6,5	0,0031	~100
Halle	1,89	2,05	- 7,8	0,0108	~100

Die Veränderung der simulierten Anzahl der Tage mit mittleren Windstärken von  $\geq 4$  Bft bzw.  $\geq 6$  Bft zeigt für Sachsen-Anhalt je Szenario und betrachtetem Zeitraum eine sehr unterschiedliche Tendenz. Beide Klimamodelle liefern zudem nur wenig konsistente Aussagen. Nach dem Modell REMO zeigt sich (mit Ausnahme des Szenarios B1 für  $\geq 4$  Bft) ein Anstieg der Tage mit einer Windstärke von  $\geq 4$  Bft bzw.  $\geq 6$  Bft. Nach dem Modell WETTREG dagegen könnten diese Tage abnehmen, mit Ausnahme der Szenarien B1 und A2 für die Windstärken  $\geq 6$  Bft. Der Vergleich der Absolutbeträge macht die Unterschiede zwischen beiden Modellen deutlich (Abb. 3.4.56 und Abb. 3.4.57). Dies ist vermutlich auf grundsätzliche Unterschiede beider Modelle hinsichtlich ihrer Herangehensweise zurückzuführen (s. Kap. 2).

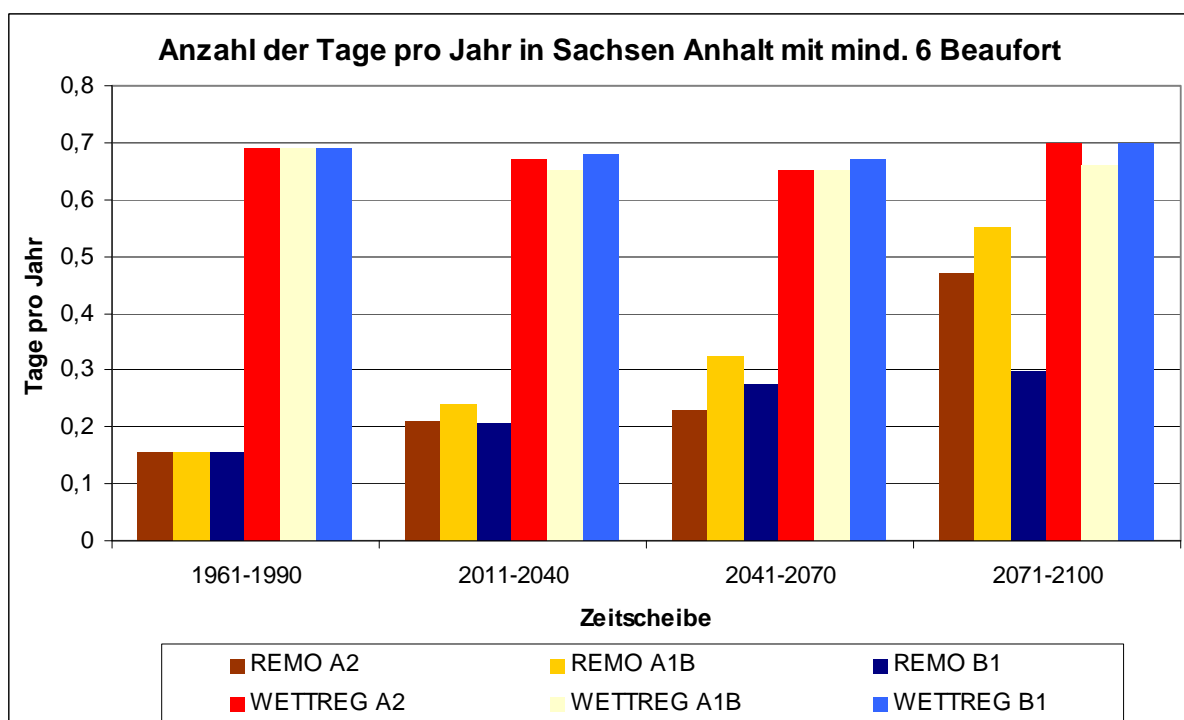
Eine Untersuchung der Signifikanz (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\leq 5$  %) des Trends für das 21. Jahrhundert der mit dem Modell WETTREG simulierten Werten zeigt keine signifikante Verringerung der Anzahl an Tagen mit einer Windgeschwindigkeit von  $\geq 6$  Bft und  $\geq 4$  Bft. Nach dem Modell REMO nehmen die Tage mit  $\geq 6$  Bft nur unter Szenario A1B und B1 signifikant zu.

<sup>14</sup> Eine Validierung der REMO-Daten wurde aufgrund des Raster-basierten Ansatzes des Klimamodells nicht vorgenommen

<sup>15</sup> Unterschätzung der mittleren Windgeschwindigkeit um bis zu 2,5m/s im Oberharz



**Abb. 3.4.56:** Anzahl der Tage pro Jahr, an denen im Tagesmittel und gemittelt über Sachsen-Anhalt und über 30 Jahre eine Windgeschwindigkeit von  $\geq 4$  Bft auftritt



**Abb. 3.4.57:** Anzahl der Tage pro Jahr, an denen im Tagesmittel und gemittelt über Sachsen-Anhalt für einen Zeitraum von 30 Jahren eine Windgeschwindigkeit von  $\geq 6$  Bft auftritt

**f) Potenzielle Windwurfgefährdung**

Das gewichtete Mittel<sup>16</sup> von Sensitivitäts- und Sturmindex ergibt die potenzielle Windwurfgefährdung, welche auf Ebene der Forstwuchsgebiete angegeben wird (Tab. 3.4.18). Die nach dem Modell REMO im Vergleich zum Modell WETTREG höheren modellierten mittleren Windgeschwindigkeiten spiegeln sich deutlich in den höheren Klassen der potenziellen Windwurfgefährdung wieder. Ein Vergleich der Forstwuchsgebiete, die nach beiden Klimamodellen eine hohe Gefährdungsklasse aufweisen, zeigt eine relativ hohe räumliche Konsistenz beider Modelle. Lediglich im nordwestlichen Harzvorland sowie den im Süden Sachsen-Anhalts gelegenen Forstwuchsbezirken divergieren beide Modelle in den räumlichen Verteilungsmustern der Werte deutlich. Werden die Gefährdungsklassen eines Forstbezirks anhand der Szenarien innerhalb einer Zeitscheibe und eines Klimamodells verglichen, so zeigen sich nur geringfügige Unterschiede. Treten bei gleichem Szenario in einem Forstwuchsgebiet Klassenwechsel im Laufe des 21. Jahrhunderts auf, dann sinkt (steigt) die Gefährdungsklasse tendenziell bei den auf WETTREG (REMO) basierenden Daten.

Gebiete mit hoher Sensitivität decken sich vielfach mit den Regionen, die viele Tage mit modellierte Windgeschwindigkeiten  $\geq 5,5\text{m/s}$  aufweisen (vgl. Anhang zu Kap. 3.2., mittlere Windgeschwindigkeit nach dem Modell WETTREG). Durch eine mittlere (nach dem Modell WETTREG) bzw. hohe bis sehr hohe (nach Modell REMO) potenzielle Windwurfgefährdung ist beispielsweise das Westprignitz-Altmarkische Altmoränenland, das Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland, der Hohe Fläming und der Harz charakterisiert. Forstwuchsgebiete mit mittlerer (nach Modell REMO) bzw. geringer bis sehr geringer (nach dem Modell WETTREG) Gefährdung sind beispielsweise die sachsen-anhaltische Lößebene, die Nordöstlichen Harzvorländer oder das Nordthüringische Trias-Hügelland.

---

<sup>16</sup> Gewichtung 2:1

**Tab. 3.4.18: Potenzielle Windwurfgefährdung der Forstwuchsgebiete Sachsen-Anhalts**  
**(1=sehr gering, 2=gering, 3=mittel, 4=hoch, 5=Sehr hoch)**

Forstwuchsgebiete	Potenzielle Windwurfgefährdung																			
	1961-1990		2011-2040						2041-2070						2071-2100					
	REMO	WETTREG	REMO			WETTREG			REMO			WETTREG			REMO			WETTREG		
	BASZ	BASZ	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
Westprignitz-Altmarkisches Altmoränenland	5	3	5	5	5	3	3	3	5	5	5	3	3	3	5	5	5	3	3	3
Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland	5	3	5	5	5	3	3	3	5	5	5	3	3	3	5	5	5	3	2	3
Mittleres nordostdeutsches Altmoränenland	4	2	5	4	4	2	2	2	4	5	5	2	2	2	5	5	5	2	2	2
Nordwestliches Harzvorland	4	1	4	4	4	1	1	1	4	4	4	1	1	1	4	4	4	1	1	1
Sachsen Anhaltinische Lößebene	3	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1
Hoher Fläming	5	3	5	5	5	3	2	3	5	5	5	3	2	2	5	5	5	3	2	2
Nordöstliche Harzvorländer	3	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1
Harz	4	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	3	3	3	4	4	5	3	3	3
Düben-Niederlausitzer Altmoränenland	4	2	4	4	4	2	2	2	4	4	4	2	2	2	4	4	4	2	2	2
Leipziger Sandlöß-Ebene	3	2	3	3	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2
Nordthüringisches Trias- Hügelland	3	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1
Sächsisch-Thüringisches Löß-Hügelland	4	1	4	3	4	1	1	1	3	4	4	1	1	1	4	4	4	1	1	1
Thüringer Becken	3	1	4	3	3	1	1	1	3	4	3	1	1	1	4	4	4	1	1	1
Ostthüringisches Trias-Hügelland	3	1	4	3	4	1	1	1	3	4	3	1	1	1	4	4	4	1	1	1



### 3.4.3.4. Schlussfolgerungen

Die aufgezeigten forstlichen, pedologischen und orographischen Sensitivitätsfaktoren ermöglichen einen ersten Überblick über potenziell windwurfgefährdete Regionen Sachsen-Anhalts. Allerdings sollten die vorgestellten Parameter nicht isoliert betrachtet, sondern stets im Verbund mit anderen Einflussfaktoren interpretiert werden. Deren Wechselwirkungen sind nur schwer zu erschließen (Ruel 1995) und werden teilweise kontrovers diskutiert. Insofern sind die unter Annahme der diskutierten Wirkungsmechanismen erstellten Karten zur Sensitivität auf Bestandsebene sowie zur potenziellen Windwurfgefährdung für die Forstwuchsgebiete mit Unsicherheiten verbunden. Die Windwurfgefährdung ist zudem mit Unsicherheiten aufgrund der zugrunde liegenden Daten der Klimamodelle behaftet. Den relativ guten Übereinstimmungen der beiden verwendeten Klimamodelle im nördlichen und östlichen Tieflandbereich stehen große Unterschiede in der Harz-Region und im südlichen Sachsen-Anhalt gegenüber. Nicht zuletzt liegt das Klimasignal des Modells WETTREG etwa in der Größenordnung des Modellfehlers, was dessen Aussagekraft beeinträchtigt (Spekat et al. 2007). Die Modelle WETTREG und REMO sind zudem bezüglich ihrer Skalenniveaus sowie der modellierten zukünftigen Veränderung des Windklimas verschieden, was die Vergleichbarkeit beider Modelle auf lokaler Basis erschwert. Dennoch geben sie erste Anhaltspunkte zur Einschätzung der Windwurfgefährdung in Sachsen-Anhalt, die trotz der in der Vergangenheit beobachteten abnehmenden Windgeschwindigkeiten nicht unterschätzt werden sollte.

### 3.4.4. Anpassungsoptionen

Die in Box 3.4.2 angeführten Anpassungsempfehlungen bieten eine Anregung für vertiefende (modellgestützte) Untersuchungen, die nach Erarbeitung der Strategien durch das Land Sachsen-Anhalt erfolgen sollte. Zu ähnlichen Empfehlungen und Aussagen über Forschungsbedarf kommt auch der aktuelle „Entwurf der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel“ (MLU 2009). Des Weiteren werden in (Eastaugh et al. 2009) allgemeine Anpassungsoptionen der deutschen Forstwirtschaft vorgestellt und diskutiert sowie die besondere Stellung einer nachhaltigen Waldwirtschaft im Rahmen von Anpassungsstrategien erörtert. In dem vorläufigen Abschlußbericht des MLU-Projektes der NW-FVA: „Risiken und Anpassungsstrategien für Wälder als Folge der prognostizierten Klimaveränderung“ werden Anpassungsmaßnahmen vorgeschlagen, die unter Berücksichtigung der in dieser Studie dargestellten Risiken bzw. Potenziale geprüft werden könnten. Die Gestaltung einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder und ihre Anpassung an den Klimawandel wird international intensiv diskutiert und dabei insbesondere die Fragen der Erhaltung der ökosystemaren Funktionen und der Produktivität der Wälder in den Mittelpunkt gestellt. Eine Reihe von zu berücksichtigenden Optionen sind in einem aktuellen IUFRO - Report „Adaptation of Forests and People to Climate Change“ (Seppälä et al. 2009) und in einem Bericht an die European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development dargestellt (Lindner et al. 2008).

Bei den in Box 3.4.2 genannten Vorschlägen ist zu bedenken, dass keine Universallösungen existieren, sondern nur individuell an die lokalen Gegebenheiten angepasste Anpassungsmaßnahmen. Ein Problem bei der großräumigen Umsetzung der Anpassungsempfehlungen besteht darin, dass sich 40 % der Waldfläche Sachsen-Anhalts in Privatbesitz

befinden (MLU 2007). Hier ist eine gute Kommunikation und Kooperation essentiell. Zur Verbesserung der Durchführung, Kontrolle und Bewertung der Anpassungsempfehlungen müssen regionale und betriebliche Waldbaurichtlinien überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Zusammen mit der Planung und Bereitstellung finanzieller Mittel für Anpassungsleistungen sowie der Verbesserung von Information und Schulung aller mit dem Forst in Kontakt stehenden Personen kann ein Anpassungspaket entstehen, das den Umgang mit den zukünftig auf die Wälder Sachsen-Anhalts zukommenden Sturmgefahren erleichtern sollte.

*Box 3.4.2: Anpassungsempfehlungen zur Forstwirtschaft*

Zentrale Problempunkte im Sektor Forstwirtschaft sind das Auftreten von Trockenstress, einer erhöhten Waldbrandgefahr und Extremereignissen wie Stürmen. Diese können Bestände für Schädlingsbefall prädisponieren. Anpassungsoptionen bestehen daher aus einem Portofolio von Maßnahmen, die vor allem auf eine angepasste Bewirtschaftung abzielen. Sinnvoll erscheinen:

**Maßnahmen zur Bestandsverjüngung und Baumartenzusammensetzung**

- **Diversifizierung** der Baumartenzusammensetzung und damit Risikostreuung durch Baumartenmischungen
- **Umbau** von Nadelholzreinbeständen mit Laubbäumen aufgrund von Schädlingsbefall, Waldbrandgefahr (nur Kiefer) und verminderter Grundwasserneubildung
- Auswahl **standortgeeigneter Baumarten und Herkünfte** unter heutigen und potentiellen zukünftigen klimatischen Bedingungen

**Maßnahmen der angepassten Bewirtschaftung**

- Stetige **Kontrolle** der Durchforstungsstrategien
- **nachhaltige Eingriffe**, die Bestände nicht destabilisieren und anfällig für biotische und abiotische Schäden machen (Spiecker 2003)
- Verlagerung der Verjüngungsmaßnahmen vom Frühjahr in niederschlagsreichere Jahreszeiten
- Ausnutzung des **Zuwachspotentials** zur Minderung der Treibhausgasemissionen ohne das Waldökosystem massiv zu beeinträchtigen

**Maßnahmen zur Minderung der Gefahr durch Windwurf**

- Durchforstungen, die auf stabile Einzelbäume abzielen (Rottmann 1986; Kellomäki & Leinonen 2005)
- **verringerte Umtriebszeiten** um die Vulnerabilität störungsanfälligerer Bestände zu verringern (Ruel 1995; Kellomäki & Leinonen 2005; Glode 2007; Seppälä et al. 2009)
- **Struktur und Exposition** der Bestände sollte sich an Windverhältnissen orientieren (Dobbertin et al. 2002; Leder 2007)
- **Bodenmelorationsmaßnahmen**, die die Wurzelstruktur und Nährstoffversorgung der Bäume fördern (Ullrich 1986)
- **Verringerung der Folgeschäden von Sturmwürfen**, die sich durch Schädlingsbefall ergeben, durch schonende (krangestützte) Schadholzbeseitigungsmethoden (Fischer 2003)

### 3.4.5. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf

In Verbindung mit den zu erwartenden klimatischen Veränderungen sind folgende Aspekte vertiefend zu untersuchen, da sie in enger Wechselwirkung mit den hier diskutierten Wirkungen stehen:

- Die Auswirkungen von abiotischen Extremereignissen wie Sturm, Starkniederschlägen, Nassschnee und Dürreperioden.
- Da die Waldbrandgefahr stark von anthropogenen Faktoren abhängt, könnte eine weitergehende Analyse nicht-klimatischer Einflussfaktoren (Tourismusgebiete etc.) das Waldbrandrisiko genauer beschreiben.
- Die Analyse biotischer Extremereignisse, hier vor allem durch Schaderreger verursacht (Einwanderung neuer Schaderreger, Auftreten von Gradationen vorhandener Schaderreger).
- Die ökophysiologischen Auswirkungen steigender atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf die Produktivität von Wäldern unter Berücksichtigung der Fruchtbarkeit des Standortes sowie Alter und Baumart (Oren et al. 2001; Körner et al. 2005; Norby et al. 2005)

Als Instrumente werden dafür vor allem modellgestützte Experimente mit Extremwert-szenarien und die Nutzung von Schaderregermodellen empfohlen (siehe Abschlussbericht des Projektes „Risiken und Anpassungsstrategien für Wälder als Folge der prognostizierten Klimaveränderung in Sachsen-Anhalt“, Oktober 2009, NW-FVA).

Weitere Gefährdungen, die sich klimabedingt verstärken können, sind:

Generell ist in Wäldern der temperierten Zone bei wärmeren und trockeneren Bedingungen mit größeren Gefährdungen durch Insekten und pilzliche Pathogene zu rechnen (Lindner et al. 2008; Seppälä et al. 2009). Diese Gefährdungen können jedoch räumlich sehr unterschiedlich sein und hängen unter anderem vom Klima, standörtlichen Gegebenheiten, Bewirtschaftungsstrategien und dem Zusammenspiel dieser Faktoren ab.

Einer der wichtigsten pathogenen Pilze, *Heterobasidion annosum*, infiziert bislang unbeefallenen Beständen über frischen Stubben (Primärbefall) und verbreitet sich über Wurzelfusionen weiter (Sekundärbefall) (Woodward et al. 1998; Schütt et al. 2002). Da Bestände im Hochgebirge mit steigenden Höhenmetern weniger gefährdet sind und eine höhere Anfälligkeit trockenerer und wärmerer Lagen beschrieben wird (Woodward et al. 1998; Schütt et al. 2002), ist unter zukünftigen wärmeren Temperaturen mit einer größeren Gefährdung und einer Vergrößerung des potentiellen Befallsgebietes zu rechnen. Dennoch ist das Auftreten großer und häufiger Schäden an bestimmte Standorte (kalkreiche, dichtgelagerte, wechselfeuchte alkalische und neutrale Böden) und Baumarten (vor allem Nadelhölzer, insbesondere Fichte) gebunden und daher nicht primär vom Klima abhängig (Schütt et al. 2002; Heydeck 2007). Ebenso können überaus trockene Bedingungen auch eine Infektion erschweren (Woodward et al. 1998). Eine genaue Aussage über eine zukünftige Erhöhung der Gefährdung ist deswegen nicht möglich und müsste im Zusammenhang mit möglichen prophylaktischen Anpassungsoptionen und sich ergebenden Wechselwirkungen (Beimischung von Laubhölzern um Wurzelkontakte befallener und gesunder Nadelholzindividuen einer Art zu verhindern oder Durchführung von Durchforschungen bei Schneedecke bzw. Temperaturen unter 0°C (Heydeck 2007) analysiert werden.

Auf Grund von sich durch den Klimawandel ändernden Standortbedingungen zeichnet sich eine Verschiebung der Abundanz zu Gunsten von Wärme liebenden Schädlingen ab (Wulf 2008). Der Buchdrucker (*Ips typographus*) zählt zu den bedeutendsten Forstschädlingen und kann unter günstigen thermalen Voraussetzungen mehrere Generationen pro Jahr ausbilden. Der Buchdrucker befällt in der Regel Fichten im Baumholzalter (Baumalter >60 Jahre), wobei bei geringer Populationsdichte vorrangig physiologisch geschwächte Bäume bzw. Windwurf- oder Schneebruchholz befallen wird. Bei hoher Dichte kann der Buchdrucker durch massiven Anflug die Abwehrmechanismen stehender, vital erscheinender Fichten überwinden und zu großflächigem Absterben von Waldbeständen führen (Kromp-Kolb 2003). Sturmschäden und Schneebruchereignisse waren in der Vergangenheit (durch den vermehrten Anfall von bruttauglichem Material) Ausgangspunkte von Massenvermehrungen des Buchdruckers in den Folgejahren. In Sachsen-Anhalt ist der Schadholzanfall durch Buchdruckerbefall seit 2000 stetig gestiegen ([http://www.forstschutzstelle.de/PDF/Statistik\\_Waldschaeden.pdf](http://www.forstschutzstelle.de/PDF/Statistik_Waldschaeden.pdf)), eine mögliche Folge des Sturmereignisses „Lothar“ (1999) und „Kyrill“ (2007) und des trockenen und heißen Sommers 2003. Für Schadinsekten wie den *Ips typographus* besteht daher die Gefahr von Massenvermehrungen im Zusammenhang mit Extremereignissen (Sturm, Trockenheit) und Beständen anfälligen Alters, Exposition, Nährstoffversorgung und Struktur (Wermelinger 2004). Für die Fichtenreinbestände im Harz auf Standorten, die diesem Risikoprofil entsprechen, bedeutet dies eine wahrscheinlich zunehmende Gefährdung auch in höheren Lagen.

Die Kiefernmonokulturen im Norden von Sachsen-Anhalt werden als Hochrisikogebiete für den Befall durch Kiefern-Großschädlinge eingestuft (Apel et al. 2004). Für den Kiefernspinner (*Dendrolimus pini* L.) sind einige Faktoren bekannt, die eine Gradation begünstigen. Dazu gehören geringe Niederschläge (ca. 500-600 mm Jahressumme) und warme Temperaturen. Landschaftsökologisch sind vor allem warm-trockene, grundwasserferne Sandstandorte, Binnendünen, trockene Hänge und Ähnliches kalamitätsfördernd. Außerdem sind lichte Altholzbestände mit hoher Altersmonotonie und homogener Baumartenvielfalt besonders gefährdet (Möller et al. 2007). Ein weiterer Schaderreger, der in den letzten Jahren in Sachsen-Anhalt zu Schäden geführt hat, ist der Wärme liebende Blaue Kiefernprachtkäfer (*Phaenops cyanea* F.). Er hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einem der bedeutsamsten Stammschädlinge im nordostdeutschen Tiefland entwickelt. Die beobachtete Zunahme der Populationsdichte ist auf die Häufung von warmen und trockenen Sommern zurückzuführen und kann sich weiterhin unter den zu erwartenden Klimaänderungen fortsetzen.

Um die Frage detailliert zu beantworten, ob unter dem Einfluss zukünftiger Klimaänderungen wie steigender Temperaturen und saisonal zunehmender Trockenheit die Ausbruchsfrequenzen von phytophagen Massenvermehrungen in Wälder begünstigt werden, ist weitere Forschung notwendig. Dabei müssen solche Aspekte wie eine mögliche Verlängerung der interannuellen Fraßzeit der Schädlinge durch günstigere Witterungsbedingungen und erhöhten Populationsdruck untersucht werden. Ziel weiterer Arbeiten sollte die Risikoabschätzung von Gradationen und mögliche Anpassungsstrategien für das Forstmanagement in Sachsen-Anhalt sein.

Zur Durchführung einer fundierten Sturmschadensanalyse sind Schadenskartierungen von wenigstens einem in der Vergangenheit aufgetretenen Sturmereignis notwendig. Auf



diese Weise können die zahlreichen vorgestellten Einflussgrößen in Hinblick auf ihre Bedeutung für die Sensitivität der Wälder spezifisch für Sachsen-Anhalt interpretiert werden. Darüber hinaus könnten auch noch weitere für die Sturmanfälligkeit relevante Parameter wie z.B. die Vergesellschaftung sowie das Alter der Bäume oder die Art und Intensität des forstwirtschaftlichen Eingriffs in die Analyse einbezogen werden.

Weiterhin muss auf die mögliche Veränderung der Sensitivitätsparameter in den nächsten Jahrzehnten hingewiesen werden. So resultiert beispielsweise aus den durch Sturmschäden entstandenen Freiflächen und den damit einhergehenden veränderten Licht- und Mikroklimaverhältnissen eine veränderte Konkurrenzsituation der Baumarten (Leder 2007). Es kommt dadurch zu einer natürlichen Verschiebung und Selektion des Artenspektrums, sodass sich langfristig sturmresistentere Baumarten durchsetzen könnten.

Hilfreich wären Informationen zum forstwirtschaftlichen Eingriff, um die anthropogenen Interaktionen berücksichtigen zu können. Akuter Forschungsbedarf besteht insbesondere in der Verringerung der Unsicherheiten und Verbesserung der Vergleichbarkeit von regionalen Klimamodellen in Bezug auf die Klimavariablen mittlere Windgeschwindigkeit sowie Spitzenwindgeschwindigkeit. Dies betrifft besonders die räumliche Auflösung sowie die Ausprägung der Spitzenwindgeschwindigkeiten.

Zu entwickelnde Anpassungsoptionen sollten mittels modellgestützter Analysen von Bewirtschaftungsszenarien in Kombination mit Szenarien des Klimawandels untersucht werden, um die Wechselwirkungen von Klimawandel und Anpassungsoption zu analysieren.

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel spielt die Mitigation, d. h. eine Ausrichtung der Waldbewirtschaftung auf einen möglichst hohen Netto-Beitrag des Waldes zum Klimaschutz eine hervorragende Rolle. Sie erfordert die Bilanzierung der Treibhausgasspeicherung und -emission, die mit jeder Tätigkeit in der Bewirtschaftung assoziiert sind, inklusive der indirekten Effekte wie z. B. Substitutionseffekte durch Holzverwendung (Rock 2008). Für die Bestimmung der „klimaoptimalen“ Vorgehensweise liegen derzeit noch keine ausreichend detaillierten Treibhausgas-Bilanzen auf Bestandes-, Betriebs- bzw. Maßnahmenebene vor. Generell ist unter mitteleuropäischen Bedingungen eine Nutzung des Holzes die günstigste klimawirksame Option (Fürstenau 2008).

*Box 3.4.3: Weiterführende Informationen zum Forstsektor*

Für Deutschland kann hier auf die UBA-Studie „**Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme**“ verwiesen werden (Zebisch et al. 2005). Weiterhin gibt es im Rahmen der Diskussion um die „Gesamtstrategie Wald 2020“ einen Bericht zu einem ersten Workshop im Dezember 2008 (Seintsch 2008), auf dem auch Fragen des Klimawandels und der Forstwirtschaft diskutiert wurden.

Für einzelne Bundesländern sind folgende Studien zu empfehlen:

- Bayern (Beierkuhnlein & Foken 2008)
- Nordrhein-Westfalen (Kropp et al. 2009)
- Baden-Württemberg (Stock 2005)
- Sachsen (SMUL 2007)
- Rheinland-Pfalz (MUFV 2007)
- Hessen (Eichhorn 2005; Koschel et al. 2006)

Weiterführende Informationen sind durch folgende Projekte zu erwarten:

**Decision Support System Wald und Klimawandel - DSS-WuK**

Entwicklung eines webbasierten Entscheidungsunterstützungssystems für Waldbesitzer im Zusammenhang mit der Anpassung der Forstwirtschaft an den Klimawandel. Mithilfe einer Szenarioanalyse soll die Bandbreite der möglichen Auswirkungen auf Wuchs- und Ertragsleistungen und das Risiko der Hauptbaumarten bis 2100 abgeschätzt werden.

**Gefördert durch:** BMBF (im Rahmen des „klimazwei“-Programmes)

**Laufzeit:** 2007-2010

**Projektverbund:** Forschungszentrum Waldökosysteme der Universität Göttingen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Johann Heinrich von Thünen-Institut

**Kontakt:** URL: <http://www.dss-wuk.de>; e-Mail: [gwiedey@gwdg.de](mailto:gwiedey@gwdg.de) oder [ssorch@gwdg.de](mailto:ssorch@gwdg.de)

**Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadenssituation in der deutschen Versicherungswirtschaft**

Mit verschiedenen Projektionsverfahren werden schadensrelevante meteorologische Größen über die kommenden Jahrzehnte unter Klimawandel fortgeschrieben und die Veränderung der Häufigkeit bestimmter Ereignisse (darunter auch Stürme) in bestimmten Schadenskategorien erfasst. Schließlich soll die Rolle der Versicherungswirtschaft im Zusammenwirken mit Staat und Wissenschaft bei der Anpassung an den Klimawandel grundsätzlich beleuchtet werden.

**Gefördert durch:** GDV e.V. (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.)

**Laufzeit:** 1.12.2008-31.1.2011

**Projektverbund:** GDV, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Freie Universität Berlin, Universität zu Köln

**Kontakt:** [held@pik-potsdam.de](mailto:held@pik-potsdam.de)

### 3.4.6. Literatur

Aldinger, E., D. Seemann und V. Konnert (1996): "Wurzeluntersuchungen auf Sturmwurfflächen 1990 in Baden-Württemberg." *Mitt. Ver. Forstl. Standortskunde u. Forstpflanzenzüchtung* 38: 11-25.

Badeck, F. W., F. Beese, D. Berthold, P. Einert, H. Jochheim, R. Kallweit, A. Konopatzky, P. Lasch, H. Meesenburg, K.-J. Meiwes, M. Puhmann, S. Raspe, H. Schulte-



- Bisping, C. Schulz und F. Suckow (2007): "Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von Modellen des Kohlenstoffumsatzes in Waldökosystemen und deren Böden." DE 2003/2004 BB 5, DE 2003/2004 BY 4, DE 2003/2004 NI 6. F. F. C2-Projekte (Hrsg.). Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen (IBW), Landesforstanstalt Eberswalde (LFE), Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).
- Beierkuhnlein, C. und T. Foken (2008): "Klimawandel in Bayern." Bayreuther Forum Ökologie. Vol. 113 U. Bayreuth (Hrsg.). Universität Bayreuth. Bayreuth. 501 S.
- BMVEL (2004): "Die zweite Bundeswaldinventur - BWI2." Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, (Hrsg.). 89 S.
- Burkhard, R., J. Hansen, H. Spellmann, J. Nagel, B. Möhring, P. Schmidt-Walter und M. Dieter (2008): "Clusterstudie Forst und Holz Sachsen-Anhalt." Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA). Göttingen.
- Cucchi, V., C. Meredieu, A. Stokes, F. de Coligny, J. Suarez und B. A. Gardiner (2005): "Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)." *Forest Ecology And Management* 213(1-3): 184-196.
- Dammann, I., U. Paar, P. Gawehn, J. Wendland und J. Eichhorn (2007): "Waldzustandsbericht 2007." Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Abteilung Umweltkontrolle. Sachgebiet Waldzustand und Boden. Göttingen.
- Destatis - Statistisches Bundesamt (2006): "Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen - Wichtige Zusammenhänge im Überblick." Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Dobbertin, M. (2002): "Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar." *Forest Snow and Landscape Research* 77: 187-205.
- Dobbertin, M., H. Seifert und A. Schwyzer (2002): "Ausmaß der Sturmschäden." *Wald und Holz* 1/02: 39-42.
- Eastaugh, C., C. Reyer, P. González-Moreno, J. Wu, A. Biscaia und O. Pentelkina (2009): "Forest Agencies' Early Adaptations to Climate Change." IUFRO Occasional Paper No. 23. International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), Wien.
- Eichhorn, J. (2005): "InKlim 2012 - Integriertes Klimaschutzprogramm Baustein II: Klimawandel und Klimafolgen in Hessen Kartenbezogene Grundlagen der Waldentwicklung unter dem Einfluss von Klimaänderungen Abschlussbericht für den Bereich Forstwirtschaft." Hessen-Forst (Hrsg.). HESSEN-FORST Forsteinrichtung, Information, Versuchswesen (FIV). Hann. Münden.
- Fischer, A. (2003): "Forstliche Vegetationskunde. Eine Einführung in die Geobotanik." Vol. 3. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart. 421 S.
- Foster, D. R. und E. R. Boose (1992): "Patterns of Forest Damage Resulting from Catastrophic Wind in Central New-England, USA." *Journal of Ecology* 80(1): 79-98.
- Fürstenau, C. (2008): "The impact of silvicultural strategies and climate change on carbon sequestration and other forest ecosystem functions." Institut für Geoökologie. Potsdam, Universität Potsdam. Dissertation: 137 S.
- Fürstenau, C., F. Badeck, P. Lasch, M. Lexer, M. Lindner, P. Mohr und F. Suckow (2007): "Multiple-use forest management in consideration of climate change and the interests of stakeholder groups." *European Journal of Forest Research* 126(2): 225-239.
- Gardiner, B., H. Peltola und S. Kellomäki (1999): "Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees." *Ecological Modelling* 129(1): 1-23.
- Gerstengarbe, F. W., F. Badeck, F. Hattermann, V. Krysanova, W. Lahmer, P. Lasch, M. Stock, F. Suckow, F. Wechsung und P. C. Werner (2003): "Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven." PIK Report. PIK (Hrsg.). PIK. Potsdam.
- Glode, J. (2007): "Modeling Windthrow in Riparian Zones in Newfoundland." Faculty of Forestry and Environmental Management. New Brunswick, University of New Brunswick: 11 S.

- Godbold, D. L., H. W. Fritz, G. Jentschke, H. Meesenburg und P. Rademacher (2003): "Root turnover and root necromass accumulation of Norway spruce (*Picea abies*) are affected by soil acidity." *Tree Physiology* 23(13): 915-921.
- Grote, R. und M. Erhard (1999): "Simulation of tree and stand development under different environmental conditions with a physiologically based model." *Forest Ecology & Management* 120(1-3): 59-76.
- Hanewinkel, M. (2008): "Risiko und Klimawandel." *FVA-einblick+* 01/2008: 16-19.
- Heydeck, P. (2007): "Pilzliche und pilzähnliche Organismen als Krankheitserreger an Kiefern." In: R. Kätzel, K. Möller, S. Löffler, J. Engel und K. Liero: "Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland - Ökologie und Bewirtschaftung." Eberswalde, MLUV (Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg): 258-269.
- 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." 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. 987 S.
- Käse, H. (1969): "Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern." Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR. Akademie Verlag. Berlin.
- Kellomäki, S. und S. Leinonen (2005): "Management of European forests under changing climate conditions." H. Mannerkoski (Hrsg.). University of Joensuu, Faculty of Forestry. Joensuu, <http://www.efi.int/attachments/projects/silvistrat/summary.pdf>  
<http://www.efi.int/attachments/projects/silvistrat/chapt5.pdf>.
- Kopp, D. und W. Schwanecke (1994): "Standörtlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft." Vol. 2. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin. 248 S.
- Körner, C., R. Asshoff, O. Bignucolo, S. Hättenschwiler, S. G. Keel, S. Peláez-Riedl, S. Pepin, R. T. W. Siegwolf und G. Zotz (2005): "Carbon Flux and Growth in Mature Deciduous Forest Trees Exposed to Elevated CO<sub>2</sub>." *Science* 309(5739): 1360-1362.
- Koschel, H., U. Moslener, B. Sturm, U. Fahl, B. Rühle und D. H. Wolf (2006): "Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen - InKlim 2012 - Endbericht." ZEW, IER, IFEU, ZIV, IWU, ISET, HLUG.
- Kromp-Kolb, H. H. (2003): "Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Tierwelt - derzeitiger Wissensstand, fokussiert auf den Alpenraum und Österreich." U. u. W. Bundesministerium für land-und Forstwirtschaft (Hrsg.). Institut für Meteorologie und Physik, BOKU. Wien, <http://www.boku.ac.at/imp/klima/Literatur/tiere.pdf>.
- Kropp, J. P., A. Block, F. Reusswig, K. Zickfeld und H. J. Schellnhuber (2006): "Semi-quantitative Assessment of Regional Climate Vulnerability: The North-Rhine Westphalia Study." *Climatic Change* 76(3-4): 265-290.
- Kropp, J. P., A. Holsten, T. Lissner, O. Roithmeier, F. Hattermann, S. Huang, J. Rock, F. Wechsung, A. Lüttger, L. Costa, M. Steinhäuser, S. Pompe, I. Kühn, C. Walther, M. Klaus, S. Ritchie und M. Mezger (2009): "Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren - Abschlussbericht für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW." Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Potsdam.
- Lasch, P., F.-W. Badeck, M. Lindner und F. Suckow (2002): "Sensitivity of simulated forest growth to changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>." *Forstwiss. Centralblatt* 121, Supplement 1: 155-171.
- 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)." *Forest Ecology And Management* 207(1-2): 59-74.
- Lasch, P. und F. Suckow (2007): "Reaktion von Kiefernbeständen unter Klimaänderungen - eine Analyse mit dem Waldwachstumsmodell 4C." In: R. Kätzel, K. Möller, S. Löffler, J. Engel und K. Liero: "Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland - Ökologie und Bewirtschaftung." Eberswalde, MLUV des Landes Brandenburg, Landesforst-

- anstalt Eberswalde, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Vol. Band XXXII: 230-237.
- Lasch, P., F. Suckow und F.-W. Badeck (2007): "Analyses of forest ecosystems' response to climate change at level II monitoring sites." In: J. Eichhorn: "Symposium: Forests in a Changing Environment - Results of 20 years ICP Forests Monitoring Göttingen, 25.-28.10.2006." Göttingen, J.D. Sauerländer's Verlag Frankfurt am Main, Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Vol. 142: 136-141.
- Leder, B. (2007): "Empfehlungen zur Wiederbewaldung der Orkanflächen in NRW." Nordrhein-westfälische Wälder ein Jahr nach Kyrill. Recklinghausen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. 04/2007. 18-21 S.
- Lehnardt, F. und H. M. Brechtel (1980): "Durchwurzelungs- und Schöpftiefen von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen bei unterschiedlichen Standortverhältnissen." *Allg. Forst- u. J.-Ztg* 151(6/7): 120-127.
- LFB - Landesforstbetrieb Sachsen-Anhalt (2008): "Was ist unser Wald?" Letzter Zugriff am, <http://www.landesforstbetrieb.de/>.
- Lindner, M., J. Garcia-Gonzalo, M. Kolström, T. Green, R. Reguera, M. Maroschek, R. Seidle, M. Lexer, S. Netherer, A. Schopf, A. Kremer, S. Delzon, A. Barbati, M. Marchetti und P. Corona (2008): "Impacts of Climate Change on European Forests and Options for Adaptation." European Forest Institute (EFI). Joensuu.
- Lloret, F., D. Siscart und C. Dalmases (2004): "Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain)." *Global Change Biology* 10(12): 2092 - 2099.
- Mäkelä, A., R. Sievänen, M. Lindner und P. Lasch (2000): "Application of volume growth and survival graphs in the evaluation of four process-based forest growth models." *Tree Physiology* 20(5/6): 347-355.
- Mayer, P., P. Brang, M. Dobbertin, D. Hallenbarter, J. P. Renaud, L. Walthert und S. Zimmermann (2005): "Forest storm damage is more frequent on acidic soils." *Annals of Forest Science* 62(4): 303-311.
- Mayer, P., P. Brang, M. Dobbertin und S. Zimmermann (2004): "Sturmschäden auf sauren Standorten häufiger." Informationsblatt Forschungsbereich Wald E. F. WSL (Hrsg.). Birmensdorf, <http://www.wsl.ch/wald/wissenstransfer/pdf/16.pdf>.
- 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.
- Menzel, A., N. Estrella, W. Heitland, A. Susnik, C. Schleip und V. Dose (2008): "Bayesian analysis of the species-specific lengthening of the growing season in two European countries and the influence of an insect pest." *International Journal Of Biometeorology* 52(3): 209-218.
- Mitchell, S. und N. Lanquaye-Opoku (2004): "Windthrow Hazard Mapping using GIS, Canadian Forest Products TFL 30, McGregor Model Forest." F. o. Forestry (Hrsg.). University of British Columbia. Vancouver, <http://faculty.forestry.ubc.ca/mitchell/publications/mcg.pdf>.
- Mitchell, T. D., T. R. Carter, P. D. Jones, P. E. Hulme und M. New (2004): "A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100) " Working Paper 55. Tyndall Centre for Climate Change Research (Hrsg.). Norwich.
- MLU (2007): "Bericht zur Lage der Land-, Ernährungs- und Forstwirtschaft und Tier-schutzbericht des Landes Sachsen-Anhalt." Magdeburg.
- MLU (2009): "Entwurf der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel." Fach- und ressortübergreifende Arbeitsgruppe „Anpassung an den Klimawandel". Magdeburg, Ministerium für Landwirtschaft Umwelt Sachsen-Anhalt (MLU). 81 S.
- Möller, K., C. Walter, A. Engelmann und K. Hielscher (2007): "Die Gefährdung der Gemeinen Kiefer durch Insekten." In: M. Brandenburg: "Die Kiefer im nordostdeut-

- schen Tiefland - Ökologie und Bewirtschaftung." Eberswalde, Landesforstanstalt Eberswalde, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Vol. XXXII: 245-257.
- Moore, J. R. (2000): "Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types." *Forest Ecology and Management* 135(1-3): 63-71.
- MUFV (2007): "Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007." M. Rheinland-Pfalz (Hrsg.). Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG). Mainz.
- Müller-Westermeier, G. (2007): "Beschreibung und klimatologische Bewertung des Orkantiefs „Kyrill“." DWD (Hrsg.).  
[http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU23/besondere\\_ereignisse\\_deutschland/stuerme/orkan\\_kyrill\\_18012007/templateId=raw,property=publicationFile.pdf/orkan\\_kyrill\\_18012007.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU23/besondere_ereignisse_deutschland/stuerme/orkan_kyrill_18012007/templateId=raw,property=publicationFile.pdf/orkan_kyrill_18012007.pdf).
- Norby, R. J., E. H. DeLucia, B. G. C. Calfapietra, C. P. Giardina, J. S. King, J. Ledford, H. R. McCarthy, D. J. P. Moore, R. Ceulemans, P. D. Angelis, A. C. Finzi, D. F. Karnosky, M. E. Kubiske, M. Lukac, K. S. Pregitzer, G. E. Scarascia-Mugnozza, W. H. Schlesinger und R. Oren (2005): "Forest response to elevated CO<sub>2</sub> is conserved across a broad range of productivity." *Proceedings of the National Academy of Science* 102(50): 18052-18056.
- Oren, R., D. S. Ellsworth, K. H. Johnsen, N. Phillips, B. E. Ewers, C. Maier, K. V. R. Schäfer, H. R. McCarthy, H. Hendrey, S. G. McNulty und G. G. Katul (2001): "Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere." *Nature* 411: 469-472.
- Pinto, J. G., E. L. Fröhlich, G. C. Leckebusch und U. Ulbrich (2007): "Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 7(1): 175.
- Polonski, J. und N. Kuhn (2001): "Root habitus and wind stability of trees." *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 120(5): 303-317.
- Rauch, E. (2008): "Spezial: Wetterphänomen Sturm." In: Münchener Rück: "Schadenspiegel - Themenheft Risikofaktor Luft." Vol. 1/2008.
- Rich, R. L., L. E. Frelich und P. B. Reich (2007): "Wind-throw mortality in the southern boreal forest: effects of species, diameter and stand age." *Journal of Ecology* 95(6): 1261-1273.
- Rock, J. (2008): "Klimaschutz und Kohlenstoff in Holz : Vergleich verschiedener Strategien (Climate protection and carbon in wood : comparison of management strategies)." Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät. Potsdam, Universität Potsdam. Dissertation: 150 S.
- Rottmann, M. (1986): "Wind- und Sturmschäden im Wald. Beiträge zur Beurteilung der Bruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung sturmgeschädigter Nadelholzbestände." Sauerländer. Frankfurt am Main. 128 S.
- Ruel, J.-C. (2000): "Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies." *Forest Ecology and Management* 135(1-3): 169-178.
- Ruel, J. C. (1995): "Understanding Windthrow - Silvicultural Implications." *Forestry Chronicle* 71(4): 434-445.
- Ruel, J. C., S. J. Mitchell und M. Dornier (2002): "A GIS based approach to map wind exposure for windthrow hazard rating." *Northern Journal of Applied Forestry* 19(4): 183-187.
- Saidani, N. (2004): "Erkennung von Sturmschäden im Wald auf der Basis kleinmaßstäbiger Luftbilder und Entwicklung eines Modells zur Abschätzung der Sturmgefährdung der Wälder auf der Basis von räumlichen Daten." Forst- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau: 181 S.
- Schaber, J., F.-W. Badeck und P. Lasch (1999): "Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C)." In: D. R. Pelz, O. Rau und J. Saborowski: "Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik. 11. Jahrestagung und Internati-



- onale biometrische Gesellschaft. Deutsche Region. Arbeitsgruppe Ökologie, Herbstkolloquium." Freiburg: 212-217.
- Scheffer, F. und P. Schachtschabel (2008): "Lehrbuch der Bodenkunde." Vol. 15. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.
- Schmidtke, H. und H.-U. Scherrer (1997): "Sturmschäden im Wald." NFP "Klimaänderungen und Naturkatastrophen". v. H. AG (Hrsg.). ETH Zürich. Zürich.
- Schmoeckel, J. (2005): "Orographischer Einfluss auf die Strömung abgeleitet aus Sturmschäden im Schwarzwald während des Orkans 'Lothar'." Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe: 135 S.
- Schmoeckel, J. und C. Kottmeier (2008): "Storm damage in the Black Forest caused by the winter storm 'Lothar' - Part 1: Airborne damage assessment." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8(4): 795-803.
- Schmoeckel, J. (2005): "Orographischer Einfluss auf die Strömung abgeleitet aus Sturmschäden im Schwarzwald während des Orkans 'Lothar'." Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe: 135 S.
- Schönwiese, C.-D. (2007): "Wird das Klima extremer? – Eine statistische Perspektive." In: W. Endlicher und F. W. Gerstengarbe: "Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke." Berlin, Potsdam, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung & Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Geographisches Institut: 60 - 66.
- Schuffenhauer, F. (2007): "Schäden durch Sturm." In: "Bericht zur Waldschutzsituation in Sachsen Anhalt." Halle, Landesverwaltungsamt - Refereat Forst und Jagdhoheit: 5f.
- Schulte, U. und J. Richter (2007): "Naturwaldzellen halten Kyrill stand. Nordrhein-westfälische Wälder ein Jahr nach Kyrill." *Natur in NRW* 04/2007: 30-31.
- Schulte, U., Richter, J.: (2007): "Naturwaldzellen halten Kyrill stand." Nordrhein-westfälische Wälder ein Jahr nach Kyrill. Recklinghausen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. 04/2007. 30f. S.
- Schütt, P., H. Schuck und B. Stimm (2002): "Lexikon der Baum- und Straucharten." Special Edition. Ausg. Nikol. Hamburg.
- Seintsch, B., Dieter, M. (Hrsg.) (Hrsg.) (2008): "Waldbaustrategie 2020." Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research. vTI. Berlin. 132 S.
- Seppälä, R., A. Buck und P. Katila (2009): "Adaptation of Forests and People to Climate Change - A Global Assessment Report." IUFRO World Series. IUFRO. Helsinki.
- SMUL (2007): "Fortschrittsbericht der Arbeitsgruppe Klimafolgen für den Berichtszeitraum 2006/2007." Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) (Hrsg.). Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Dresden.
- 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 und A2." Publikationen des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt (Hrsg.). Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH. Potsdam.
- Spiecker, H. (2003): "Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe--temperate zone." *Journal of Environmental Management* 67(1): 55-65.
- Stock, M. H. (2005): "KLARA. Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung." PIK-Report. F. W. Gerstengarbe (Hrsg.). Potsdam Institute for Climate Impact Research. Potsdam.
- Suckow, F., F.-W. Badeck, P. Lasch und J. Schaber (2001): "Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE." *Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol.* 35(2): 84-87.
- Talkkari, A., H. Peltola, S. Kellomäki und H. Strandman (2000): "Integration of component models from the tree, stand and regional levels to assess the risk of wind damage at forest margins." *Forest Ecology and Management* 135(1-3): 303-313.

- Ullrich, B. (1986): "Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben: Langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten " *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 105(1): 421-435.
- Walter, A., K. Keuler, D. Jacob, R. Knoche, A. Block, S. Kotlarski, G. Müller-Westermeier, D. Rechid und W. Ahrens (2006): "A high resolution reference data set of German wind velocity 1951-2001 and comparison with regional climate model results." *Meteorologische Zeitschrift* 15(6): 585-596.
- Wermelinger, B. (2004): "Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus*--a review of recent research." *Forest Ecology and Management* 202(1-3): 67-82.
- Woodward, S., J. Stenlid, R. Karjalainen und A. Hüttermann (1998): "Heterobasidion annosum: Biology, Ecology, Impact and Control." CAB International. New York.
- Wulf, A. (2008): "Über die Zunahme thermophiler Schadorganismen in den Wäldern - Umbaupläne müssen dies berücksichtigen." In: J. Lozan, H. Graßl, G. Jendritzky, L. Karbe und K. Reise: "Warnsignal Klima Gesundheitsrisiken Gefahren für Pflanze, Tiere und Menschen." Hamburg, Wissenschaftliche Auswertungen, GEO: 282-285.
- Zebisch, M., T. Grothmann, D. Schröter, C. Hasse, U. Fritsch und W. Cramer (2005): "Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme " Climate Change. UBA (Hrsg.). UBA. Dessau.



### 3.5. Naturschutz

**Kernaussagen:**

- Die Klimatische Wasserbilanz ist eine zentrale Größe des Wasserhaushaltes und für Lebensräume und Arten relevant. Bereits heute ist sie in vielen Regionen des Landes negativ, so dass ein Defizit der Wasserverfügbarkeit vorhanden ist.
- In Abhängigkeit von Klimamodell und Szenario wird die Klimatische Wasserbilanz im Jahresmittel sowie in der Vegetationsperiode weiter abnehmen und damit das Defizit der Wasserverfügbarkeit verschärfen.
- Durch eine Verringerung der Klimatischen Wasserbilanz könnten FFH-Schutzgebiete in den Naturräumen des Harzes, den südlichen Ausläufern der Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes sowie die Altmark und dem Fläming besonders betroffen sein. In diesen Regionen kommen unter anderem feuchtesensitive Lebensräume wie Moore, Moor- und Auenwälder sowie Feuchtwiesen vor.
- Ungefähr 40% der untersuchten FFH-Lebensraumtypen (FFH-LRT) sind durch einen hohen Anteil an kälte- und feuchtesensitiven Pflanzenarten am lebensraumtypischen Artenspektrum charakterisiert. Sie können daher als sensitiv gegenüber der Zunahme von Temperatur und Trockenheit unter Klimawandel eingestuft werden. Beispiele hierfür sind die FFH-LRT der Moore. Potentiell weniger gefährdet in diesem Zusammenhang sind beispielsweise die prioritären (\*) FFH-LRT „Salzwiesen im Binnenland“ (1340\*) und „Trockene, kalkreiche Sandrasen“ (6120\*).
- Mittels eines Systems aus Sensitivitätsindikatoren wurde die Sensitivität der FFH-LRT gegenüber dem Klimawandel abgeschätzt. Die Auswertung zeigt eine geringe bis sehr geringe Sensitivität für je ca. 30% der analysierten FFH-LRT, eine mittlere und hohe Sensitivität für je ca. 14% sowie eine sehr hohe Sensitivität für ca. 10% der FFH-LRT. Zu den sehr gefährdeten zählen beispielsweise die „Feuchte Heiden des nordatlantischen Raumes mit Erica tetralix“ (4010) und „Lebende Hochmoore“ (7110\*). Hingegen sind beispielsweise die FFH-LRT „Trockene, kalkreiche Sandrasen“ (6120\*) und 9170 „Labkraut-Eichen-Hainbuchenwald Galio-Carpinetum“ (9170) vergleichsweise sehr gering gefährdet.

#### 3.5.1. Einleitung

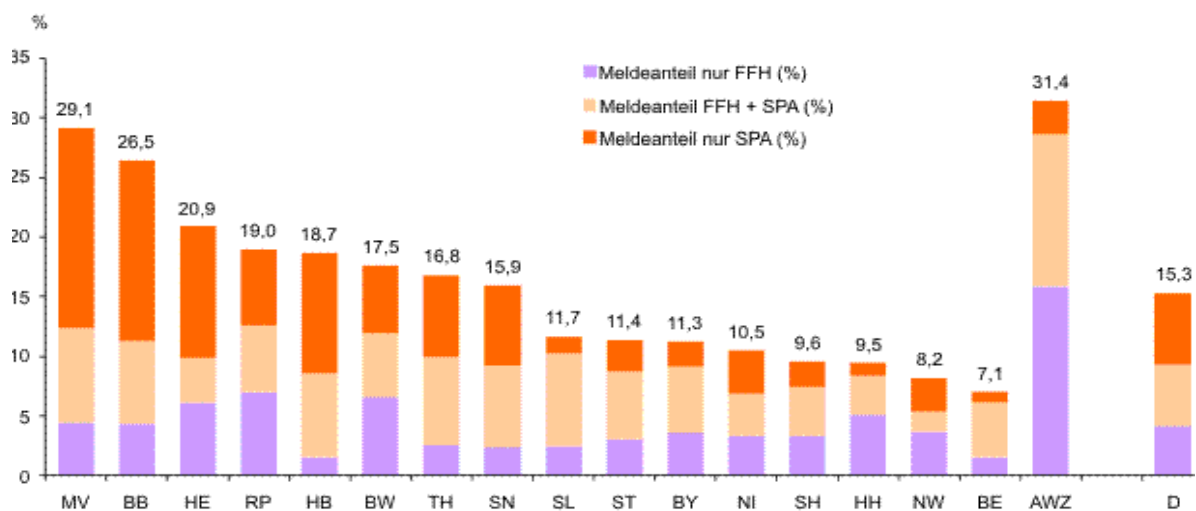
Das Land Sachsen-Anhalt (LSA) gehört zum Norddeutschen Tiefland. Die Naturräume des Landes sind im Nordosten atlantisch und in den übrigen Landesteilen kontinental geprägt. Die naturräumliche Gliederung Sachsen-Anhalts (siehe Kapitel 1, Abb. 1.3.1) weist von Nordwesten nach Süden ziehend die Region des Mittelgebirges mit dem Harz sowie der Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes auf. Letztere prägen zusammen mit den Ackerebenen das Landesinnere Sachsen-Anhalts. Im Norden und Osten schließen sich die Ebenen der Landschaften am Südrand des Tieflandes an. Von den Flusstälern

und Niederungslandschaften, z.B. der Elbe, sind insbesondere die Acker- und Tieflandebenen durchzogen.

Der regionale Klimawandel ist einer der Stressoren, die auf Lebensräume und deren Arten einwirken (Zebisch et al. 2005), z.B. durch Veränderung der Bodentemperatur und Bodenfeuchte (s. Kapitel 3.2, Boden). Weitere Stressoren treten beispielsweise durch Landnutzungswandel, Habitatzerschneidung und das Einwandern von Neobiota auf, welche auch Relevanz für andere Bereiche wie den Gesundheitssektor haben können. Der regionale Klimawandel wirkt sich bereits auf aquatische und terrestrische Ökosysteme aus, beispielsweise in Form von Arealverschiebungen oder Veränderungen in zeitlichen Abläufen. Sehr wahrscheinlich werden sich diese Veränderungen in der Zukunft fortsetzen (Pampus 2005; IPCC 2007; Pompe et al. 2008), so dass der Klimawandel das Überleben von Arten und Lebensräumen beeinflussen und gefährden kann (MLU 2009).

Vor dem Hintergrund der vielfältigen Einwirkungen auf die natürlichen Ökosysteme sieht sich der Naturschutz mit einer zweifachen Herausforderung konfrontiert: Dem Schutz der Lebensräume und Arten sowie der Berücksichtigung und Sicherung der Bedürfnisse anderer Sektoren.

Um die Schutzziele des Naturschutzes umzusetzen, stehen diesem auf internationaler und nationaler Ebene verschiedene Instrumente zur Verfügung. Eines dieser Instrumente ist das Netz der NATURA 2000-Schutzgebiete. Dieses ist auf internationaler Ebene durch die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie<sup>1</sup> (FFH-RL) und die Vogelschutz-Richtlinie<sup>2</sup> (EU SPA) verankert, wird jedoch auf nationaler Ebene umgesetzt. In Sachsen-Anhalt waren im Jahr 2008 insgesamt 11,4 % der Landesfläche als NATURA 2000-Schutzgebiet ausgewiesen (Abb. 3.5 1)



<sup>1)</sup> Für AWZ (Ausschließliche Wirtschaftszone) gilt: Anteil der gemeldeten marinen Fläche an der Gesamtfläche AWZ

**Abb. 3.5 1: Meldeanteil der NATURA 2000-Gebiete der Bundesländer im Jahr 2008**  
**Anteil der gemeldeten terrestrischen Fläche der NATURA 2000-Schutzgebiete an der Fläche der Bundesländer (ST - Sachsen-Anhalt) und Deutschlands (BfN 2009a)**

<sup>1</sup> Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen (Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie, FFH-RL)

<sup>2</sup> Richtlinie 79/409/EWG des Rates vom 2. April 1979 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten, (EU SPA)

Die Flora-Fauna-Habitat-Schutzgebiete (FFH-Schutzgebiete) als Bestandteil des Natura 2000-Systems sowie die in ihnen vorkommenden Lebensräume und Arten sind Gegenstand der folgenden Untersuchung. An ihnen wird beispielhaft die Gefährdung des Naturschutzes insbesondere gegenüber zunehmender Trockenheit in Sachsen-Anhalt abgeschätzt. Die Schutzgebiete nach der Vogelschutz-Richtlinie sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

### 3.5.2. Methodik

Die Untersuchung der potentiellen Gefährdung der FFH-Schutzgebiete gegenüber dem Klimawandel erfolgt zunächst auf Ebene der Schutzgebiete, geht anschließend auf die Lebensräume in den Schutzgebieten ein und betrachtet dabei abschließend exemplarisch die FFH-Schutzgebiete „Drömling“ und „Grabensystem Drömling“. Die Auswertungen erfolgen auf der Grundlage der gegenwärtig vorliegenden Kartierungen in den FFH-Schutzgebieten<sup>3</sup> sowie der Kartieranleitungen zu den Lebensraumtypen Sachsen-Anhalts (Teil Offenland (LAU 2009a) und Teil Wald (LAU 2009b)).

#### 3.5.2.1. Berechnung der Klimatischen Wasserbilanz

In den folgenden Analysen wird der Klimawandel durch die Veränderung der klimatischen Wasserbilanz (KWB) im Jahresmittel ( $KWB_{\text{Jahr}}$ ) und in der Vegetationsperiode ( $KWB_{\text{veg}}$ ) repräsentiert. Grundlage stellen tägliche Daten der klimatischen Wasserbilanz nach den regionalen Klimamodellen WETTREG und REMO dar. Die klimatische Wasserbilanz wurde als Differenz aus Niederschlag minus potentieller Evapotranspiration nach Turc/Ivanov (vgl. Kapitel 2.3.2) gebildet. Als Vegetationsperiode ist der Zeitraum April-September definiert, welcher elementar für die Entwicklung und das Wachstum der Pflanzen ist (Sitte et al. 1999). Diese Zeitspanne deckt jedoch nur einen Teil des Jahres ab, weshalb zusätzlich die klimatische Wasserbilanz als Jahresmittelwert herangezogen wurde. Die Untersuchungen stützen sich auf die Veränderung zwischen den Zeiträumen 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 (Szenarien A2, A1B und B1) zum Basiszeitraum 1961-1990. Die räumliche Verteilung der absoluten Werte der klimatischen Wasserbilanz im Jahr, Winter und Sommer in diesen Zeiträumen sind im Anhang 3.5 dargestellt. Die Differenzwerte bezüglich der KWB im Winter und Sommer im Anhang zu Kap. 2.5.

#### 3.5.2.2. Klassifizierung der Lebensräume

Aufbauend auf der bestehenden Klassifizierung der FFH-Lebensraumtypen (FFH-LRT) nach der FFH-RL wurde im Rahmen dieser Studie für die in Sachsen-Anhalt vorkommenden Typen eine vereinfachte landesspezifische Klassifizierung von Lebensräumen entwickelt (Lebensraumklassen). Es wurden dabei die Lebensraumklassen Gewässer, Heide, Gras- und Grünland, Feuchtwiesen, Moore, Felsen und Schutthalden<sup>4</sup> sowie die zwei Waldlebensraumklassen gering feuchtesensitive Wälder und stark feuchtesensitive Wälder gebildet (Tab. 3.5.1). Die Ergebnisse der  $KWB_{\text{Jahr}}$  und der  $KWB_{\text{veg}}$  (s. 3.5.3.1) werden

<sup>3</sup> Es wurden flächen- und linienhafte FFH 2000-Schutzgebiete berücksichtigt (linienhafte wurden für die Analysen mit einer Randzone von beiderseits 5 m versehen).

<sup>4</sup> Diese Lebensraumklasse enthält vornehmlich Felsen und Schutthalden als Lebensräume. Deshalb wurden Felsen und Schutthalden namensgebend verwendet.

anschließend im Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der FFH-Schutzgebiete und Lebensraumklassen diskutiert (s. Kap. 3.5.3.2). Die FFH-Schutzgebiete Sachsen-Anhalts sind in Abb. 3.5.2 dargestellt, die Vorkommen der Lebensraumklassen innerhalb der FFH-Schutzgebiete in Abb. 3.5.3 bis Abb. 3.5.6. Die Größe der Kreise in diesen Abbildungen steht im Verhältnis zur Größe des Schutzgebietes, in welchem die betreffende Lebensraumklasse vorkommt.

Die FFH-Schutzgebiete (Abb. 3.5.2) sind flächenhaft über das gesamte Bundesland verteilt. Es sind jedoch Vorkommensschwerpunkte entlang der Elbe, im Drömling sowie im Harz vorhanden. Des Weiteren sind viele kleinere Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt ausgewiesen, wie beispielsweise in den Niederungs- und Flusslandschaften.

**Tab. 3.5.1: Für die Analyse gebildete Sachsen-Anhalt-spezifische Lebensraumklassen und korrespondierende FFH-LRT (Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie) (Kodierung der FFH-LRT s. Anhang Tab. 3.5.1) (\*prioritäre FFH-LRT)**

Lebensraumklasse	Korrespondierende FFH-LRT
Gewässer	1340*, 3130, 3140, 3150, 3160, 3180*, 3190, 3260, 3270
Heide	2310, 2330, 4010, 4030, 40A0*
Gras- und Grünland	6110*, 6120*, 6130, 6210, 6230*, 6240*, 6510, 6520
Feuchtwiesen	6410, 6430, 6440
Moore	7110*, 7120, 7140, 7150, 7210*, 7220*, 7230
Felsen und Schutthalden	8150, 8160*, 8210, 8220, 8230, 8310
Wälder, gering feuchtesensitiv	9110, 9130, 9150, 9160, 9170, 9180*, 9190, 91F0, 91T0, 9410
Wälder, stark feuchtesensitiv	91D0*, 91E0*

FFH-Schutzgebiete mit Feuchtlebensräumen (Lebensraumklassen Gewässer, Feuchtwiesen, Moor- und Auenwälder) sind in größeren Flächen vorwiegend entlang der Flussläufe, beispielsweise der Elbe und Saale, sowie im Drömling und im Mittelgebirge zu finden. Diese Feuchtlebensräume kommen jedoch ebenso flächenhaft, wenn auch weniger verbreitet, in den Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes und in den Ackerebenen im Inneren des Bundeslandes vor. Die Lebensraumklasse Gras- und Grünlandschaften weist eine ähnliche räumliche Verteilung wie die Auen- und Moorwälder auf, jedoch existieren im Gegensatz zu den Auen- und Moorwäldern auch zahlreiche kleinere Vorkommen in den Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes und in den Ackerebenen. Ein räumlicher Schwerpunkt dieser kleineren Gras- und Grünlandschaften befindet sich in FFH-Schutzgebieten im Südosten des Mittelgebirgsvorlandes westlich der Saale. Damit ähnelt die Verteilung der Gras- und Grünlandschaften zum Teil der der Wälder. Allerdings zeigen sich weniger Vorkommen an Wäldern nahe der Elbe und in kleineren Schutzgebieten. Die Lebensraumklasse Moore, Heiden sowie Felsen und Schutthalden kommen in Sachsen-Anhalt innerhalb der FFH-Schutzgebiete seltener als die anderen Lebensraumklassen vor. Großflächige Schutzgebiete mit Mooren befinden sich im Mittelgebirge, im Drömling sowie im Nordosten des Landes nahe der Elbe und der Havel. Heiden sind vorwiegend im Nordwesten und Süden der Mittelgebirge, nördlich von Halle und entlang der Elbe zu finden. Ein großes Schutzgebiet, welches neben den zuvor genannten Feuchtwiesen auch Heiden als Lebensraum beherbergt, ist das Schutzgebiet „Colbitz-Letzlinger Heide“. Felsen und Schutthalden innerhalb von Schutzgebieten befinden sich beispielsweise im Westen und Südwesten des Landes im Harz und im südlichen Harzvorland.

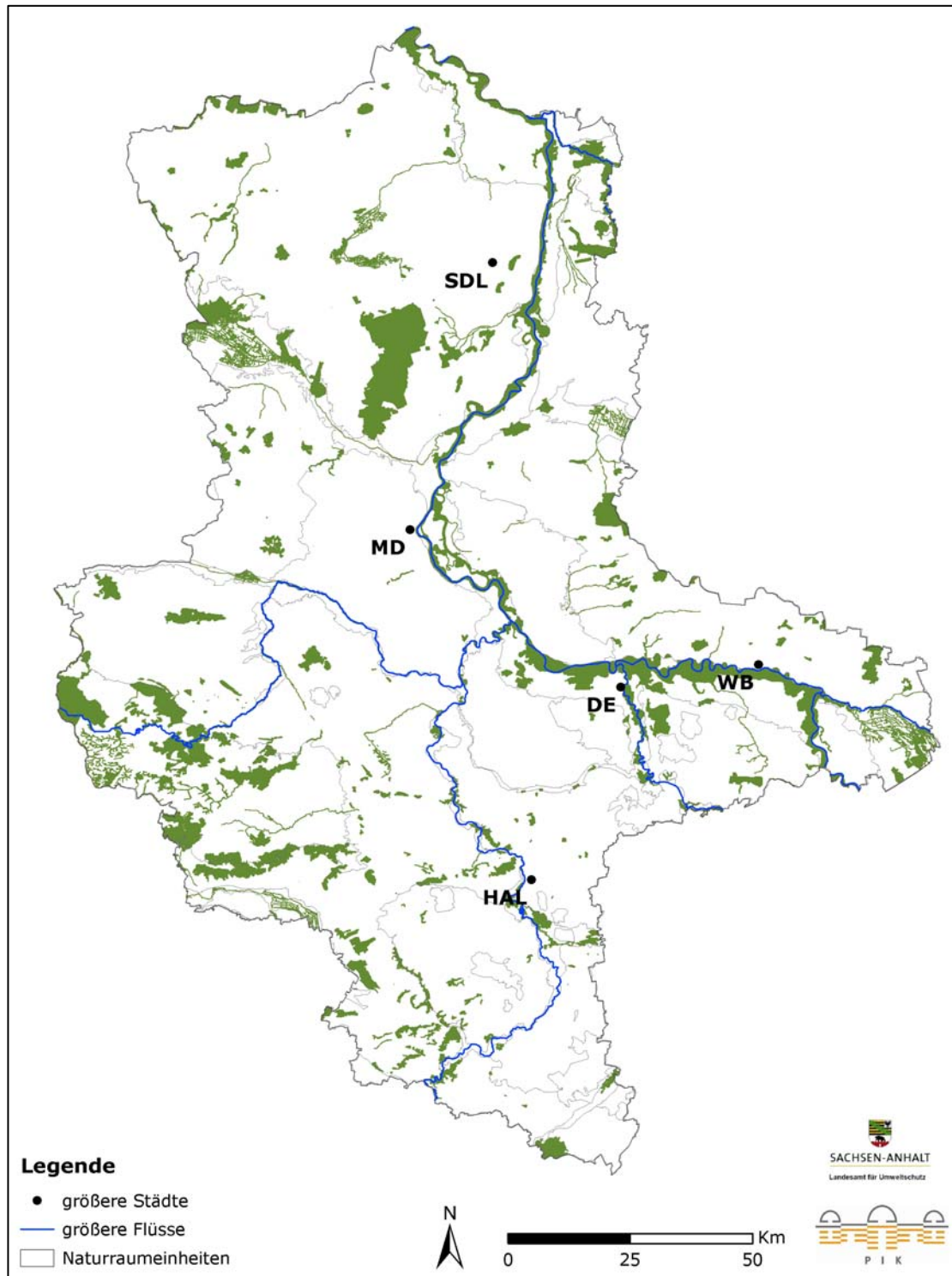
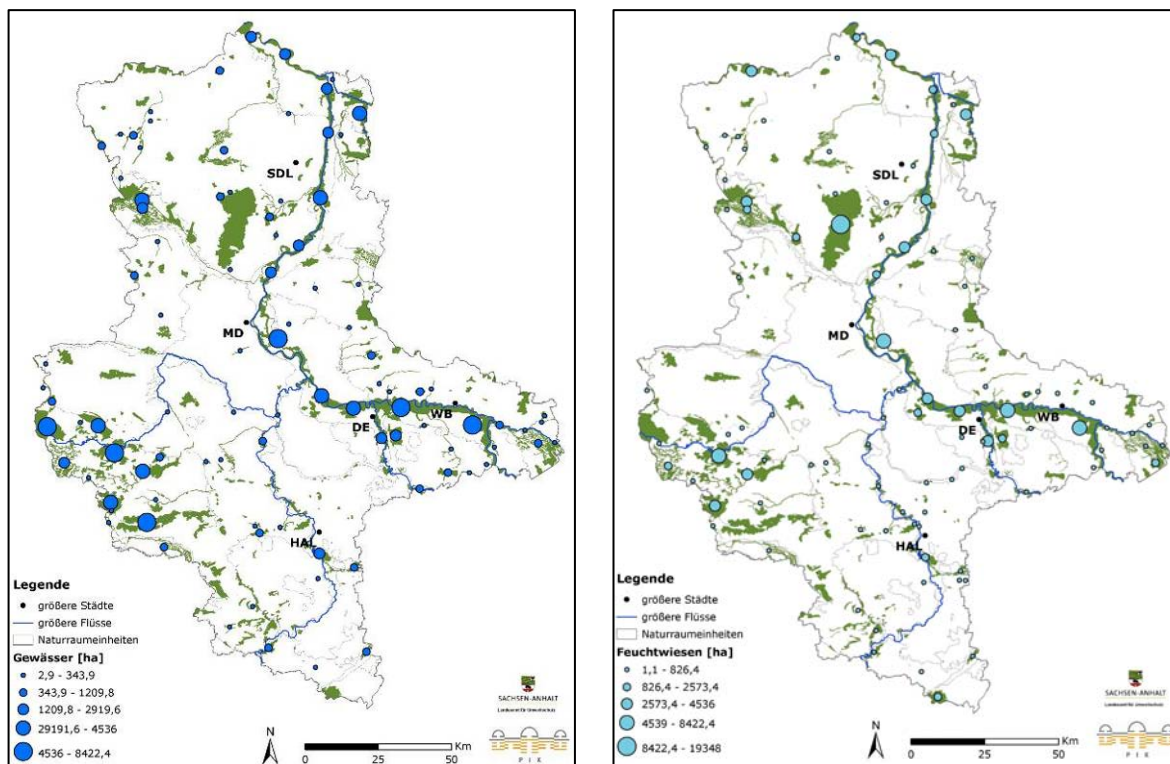


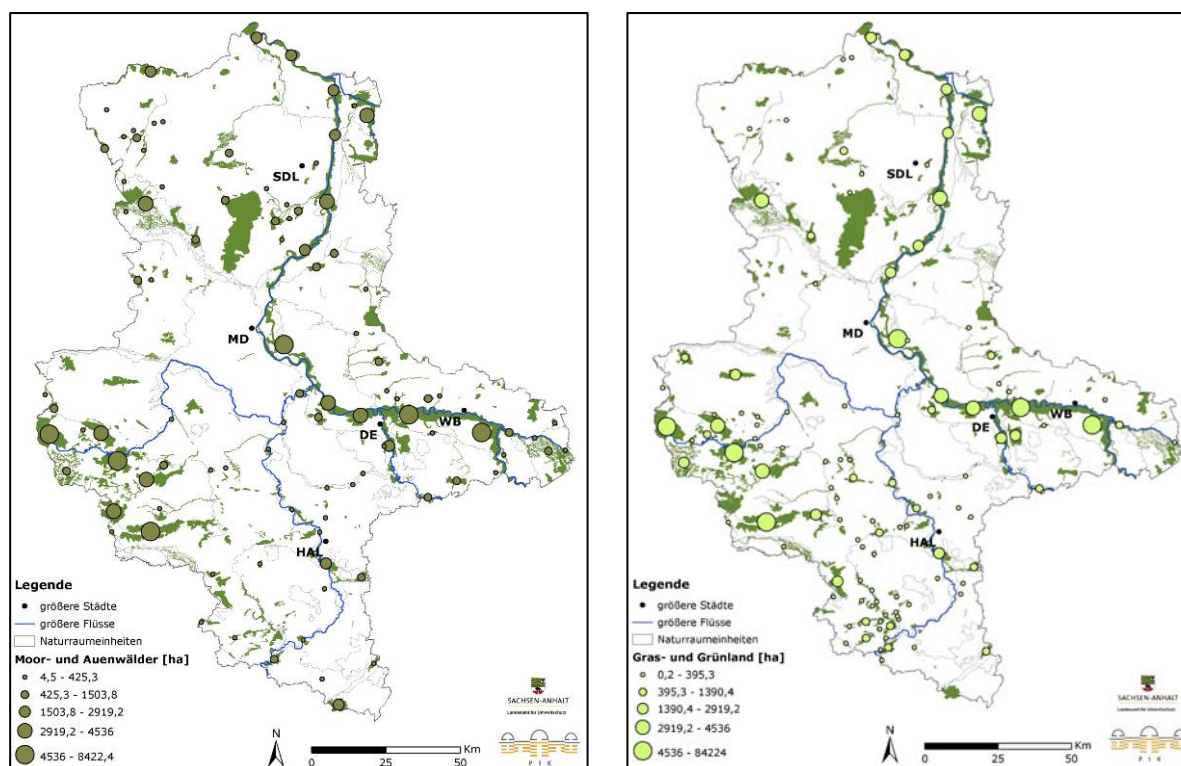
Abb. 3.5.2: FFH-Schutzgebiete (grün) in Sachsen-Anhalt<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Naturraumeinheiten siehe Kap. 1.3. Abb. 1.3.1.; Städte: Stendal SDL, Magdeburg MD, Wittenberg WB, Dessau DE, Halle HAL



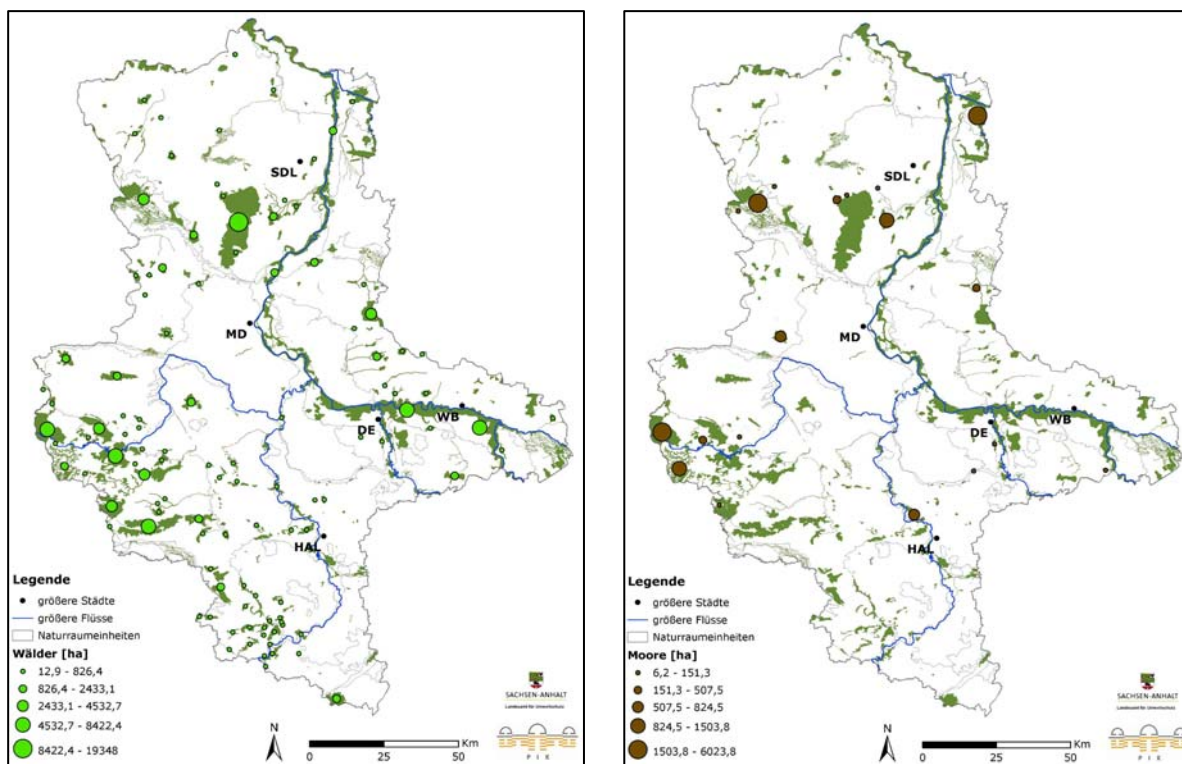


**Abb. 3.5.3: FFH-Schutzgebiete mit den Lebensraumklassen Gewässer (links) und Feuchtwiesen (rechts)**

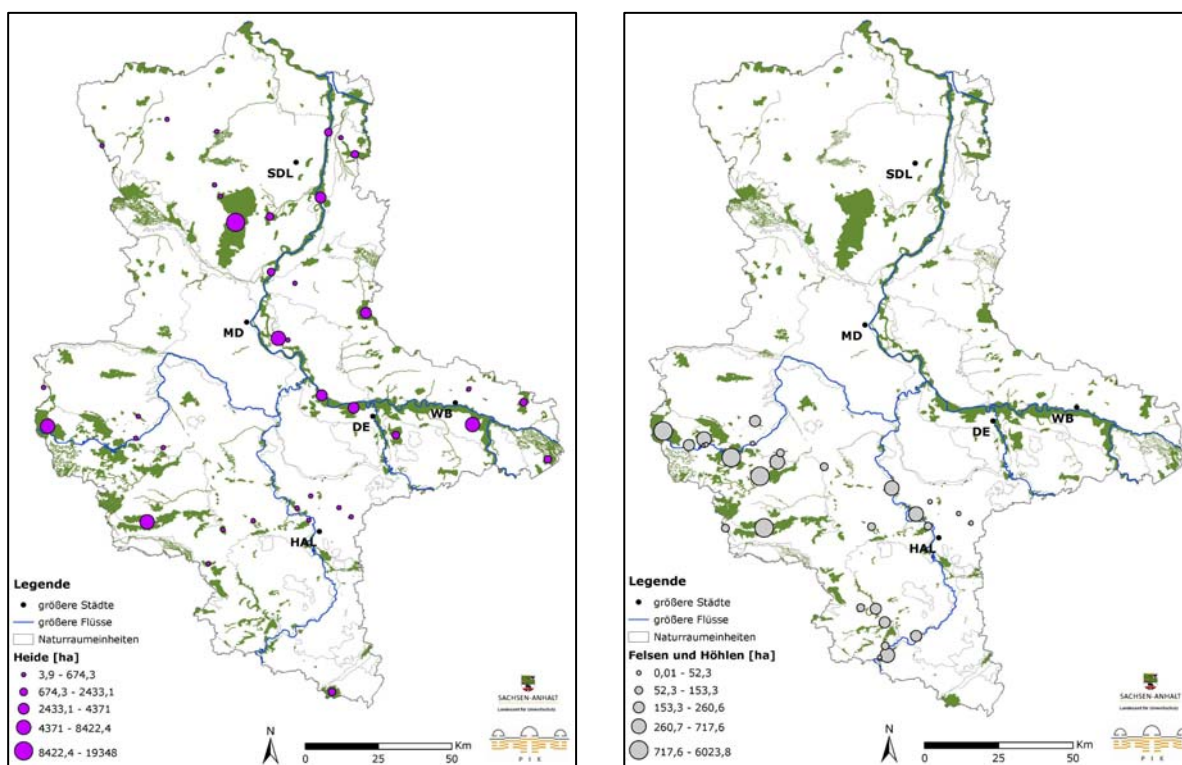


**Abb. 3.5.4: FFH-Schutzgebiete mit den Lebensraumklassen Moor- und Auenwälder (links) sowie Gras- und Grünland (rechts)**





**Abb. 3.5.5: FFH-Schutzgebiete mit den Lebensraumklassen Wälder (links, ausgenommen Auen- und Moorwälder) und sowie Moore (rechts)**



**Abb. 3.5.6: FFH-Schutzgebiete mit den Lebensraumklassen Heiden (links) sowie Felsen und Schutthalden (rechts)**

### 3.5.2.3. Abschätzung der Sensitivität der FFH-Lebensraumtypen

Zur Abschätzung der Sensitivität eines FFH-Lebensraumtypes (FFH-LRT) können dynamische Ansätze wie die bioklimatische Modellierung (Berry 2002; Normand et al. 2007) oder statistische Ansätze wie Indikatorensysteme (Petermann et al. 2007) verwendet werden. Dynamische Modelle sind sehr aufwendig bezüglich der Datengrundlage und Modellierung, weshalb in der vorliegenden Studie der statistische Ansatz mittels einer Matrix aus Sensitivitätsindikatoren gewählt wurde.

In einer indikatorbasierten Studie des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) zur Abschätzung der Sensitivität der FFH-LRT gegenüber dem Klimawandel wurden diesen anhand eines Indikatorensystems relative Sensitivitätswerte zugewiesen (Petermann et al. 2007). Indikatoren waren beispielsweise die „qualitative Gefährdung“, die „Regenerierbarkeit“, das geografische Vorkommen der Arten eines FFH-LRT („Arealgrenzen“), die „Beschränkung auf Hochlagen“, die „Grundwasserabhängigkeit“, der Einfluss durch Neobiota und die Tendenz zum bereits beobachteten Flächenrückgang. Die Zuordnung dieser Sensitivitätsindikatoren in drei Sensitivitätsstufen basierte auf Experteneinschätzungen. Durch Aggregation der Einzelindikatoren wird anschließend die allgemeine Sensitivität des FFH-LRT berechnet<sup>6</sup>. Dieses Konzept bildet die Grundlage der folgenden Analyse für Sachsen-Anhalt.

Die von Petermann et al. (2007) erarbeiteten Sensitivitätsstufen der Indikatoren wurden übernommen, jedoch, sofern verfügbar, durch landesspezifische Indikatoren und -daten ersetzt. So wurden der Indikator „Qualitative Gefährdung“ durch den räumlich spezifischen Indikator der Bewertung des Erhaltungszustandes ersetzt (Holsten 2007; Kropp et al. 2009), welcher die bereits vorhandene Gefährdung eines FFH-LRT berücksichtigt. Des Weiteren wurde der Indikatorensatz durch den Sachsen-Anhalt-spezifischen Anteil an kälte- und feuchtetoleranten Pflanze (ausgedrückt durch Temperatur- und Feuchtezeigerpflanzen) an den charakteristischen Arten an einem FFH-LRT ergänzt. Insgesamt wurden 49 der 51 in Sachsen-Anhalt vorkommenden FFH-LRT mittels der Indikatorensystems bewertet. Ausgeschlossen von den 51 FFH-LRT wurde der Typ „Touristisch nicht erschlossene Höhlen“ (8310<sup>7</sup>) und die zwei Ausprägungen des FFH-LRT 91E0 („Auenwälder mit *Alnus glutinosa* und *Fraxinus excelsior*“) wurden zu einem FFH-LRT zusammengefasst.

Um die potentielle Betroffenheit der lebensraumtypischen Pflanzenarten<sup>8</sup> von FFH-LRT gegenüber zunehmender Trockenheit (hier ausgedrückt eine Abnahme der KWB) abzuschätzen, können die Standortansprüche der in den Schutzgebieten vorkommenden Pflanzenarten auf Basis der Temperatur- und Feuchtezeigerwerte nach (Ellenberg 1992) herangezogen werden (Hoffmann 1995; Schlumprecht et al. 2005; Holsten 2007; Petermann et al. 2007; Kropp et al. 2009). Dieser Ansatz basiert auf der Annahme, dass die Pflanzen mit hoher Toleranz gegenüber frischen bis nassen (Feuchtezeigerwert F 7-9)

<sup>6</sup> Gleichgewichteter Mittelwert der Einzelindikatoren mit anschließender Einteilung in fünf äquidistante Sensitivitätsklassen. Sofern zu einem Indikator keine Information für einen FFH-LRT vorlag, ging dieser Indikator in die Mittelwertbildung nicht ein.

<sup>7</sup> Keine Angabe von Pflanzenarten in der Kartieranleitung des FFH-LRT (Offenland 2009)

<sup>8</sup> Gefäßpflanzen, inkl. Bäume sowie Moose und Flechten

sowie gegenüber kalten bis kühlen Standorten (Temperaturzeigerwert T 1-4) von der projizierten Klimaänderung potenziell besonders betroffen sind, da durch den Klimawandel sowohl eine Erhöhung der Temperatur als auch eine Verringerung der KWB zu erwarten ist (s. Kap. 2.5.). Eine Limitation dieses Ansatzes besteht darin, dass die Werte auf Basis der gegenwärtigen Artengemeinschaft ermittelt wurden.

Es wurden die Temperatur- und Feuchtwerte der charakteristischen Pflanzenarten (LAU 2009b, a) eines jeden FFH-Lebensraumtyps nach (Ellenberg 1992) und FLORAWEB (BfN 2009b) bestimmt. Nicht in die Analyse miteinbezogen wurden bezüglich der Temperatur- oder Feuchtebedingungen indifferente Pflanzenarten, da ihre Existenz nicht eindeutig an bestimmte Standortfaktoren geknüpft ist. Wasserpflanzen ( $F > 9$ ) und Pflanzen, denen keine Zeigerwerte durch Ellenberg zugewiesen werden konnten, blieben ebenfalls unberücksichtigt. Dadurch kann im Rahmen dieser Analyse keine Aussage zu aquatischen FFH-Lebensraumtypen (8 FFH-LRT) und zum FFH-LRT 8310 (nicht touristisch erschlossene Höhlen) getroffen werden. Der FFH-LRT 91EO „Auenwälder mit *Alnus glutinosa* und *Fraxinus excelsior*“ mit den unterschiedlichen Ausprägungen „Erlen- und Eschenwälder an Fließgewässern“ und „Weichholzauenwälder an Fließgewässern“ wurde analog zu der Nummerierung als ein FFH-LRT betrachtet. Somit wurden 41 der 51 in Sachsen-Anhalt vorkommenden FFH-LRT mit insgesamt 595 Zeigerpflanzen betrachtet.

### 3.5.3. Ergebnisse

Zunächst werden die KWB-Projektionen im Kontext des Naturschutzes diskutiert. Basis hierfür sind die Ergebnisse bezüglich der zukünftigen Veränderung der klimatischen Wasserbilanz als Jahresmittelwert ( $KWB_{\text{Jahr}}$ ) gegenüber dem Basiszeitraum 1961-1990 (Abb. 3.5.7 bis Abb. 3.5.8) und in der Vegetationsperiode ( $KWB_{\text{Veg}}$ ) (Abb. 3.5.9 bis Abb. 3.5.10). Es werden Lage und Ausprägung der Veränderung der  $KWB_{\text{Jahr}}$  und  $KWB_{\text{Veg}}$  im Zusammenhang mit der Lage der FFH-Schutzgebiete sowie den gebildeten Lebensraumklassen diskutiert. Es folgt die Abschätzung der Sensitivität der FFH-LRT gegenüber dem Klimawandel anhand ihrer Anteile an Kälte- und Feuchtezeigern an ihrem Artenspektrum sowie die Ergebnisse der Abschätzung der Sensitivität der FFH-LRT anhand weiterer Sensitivitätsindikatoren. Abschließend wird die Veränderung der abiotischen Variablen Temperatur und  $KWB_{\text{Veg}}$  beispielhaft anhand der FFH-Schutzgebiete „Drömling“ und „Graben-system Drömling“ betrachtet.

#### 3.5.3.1. Veränderung der klimatischen Wasserbilanz

Zur Beschreibung der Veränderung des Jahresmittels der klimatischen Wasserbilanz im Jahr ( $KWB_{\text{Jahr}}$ ) wird auf Kapitel 2.5.3.3 verwiesen. Die absoluten Ergebnisse der  $KWB_{\text{Jahr}}$  befinden sich in Anhang zu Kapitel 3.5. Insgesamt zeigt sich den Projektionen des Modells WETTREG nach unter allen Szenarien eine vorherrschend negative Entwicklung der  $KWB_{\text{Jahr}}$ , während das Modell REMO eine weniger trockene Entwicklung simuliert. Übereinstimmend zeigen jedoch beide Klimamodelle eine allgemeine Ausdehnung von Regionen mit einer negativen  $KWB_{\text{Jahr}}$  sowie eine Abnahme dieser zum Ende des Jahrhunderts im Inneren der Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes und der Ackerebenen. Diese Region ist in Abhängigkeit der Modelle und Szenarien räumlich unterschiedlich ausgeprägt und deckt sich in Teilen mit dem Mitteldeutschen Trockengebiet.

Die Differenz der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode ( $KWB_{veg}$ ) zeigt nach dem Modell WETTREG (Abb. 3.5.9) eine Zunahme der Trockenheit unter allen drei betrachteten Szenarien und Zeiträumen. Die stärksten Abnahmen treten dabei unter den Annahmen des Szenarios A2 auf, insbesondere im nördlichen Tiefland und im Harz. Nach dem Modell REMO (Abb. 3.5.10) zeigen sich dagegen für die Zukunft unterschiedliche Ergebnisse: Für den Zeitraum 2011-2040 wird unter allen drei Szenarien eine nur mäßig veränderte, teilweise sogar positive  $KWB_{veg}$  projiziert (in der Größenordnung von -50 mm bis 50 mm). Dies zeigt sich ebenfalls für den Zeitraum 2041-2070 unter den Szenarien A1B und B1. Unter dem Szenario A2 hingegen sind die Trends im selben Zeitraum regional bereits negativer, mit Werten unter -50 mm. Zum Ende des Jahrhunderts, gehen alle Projektionen des Modells REMO von einer flächendeckend negativen  $KWB_{veg}$  aus, ausgenommen das Szenario B1 im Zeitraum 2071-2100. Es ist weiterhin zu erkennen, dass vorübergehend bis in den Zeitraum 2041-2070 in Regionen wie den Ackerebenen, den Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes und Tieflandes eine positive Entwicklung der klimatischen Wasserbilanz erwartet werden kann. Insgesamt weist das Szenario B1 die geringsten Abnahmen der Klimatischen Wasserbilanz auf, während die stärksten Abnahmen unter Szenario A2 und A1B zu erwarten sind.

Da sich der Rückgang der klimatischen Wasserbilanz im Jahresmittel und der Vegetationsperiode vorwiegend flächenhaft zeigt, sind nahezu alle Schutzgebiete von dieser Veränderung betroffen (Abb. 3.5.7 bis Abb. 3.5.10). Jedoch sind über die regionalen Klimamodelle, Szenarien und Zeiträume hinweg Regionen erkennbar, welche im Vergleich zu anderen Regionen des Landes Sachsen-Anhalt durch einen besonders starken Rückgang der KWB charakterisiert sind:

- Region A: Die Altmark ist gekennzeichnet durch Abnahmen der klimatischen Wasserbilanz von -200 mm/Jahr bis -150 mm/Jahr, wobei stärkere Abnahmen im Nordosten und Nordwesten der Altmark auftreten.
- Region B: Kleinräumig, dafür jedoch von einem größeren Rückgang der klimatischen Wasserbilanz betroffen, ist zumeist der Harz in der Mittelgebirgsregion. Zugleich ist der Harz die Region mit den höchsten absoluten Werten der klimatischen Wasserbilanz in Sachsen-Anhalt (s. Anhang 3.5). Folglich wird diese Region zwar in der Zukunft trockener, bleibt jedoch vergleichsweise feucht.
- Region C: Eine weitere, durch eine starke Abnahme der klimatischen Wasserbilanz betroffene Region liegt als schmales Band südlich des Harzes und reicht, je nach zugrundeliegendem Modell, Szenario und Zeitraum, bis in die dortigen Ackerebenen und Lössgebiete. Der Rückgang in dieser Region bewegt sich im Bereich von ca. -50 mm/Jahr bis -150 mm/Jahr.
- Region D: Von der Elbaue im Osten des Landes bis in die Altmark sowie in Bereichen des Fläming betragen die Abnahmen um -50 mm bis -150 mm, mit den niedrigsten Abnahmen ab der 2. Hälfte des Jahrhunderts.



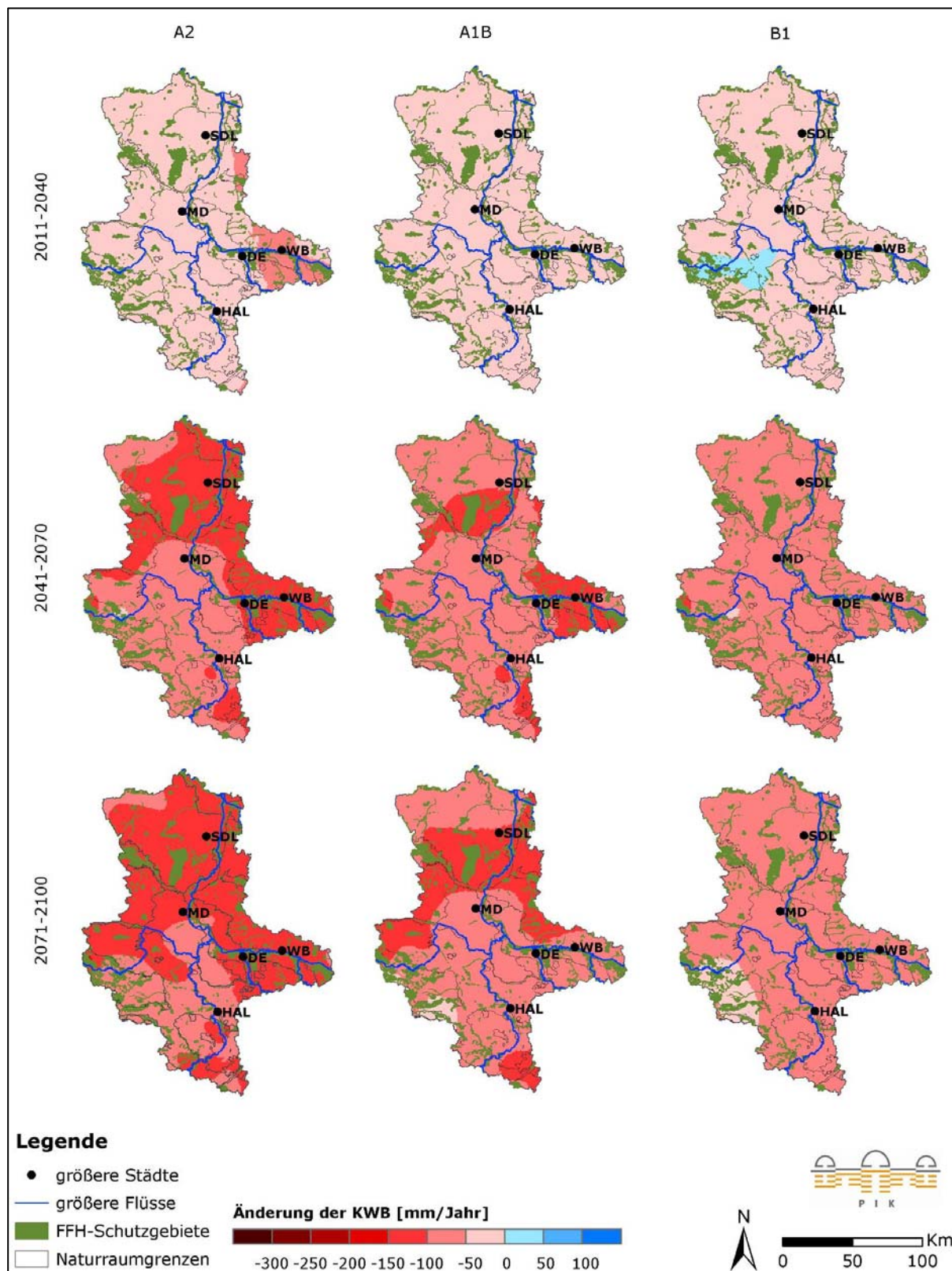
### 3.5.3.2. Potenzielle Gefährdung der FFH-Schutzgebiete aufgrund einer Veränderung der Klimatischen Wasserbilanz

Die Untersuchungen der  $KWB_{Jahr}$  und  $KWB_{veg}$  zeigen, dass tendenziell alle Naturräume Sachsen-Anhalts von einem Rückgang der klimatischen Wasserbilanz betroffen sind und somit potenziell die NATURA 2000-Schutzgebiete in diesen. Allerdings variieren die Veränderungen in Raum, Zeit und Intensität.

Einzig nicht von einer Abnahme der  $KWB_{Jahr}$  betroffen sind den Annahmen des Modells WETTREG nach unter dem Szenario B1 im Zeitraum 2011-2040 die FFH-Schutzgebiete im Nordosten des Mittelgebirges und den sich anschließenden nördlichen Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes. FFH-Schutzgebiete, in denen die stärksten Abnahmen der  $KWB_{Jahr}$  auftreten, befinden sich unter anderem in der Region des Harzes (z.B. das FFH-Schutzgebiet „Hochharz“) und im Süden der Ackerebenen sowie Fluss- und Niederungslandschaften (z.B. das FFH-Schutzgebiet „Weiße Elster“). Viele, teilweise auch kleinere Schutzgebiete, die durch die Abnahme der  $KWB_{Jahr}$  beeinträchtigt werden könnten, befinden sich im Osten des Landes oberhalb Wittenberge und der Elbe sowie im Umkreis des FFH-Schutzgebietes „Colbitz-Letzlinger Heide“ in der Altmark (beispielsweise Modell WETTREG, Szenarien A2 und A1B, Zeiträume 2041-2070, 2071-2100).

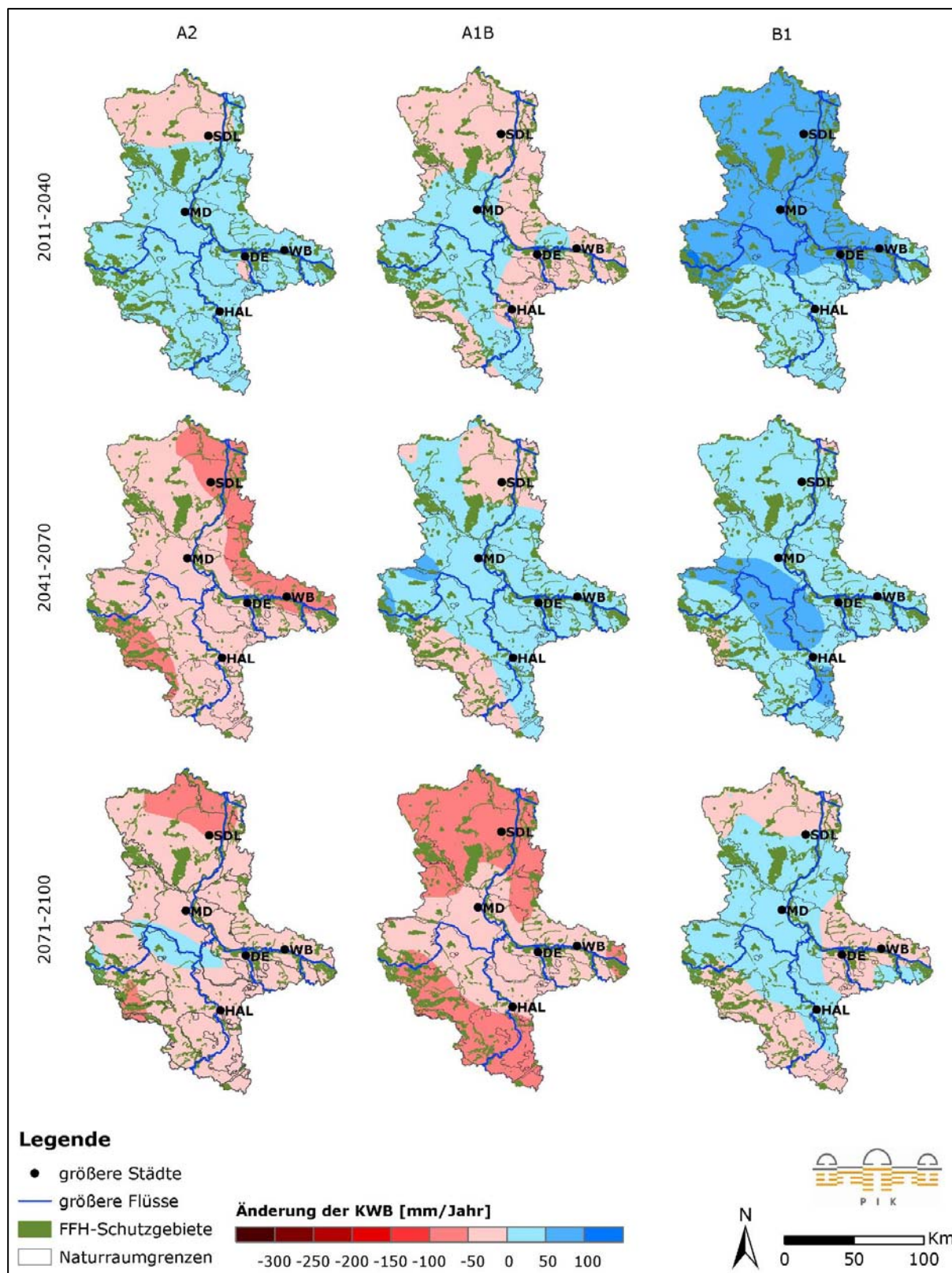
Nach den Projektionen des Modells REMO unter den Szenarien A1B und B1 ist die Mehrheit der FFH-Schutzgebiete ab dem Zeitraum 2071-2100 von einem Rückgang der  $KWB_{Jahr}$  betroffen, unter dem Szenario A2 ab dem Zeitraum 2041-2100. Unter dem Szenario A2 existieren im Zeitraum 2071-2100 einige Schutzgebiete, in welchen eine Zunahme der  $KWB_{Jahr}$  erwartet werden kann (z.B. das FFH-Schutzgebiet „Hakel“ südlich Kroppenstedt unterhalb des Verlaufs der Bode). Durch eine zunehmende Trockenheit könnten den Projektionen des Modells REMO nach über die Szenarien und Zeiträume hinweg betrachtet, vor allem Schutzgebiete in den südlichen Teilen der Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes, im Mittelgebirge sowie im Norden und Osten der Landschaften des südlichen Tieflandes beeinträchtigt sein.

Ein Rückgang der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode ( $KWB_{veg}$ ) tritt den Projektionen des Modells WETTREG nach in nahezu allen FFH-Schutzgebieten in Sachsen-Anhalt auf. Im Mittelgebirge zeigt sich eine besonders starke Abnahme der klimatischen Wasserbilanz, beispielsweise im FFH-Schutzgebiet „Hochharz“ (Rückgang der  $KWB_{veg}$  um mehr als -150 mm). Der Projektion des Szenario A2 zufolge werden FFH-Schutzgebiete Ende des Jahrhunderts in großen Teilen der Landschaften am Südrand des Tieflandes von einem Rückgang der  $KWB_{veg}$  um ca. -100 bis -150 mm betroffen sein. Das Modell REMO projiziert im Allgemeinen feuchtere Bedingungen als das Modell WETTREG, so dass unter den Projektionen des Modells REMO nicht in allen FFH-Schutzgebieten eine Abnahme der  $KWB_{veg}$  auftritt. Ein Anstieg der  $KWB_{veg}$  ist beispielsweise unter der Annahme des Szenarios A2 bis in den Zeitraum 2011-2040 in vielen FFH-Schutzgebieten zu verzeichnen. Dieser Trend könnte unter anderem im FFH-Schutzgebiet „Hohes Holz bei Eggenstedt“ oberhalb der Bode westlich von Magdeburg auftreten. Von einem abnehmenden Trend der  $KWB_{veg}$  unter dem Modell REMO in allen Szenarien und Zeiträumen scheinen FFH-Schutzgebiete im Süden der Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes betroffen zu sein, beispielsweise das Schutzgebiet „Zeitzer Forst“.

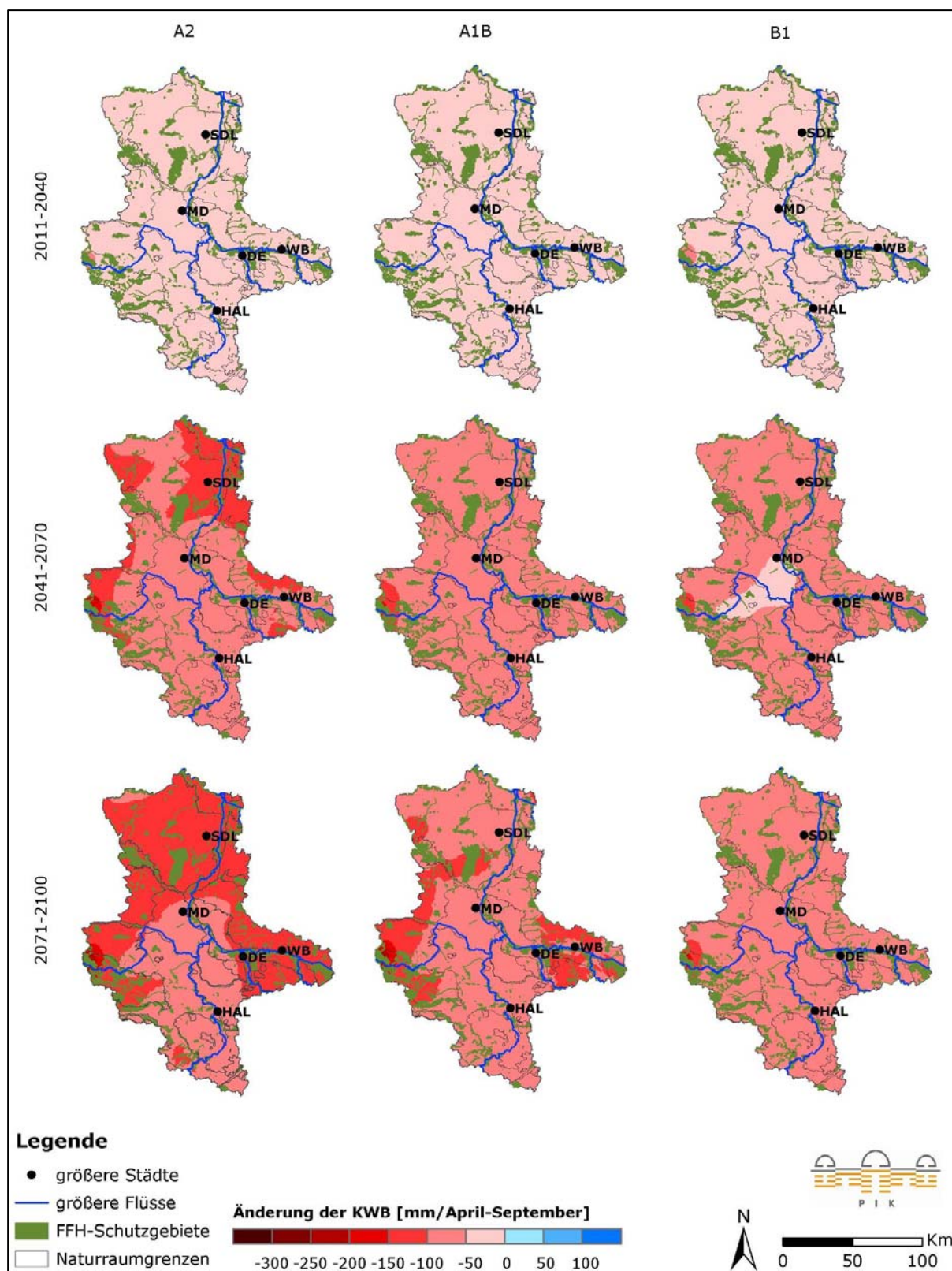


**Abb. 3.5.7: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) im Jahr und FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (Modell WETTREG, Szenarien A2, A1B, B1) als Differenz der Zeiträume 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 zu 1961-1990)**



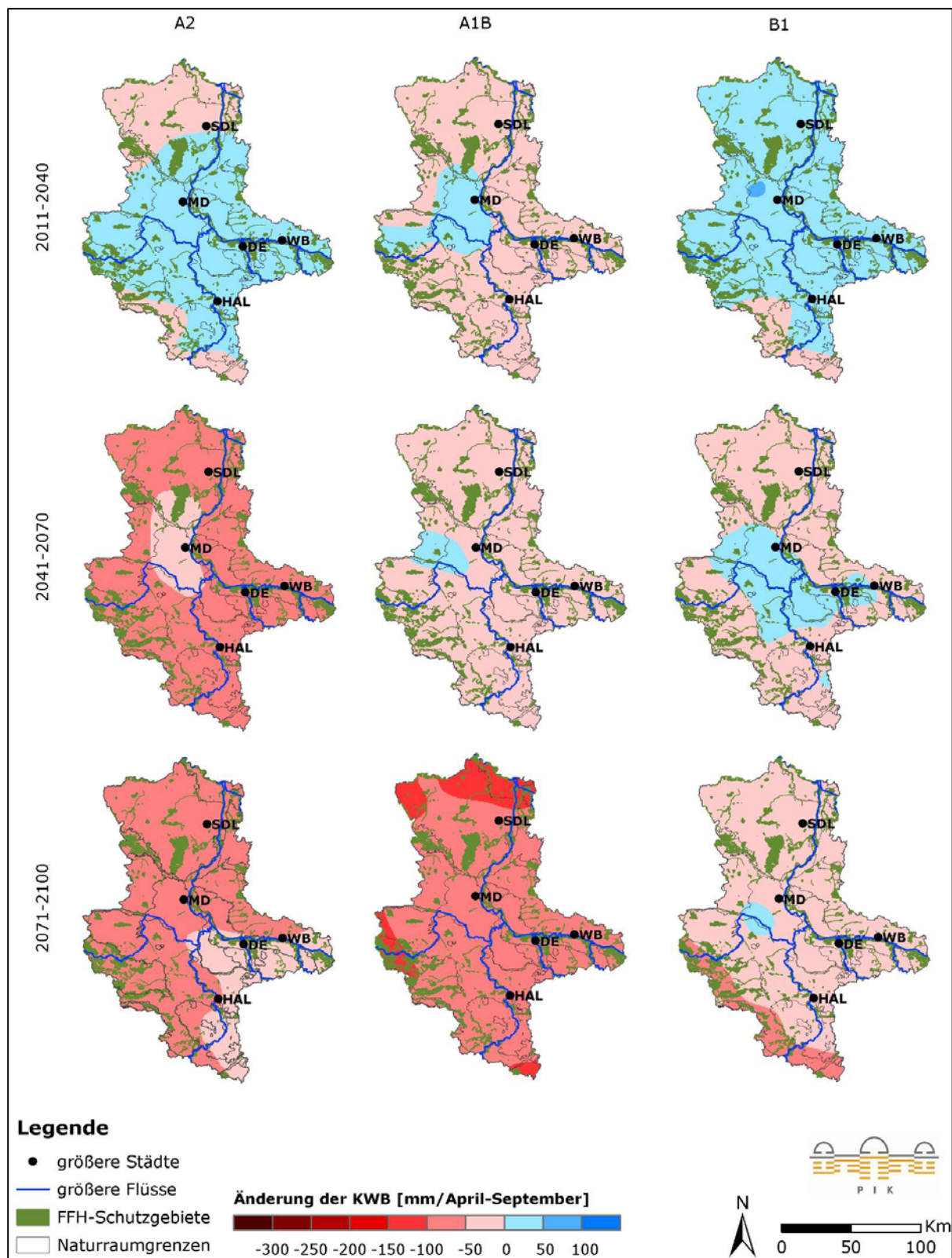


**Abb. 3.5.8: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) im Jahr und FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (Modell REMO, Szenarien A2, A1B, B1) als Differenz der Zeiträume 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 zu 1961-1990)**



**Abb. 3.5.9:** Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationsperiode (April-September) und FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (Modell WETTREG, Szenarien A2, A1B, B1) als Differenz der Zeiträume 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 zu 1961-1990)





**Abb. 3.5.10:** Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationsperiode (April-September) und FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (Modell REMO, Szenarien A2, A1B, B1) als Differenz der Zeiträume 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 zu 1961-1990)

### **Potenzielle Gefährdung der Lebensraum-Klassen aufgrund einer Veränderung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB)**

Im Folgenden konzentriert sich die Diskussion der potentiellen Gefährdung der Lebensräume (Lebensraumklassen) gegenüber einem Rückgang der Klimatischen Wasserbilanz aufgrund ihrer Lage innerhalb Sachsen-Anhalts auf die als vom negativen Trend der KWB besonders betroffen identifizierten Regionen A-D (siehe Kapitel 3.5.3.1).

**Gewässer und Feuchtwiesen** sind wasserabhängige Lebensräume und können daher als potenziell gefährdet gegenüber einem Rückgang der KWB und somit Wasserverfügbarkeit angesehen werden. Sie kommen häufig in den Regionen A-D vor. Die wenigen Vorkommen außerhalb dieser Regionen könnten möglicherweise als Rückzugs- oder Ausgangsgebiete für Ausbreitung und Wiederbesiedlung dienen. **Gras- und Grünlandschaften** sind zwar ebenfalls in den besonders vom Rückgang der KWB betroffenen Regionen A-D stark vertreten, kommen jedoch auch häufig außerhalb dieser vor.

**Moor- und Auenwälder** sind häufig in den Regionen A-D vertreten, vor allem in vergleichsweise großflächigen Schutzgebieten, beispielsweise im Harz, den Elbauen in der Altmark oder im Fläming im Osten Sachsen-Anhalts. Sie können in diesen Schutzgebieten daher als potenziell besonders vom Rückgang der KWB betroffen eingestuft werden. Die Lebensräume der übrigen **Wälder** sind aufgrund ihrer Lage innerhalb des Landes gegenüber einem Rückgang der KWB ähnlich potenziell hoch gefährdet wie die Moor- und Auenwälder. Jedoch ist das Vorkommen dieser Lebensraumklasse, im Gegensatz zu Moor- und Auenwäldern, durch ein breit gestreutes Vorkommen innerhalb des Landes charakterisiert. **Moore** kommen in vergleichsweise sehr wenigen FFH-Schutzgebieten vor und weisen Verbreitungsschwerpunkte innerhalb der besonders betroffenen Regionen auf. Entsprechend der räumlichen Ausprägung des negativen Trends der KWB sind Moore insbesondere im Harz und in der Altmark von dem Rückgang der KWB und somit der Wasserverfügbarkeit betroffen. Im FFH-Schutzgebiet „Hohes Holz bei Eggensted“ mit Vorkommen von Moorlebensräumen könnte hingegen den Projektionen des Modells REMO nach, in Abhängigkeit von dem zugrunde gelegten Szenario, bis Mitte des Jahrhunderts eine Zunahme der Klimatischen Wasserbilanz auftreten (s.a. Abb. 3.5.8 und Abb. 3.5.10).

**Heiden** sind ebenfalls recht häufig in großen Schutzgebieten in den Regionen A-D vertreten, beispielsweise im FFH-Schutzgebiet „Hochharz“ oder „Colbitz-Letzlinger Heide“. Insgesamt existieren jedoch weniger Schutzgebiete mit dieser Lebensraumklasse in Sachsen-Anhalt als beispielsweise Gewässer und Feuchtwiesen. **Felsen und Schutthal-den** kommen räumlich begrenzt im Mittelgebirge sowie in den südlichen Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes und der Ackerebenen vor. Eine Abschätzung der potenziellen Gefährdung dieses Lebensraumtyps, allein aufgrund einer sich verändernden klimatischen Wasserbilanz, ist nicht möglich. So können Höhlen für eine vegetationskundliche Betrachtung nur bedingt herangezogen werden, da sie vor allem geomorphologisch geprägt sind (LAU 2009c). Die Lebensraumklasse der Felsen und Schutthalden zeichnen sich durch einen sehr geringen Anteil an Feuchtezeigern aus (je unter 10 %, eigene Berechnung anhand der Zeigerwerte nach Ellenberg (1992), s.a. Abb. 3.5.11). Demnach wären sie bei alleiniger Betrachtung der klimatischen Wasserbilanz als eher weniger gefährdet einzustufen. Für eine Abschätzung der Gefährdung dieser Lebensraumklasse müssten daher in nachfolgenden Studien weitere Rahmenbedingungen untersucht werden.

### 3.5.3.3. Abschätzung der Sensitivität der FFH-Lebensraumtypen

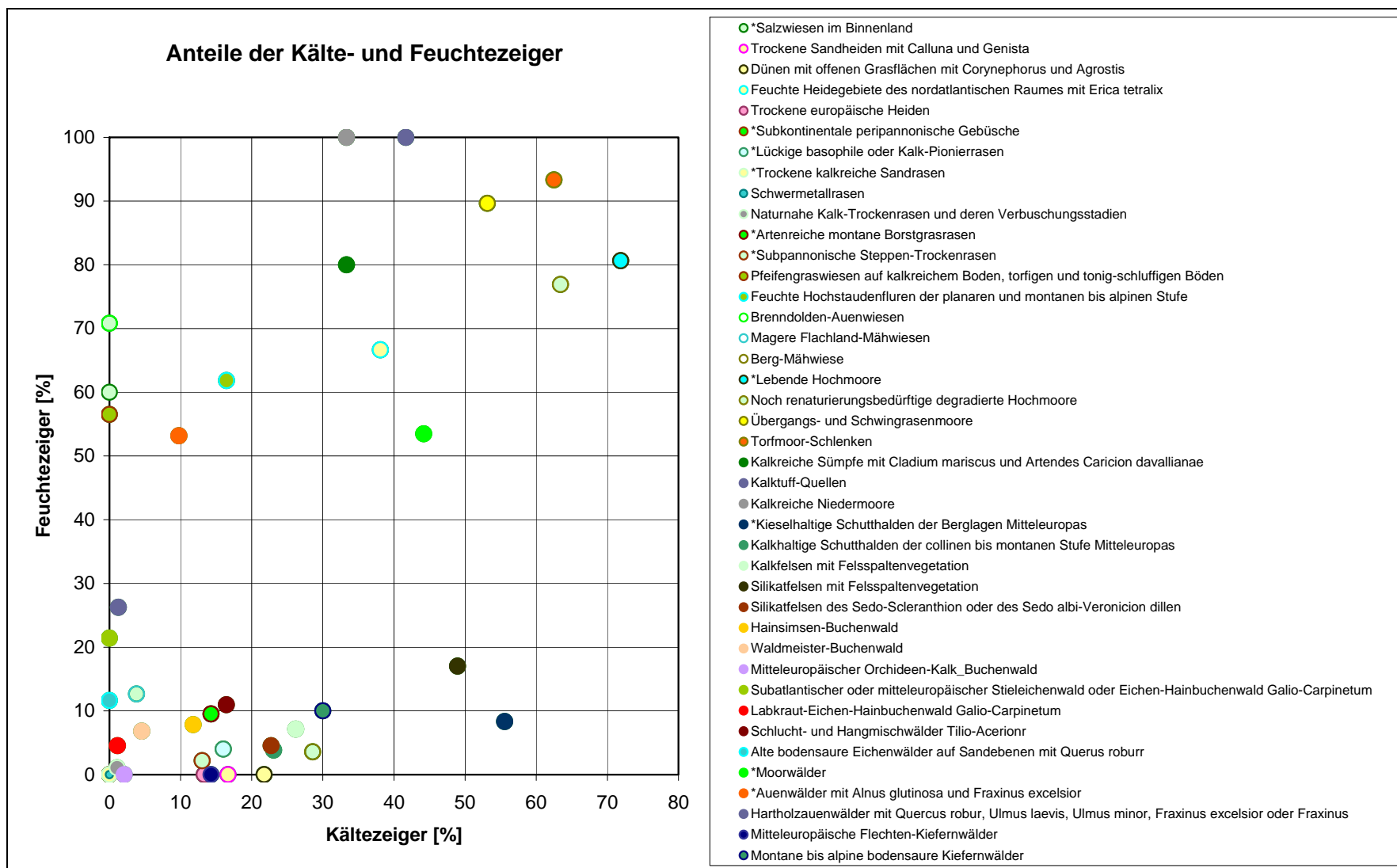
Im Folgenden wird zunächst näher auf die Ergebnisse der Anteile an Kälte- und feuchte-toleranten Pflanzen (ausgedrückt durch Kälte- und Feuchtezeiger) eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse der Abschätzung der Sensitivität der FFH-Lebensraumtypen (FFH-LRT) auf Basis weiterer Indikatoren beschrieben und diskutiert.

In Abb. 3.5.11 sind die Ergebnisse der Berechnung der Anteile **der Kälte- und Feuchtezeiger an den charakteristischen Arten von 41<sup>9</sup> FFH-LRT** des Offen- und Waldlandes dargestellt. Basierend auf den untersuchten Arten sind im Mittel 32 % der charakteristischen Arten eines FFH-LRT in Sachsen-Anhalt Kälte- oder Feuchtezeiger. Unter der Annahme, dass die FFH-LRT mit einem Anteil von jeweils über 50 % an Kälte- und Feuchtezeigern als vergleichsweise besonders klimasensitiv angesehen werden können, ist in Abb. 3.5.11 eine 50 %-50 %-Linie dargestellt. Oberhalb dieser befinden sich 16 der insgesamt 41 betrachteten FFH-LRT. Zu diesen 16 FFH-LRT zählen vier prioritär zu schützende FFH-LRT: „Salzwiesen im Binnenland“ (1340\*), „Lebende Hochmoore“ (7110\*), „Moorwälder“ (91D0\*) und „Auenwälder mit *Alnus glutinosa* und *Fraxinus excelsior*“ (91E0\*). Einen sehr hohen Anteil an Feuchtezeigern beherbergen die Hoch- und Niedermoore (7110\*, 7120, 7140, 7150, 7210\*, 7220\*, 7230 mit 77 bis 100 %), das naturnahe feuchte Grasland mit hohen Gräsern (6410, 6430, 6440 mit 57 bis 71 %) sowie feuchte Heidegebiete des nordatlantischen Raumes mit *Erica tetralix* (4010 mit 67 %); einen hohen Anteil an Kältezeigern beherbergen die sauren Moore mit *Sphagnum* (7120, 7210\*, 7110\*, 7140, 7150 mit 53 bis 72 %) und „Kieselhaltige Schutthalden der Berglagen Mitteleuropas“ (8150 mit 56 %). In den FFH-LRT „Salzwiesen im Binnenland“ (1340\*), „Subkontinentale peripannonische Gebüsche“ (40A0\*) und „Trockene, kalkreiche Sandrasen“ (6120\*) kommen, basierend auf den in der Analyse berücksichtigten Pflanzenarten, keine Kälte- und Feuchtezeigern vor.

Die Untersuchung der **Sensitivität von 49<sup>10</sup> FFH-LRT in Sachsen-Anhalt** gegenüber dem Klimawandel (Abb. 3.5.11) zeigt eine geringe bis sehr geringe Sensitivität für je 15 FFH-LRT, eine mittlere Sensitivität für 7 FFH-LRT, eine hohe für 7 FFH-LRT sowie eine sehr hohe Sensitivität für 5 FFH-LRT. Zu Letzteren zählen die FFH-LRT 3140 („Oligo- bis mesotrophe stehende Gewässer mit Vegetation der Littorellatea uniflorae und/oder der Isoeto-Nanojuncetea“), 4010 („Feuchte Heiden des nordatlantischen Raumes mit *Erica tetralix*“), 7110\* („Lebende Hochmoore“), 7120 („Noch renaturierungsfähige degradierte Hochmoore“) und 91D0\* („Moorwälder“). Nach derzeitigem Stand der Kartierung kommen diese besonders gefährdeten FFH-LRT beispielsweise in den FFH-Schutzgebieten „Jävenitzer Moor“ (FFH-LRT 4010 und 7120) sowie „Hochharz“ (FFH-LRT 7110\* und 7120) vor, wobei das „Jävenitzer Moor“ insgesamt nur sechs FFH-LRT aufweist und der Hochharz 14. Die Sensitivitätswerte aller FFH-LRT sind als Matrix in Tab. 3.5.2 zusammengefasst.

<sup>9</sup> \* s. Kap. 3.5.2.3

<sup>10</sup> \* s. Kap. 3.5.2.3.



**Abb. 3.5.11: Anteile der Kälte- und Feuchtezeiger nach (Ellenberg 1992) der lebensraum-charakteristischen Pflanzenarten am Artenspektrum der 41 untersuchten FFH-LRT (Lebensraumtypen nach Anhang I der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie; \*prioritäre FFH-LRT) in Sachsen-Anhalt**



**Tab. 3.5.2: Sensitivität der FFH-LRT gegenüber dem Klimawandel**

erweitert nach Petermann et al. (2007) (1-sehr gering, 2-gering, 3-mittel, 4-hoch, 5-sehr hoch; FFH-LRT = Lebensraumtypen nach Anhang I der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie in Sachsen-Anhalt; \* prioritäre FFH-LRT; ~ keine Daten; Sens\_K, Sens\_F - Sensitivität nach den Anteilen an Kälte- und Feuchtezeigern (Ellenberg 1992) im FFH-LRT)

FFH-LRT	Regenerierbarkeit	Arealgrenzen	auf Hochlagen beschränkt	Grundwasserabhängigkeit	Tendenz Fläche	Invasionen (Neobiota)	Erhaltungszustand atlantisch	Erhaltungszustand kontinental	Sens_T	Sens_F	Sensitivitätsklassen
2310	2	2	1	1	3	2	~	3	1	1	1
2330	2	2	1	1	3	2	~	3	1	1	1
1340	3	3	1	2	3	1	1	2	1	2	2
3130	3	2	2	3	3	1	~	2	~	~	4
3140	3	2	3	3	3	1	~	~	~	~	5
3150	2	1	2	3	2	3	2	1	~	~	2
3160	3	2	3	3	3	1	1	2	~	~	4
3180*	3	2	1	3	2	1	~	1	~	~	1
3190	3	2	1	3	2	1	~	1	~	~	1
3260	3	1	2	3	2	3	~	1	~	~	3
3270	2	2	2	3	2	3	~	2	~	~	4
4010	3	3	1	3	3	2	3	~	2	3	5
4030	2	1	3	1	3	2	2	3	1	1	2
40A0*	3	3	1	1	3	1	~	1	1	1	1
6110*	3	3	2	1	2	1	2	1	1	1	1
6120*	2	3	1	1	3	2	2	2	1	1	1
6130	3	2	2	1	2	1	2	2	1	1	1
6210	3	3	2	1	2	3	2	2	1	1	2
6230	2	2	2	2	3	1	~	3	1	1	2
6240	3	3	1	1	3	3	1	1	1	1	1
6410	2	1	2	3	3	1	~	3	1	2	2
6430	2	1	3	3	2	3	1	1	1	2	2
6440	2	3	1	3	3	1	~	2	1	3	3
6510	2	1	2	2	3	3	3	2	1	1	2
6520	2	3	2	2	3	1	~	1	1	1	1
7110*	3	2	3	3	3	1	~	~	3	3	5
7120*	3	2	3	3	2	2	~	3	2	3	5
7140*	3	1	3	3	3	2	3	1	2	3	4
7150	2	1	2	3	2	1	~	3	2	3	3
7210	2	2	2	3	3	1	3	3	2	3	4
7220	3	2	2	3	3	1	~	~	2	3	4
7230	3	1	3	3	3	1	1	2	2	3	3
8150	3	3	2	1	2	1	~	1	2	1	1
8160*	3	3	2	1	2	1	~	2	1	1	1
8210	3	3	3	2	2	1	~	1	1	1	2
8220	3	3	3	2	2	1	~	1	2	1	2
8230	3	3	3	1	3	1	1	1	1	1	1
9110	3	1	2	2	2	3	2	2	1	1	2
9130	3	1	2	2	2	3	2	2	1	1	2
9150	3	3	2	1	2	~	3	1	1	1	2
9160	3	1	2	3	2	3	2	2	1	1	2
9170	3	1	2	1	2	1	3	2	1	1	1
9180*	3	3	2	3	2	2	~	1	1	1	2
9190	3	1	1	2	3	2	~	2	1	1	1
9410	3	3	3	2	3	2	~	3	1	1	4
91D0*	3	2	3	3	3	~	3	1	2	2	5
91E0	3	1	2	3	3	3	1	2	1	2	3
91F0	3	2	1	3	3	3	~	2	1	1	3
91T0	3	3	1	1	3	3	3	3	1	1	3

### FFH-Schutzgebiete Drömling und Grabensystem Drömling

Die FFH-Schutzgebiete befinden sich im Nordwesten Sachsen-Anhalts (Abb. 3.5.12). Sie bestehen u. a. aus Fließgewässern (FFH-LRT 3260), Naturnahem feuchtem Grasland mit hohen Gräsern (FFH-LRT 6430), Mesophilem Grünland (FFH-LRT 6510) sowie Waldlebensräumen (FFH-LRT 9160 und 91E0\*).



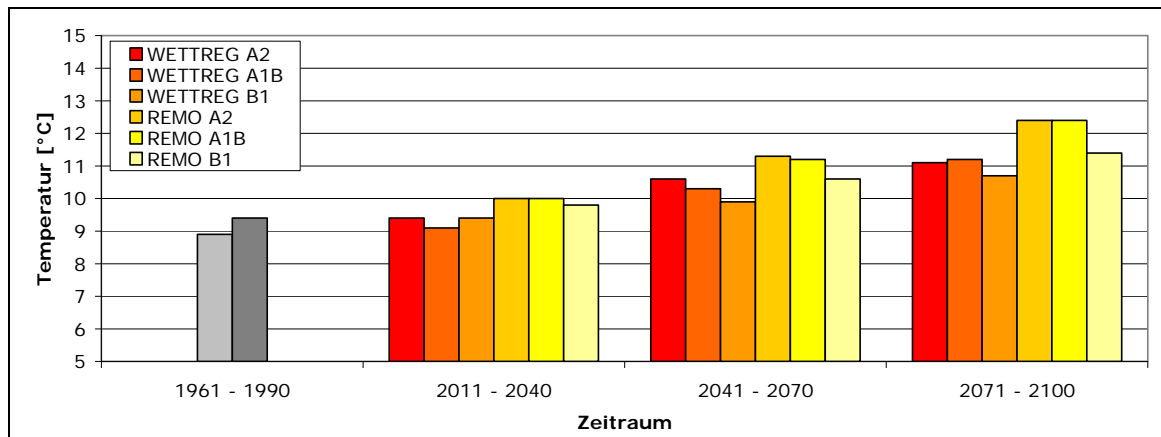
**Abb. 3.5.12: FFH-Schutzgebiete „Drömling“ und „Grabensystem Drömling“ mit analysierter WETTREG-Station und REMO-Gittermittelpunkt (links) sowie Lage der FFH-Schutzgebiete in Sachsen-Anhalt (rechts)**

Die zukünftigen klimatischen Veränderungen bzw. Veränderungen der abiotischen Faktoren in den FFH-Schutzgebieten „Drömling“ und „Grabensystem Drömling“ werden exemplarisch anhand der Tagesmitteltemperatur im Jahr sowie der KWB in der Vegetationsperiode<sup>11</sup> als kritischem Zeitraum der Wasserverfügbarkeit für das Pflanzenwachstum untersucht. Basis sind die Klimadaten der Modelle WETTREG und REMO der jeweils nächstgelegenen Station bzw. dem Gittermittelpunkt (Abb. 3.5.12). Die Ergebnisse der klimatischen Analyse der FFH-Schutzgebiete „Drömling“ und „Grabensystem Drömling“ sind in Abb. 3.5.13 und Abb. 3.5.14 dargestellt. Die Tagesmitteltemperatur steigt demnach zum Ende des Jahrhunderts von 8,6°C auf 11,2°C (Modell WETTREG) bzw. von 9,4°C auf 12,4°C (Modell REMO). Der Anstieg ist mit 3,0°C nach dem Modell REMO stärker als nach dem Modell WETTREG (2,6°C). Die KWB zeigt nach den Projektionen beider Modelle in Zukunft einen negativen Trend. Sie sinkt auf bis zu ca. -250 mm (Modell WETTREG, Szenario A2) bzw. -200 mm (Modell REMO, Szenario A1B). Diese Entwicklung verläuft nach dem Modell WETTREG stärker (szenarienabhängig -81 mm - -124 mm Differenz gegenüber -22 mm - -90 mm Differenz zwischen 1961-1990 und 2071-2100). Die Veränderungen der Temperatur und der Klimatischen Wasserbilanz verstärken sich ab der Mitte des Jahrhunderts, insbesondere unter dem Szenario A2.

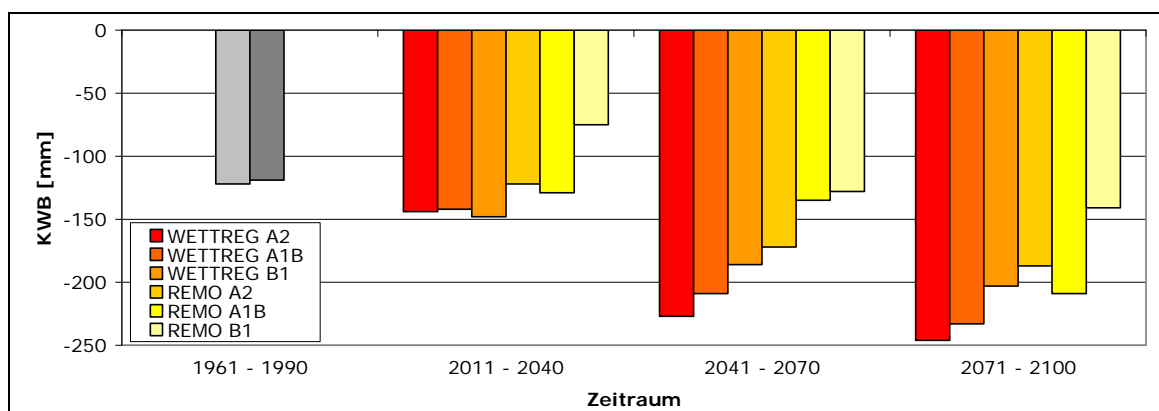
Den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse nach (Tab. 3.5.2), weisen die fünf FFH-LRT des FFH-Schutzgebietes „Drömling“ insgesamt geringe bis mittlere Sensitivitäten gegenüber dem Klimawandel auf (Tab. 3.5.2). Dies spricht für eine mittlere bis geringe Gefährdung des FFH-Schutzgebietes im Vergleich zu anderen. Jedoch befindet sich der „Drömling“ in einer Region mit sinkender KWB in der Vegetationsperiode und im Jahr (s. Abb. 3.5.7 bis

<sup>11</sup> April-September

Abb. 3.5.10 sowie Abb. 3.5.13 bis Abb. 3.5.14) und ansteigender Jahresmitteltemperatur (s. Kap. 2.5.). Dies kann die Standortbedingungen für feuchte- und kältesensitive Arten nachteilig beeinflussen. So weisen die FFH-LRT 6430 und 91E0\* einen hohen Anteil an Kälte- und Feuchtezeigern am charakteristischen Artenspektrum auf (62 % und 53 %, vgl. Abb. 3.5.11). Sie können daher als besonders sensitiv gegenüber zunehmender Trockenheit und Temperatur angesehen werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen ist es wahrscheinlich, dass sich der Artenbestand der FFH-LRT 6430 und 91E0\* in den FFH-Schutzgebieten „Drömling“ und „Grabensystem Drömling“ bis zum Ende dieses Jahrhunderts verändern wird.



**Abb. 3.5.13: Entwicklung der Tagesmitteltemperatur [°C] in den FFH-Schutzgebieten „Drömling“ und Grabensystem Drömling (Basiszeitraum 1961-1990 der Modelle WETTREG (hellgrau) und REMO (dunkelgrau))**



**Abb. 3.5.14: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationsperiode (April-September) in den FFH-Schutzgebieten „Drömling“ und Grabensystem Drömling (Basiszeitraum 1961-1990 der Modelle WETTREG (hellgrau) und REMO (dunkelgrau))**

### 3.5.4. Zusammenfassung und Diskussion

Die Abschätzung der potentiellen Gefährdung der FFH-Schutzgebiete und FFH-Lebensräume in Sachsen-Anhalt zeigt, dass nahezu alle der flächenhaft in Sachsen-Anhalt verteilten FFH-Schutzgebiete potenziell von dem überwiegend flächenhaften Rückgang der KWB betroffen sind. Die Tendenz ist nach dem Modell WETTREG stärker als nach dem Modell REMO, welches vorübergehend noch Zunahmen von zumeist bis zu 50 mm im Jahr projiziert. Der Rückgang innerhalb der Vegetationsperiode als Schlüsselzeitraum für die Entwicklung und das Wachstum der Pflanzen (Sitte et al. 1999) ist besonders kritisch einzustufen.

Die Lebensraumklassen Feuchtwiesen, Gewässer, Heiden, Moore, Moor- und Auenwälder und Wälder haben viele Vorkommen in Regionen mit einem besonders starken Rückgang der Klimatischen Wasserbilanz im Jahr sowie innerhalb der Vegetationsperiode (April-September) und können daher als potenziell gefährdet angesehen werden. Gras- und Grünlandschaften kommen zwar häufig in diesen Regionen vor, weisen jedoch ebenso ein breit gestreutes Vorkommen außerhalb dieser Gebiete auf, so dass der besonders starke Rückgang der KWB wahrscheinlich nicht alle Gras- und Grünlandschaften betreffen wird. In Regionen mit Felsen und Schutthalden nimmt die Klimatische Wasserbilanz zwar ebenfalls ab, jedoch ist dieser Lebensraum eher geomorphologisch geprägt, so dass an dieser Stelle keine Aussage zur potenziellen Auswirkung des Klimawandels getroffen werden kann.

Basierend auf verschiedenen Sensitivitätsfaktoren stellen sich fünf der 49 untersuchten, in Sachsen-Anhalt vorkommenden FFH-LRT als besonders sensitiv heraus: 3140 („Oligo bis mesotrophe stehende Gewässer mit Vegetation der Littorellatea uniflorae und/oder der Isoeto-Nanojuncetea“), 4010 („Feuchte Heiden des nordatlantischen Raumes mit *Erica tetralix*“), 7110\* („Lebende Hochmoore“), 7120 („Noch renaturierungsfähige degradierte Hochmoore“) und 91D0\* („Moorwälder“).

Darüber hinaus weisen einige FFH-LRT besonders hohe Anteile an Kälte- und Feuchtezeigern am charakteristischen Artenspektrum des FFH-LRT auf, beispielsweise 7110\* („Lebende Hochmoore“) und 7120 („Noch renaturierungsfähige degradierte Hochmoore“), sodass diese aufgrund ihrer Ausprägungen gemäß Kartieranleitung (LAU 2009b, a) als potenziell gefährdet angesehen werden können. Laut Kartieranleitung wird durch die Vollständigkeit des Artenspektrums eines Lebensraumtyps seine Ausprägung ermittelt. Es wird hierbei zwischen charakteristischen Pflanzenarten und lebensraumtypkennzeichnenden Pflanzenarten unterschieden. Letztere sind Teil der charakteristischen Arten, mit dem Unterschied, dass ein Vorkommen dieser auf bestimmte Vegetationseinheiten, die dem jeweiligen Lebensraumtyp zuzuordnen sind, konzentriert ist. Auch führt das Vorkommen dieser Arten zu einer Aufwertung des jeweiligen Lebensraumtyps (LAU 2009b, a). Beispielsweise wird in Bezug auf die Zuordnung zum FFH-LRT „Moorwälder“ (91D0\*) das Kriterium des Vorkommens von sechs bis mindestens einer der kennzeichnenden Arten gesetzt. Insgesamt kommen in diesem Lebensraumtyp acht kennzeichnende Arten vor, von denen fünf Kälte- oder Feuchtezeiger darstellen. Es ist möglich, dass einige dieser Arten des FFH-LRT „Moorwälder“ im Laufe des Jahrhunderts aufgrund klimatischer Veränderungen in Zukunft in bestimmten FFH-Schutzgebieten nicht mehr vorkommen und dass dann in diesen Schutzgebieten der derzeitige Zustand des Artenspekt-

ums des FFH-LRT nicht mehr zu erhalten ist. In den „Salzwiesen im Binnenland“ (1340\*), „Subkontinentalen peripannonischen Gebüsch“ (40A0\*) und „Trockenen, kalkreichen Sandrasen“ (6120\*) befinden sich hingegen nach der vorliegenden Analyse keine temperatur- und feuchtesensitiven Arten. Sie sind somit potentiell weniger durch den Rückgang der KWB unter Klimawandel gefährdet und kommen u.a. in den FFH-Gebieten „Landgraben-Dumme-Niederung nördlich Salzwedel“ (1340\*) und „Elbaue zwischen Saalemündung und Magdeburg“ (6120\*) vor.

Veränderungen im Artenspektrum der in der vorliegenden Analyse berücksichtigten FFH-Lebensräume können jedoch nicht nur die Lebensräume selbst nachhaltig verändern. Vielmehr können sich diese Veränderungen auch negativ auf die Vorkommen der an diese Lebensräume gebundenen Tierarten auswirken.

Dieser Aspekt ist insbesondere relevant, da sich FFH-Schutzgebiete z.T. räumlich mit Schutzgebieten nach der Vogelschutz-Richtlinie überlagern. Denn obwohl Tiere sich im Allgemeinen durch eine hohe Mobilität auszeichnen, sind einige Nahrungsspezialisten von Vorkommen bestimmter Pflanzenarten oder Ökosysteme abhängig. Tierarten waren jedoch nicht Gegenstand dieser Analyse, sodass an dieser Stelle keine differenzierte Aussage getroffen werden kann.

Der Naturschutz steht in Wechselwirkung mit anderen Sektoren und hat ähnlich der Ressource Boden sektorübergreifende Relevanz. Der Zusammenhang zwischen Moor-, Boden- und Klimaschutz ist in Kapitel 3.2. bereits diskutiert worden. Neben Synergien zwischen den Sektoren können auch Nutzungskonflikte auftreten. Zwischen dem Naturschutz und der Land-, Forst- und Wasserwirtschaft können sie u.a. hinsichtlich der Flächennutzung und der Ressource Wasser entstehen, beispielsweise durch die Freigabe von naturschutzfachlich wertvollen Flächen als Überflutungsflächen im Rahmen des vorsorgenden Hochwasserschutzes (Zebisch et al. 2005; AG KW 2009). Konflikte zwischen Naturschutz und Landwirtschaft können durch Düngung landwirtschaftlicher Flächen entstehen, wodurch nach Starkregenereignissen eine verstärkte Auswaschung von Stoffen in Gewässer und Grundwasser erfolgen kann. Darüber hinaus kann das Einführen neuer Arten für die Landwirtschaft den Schutz des einheimischen Artenspektrums gefährden. Diese möglichen Nutzungskonflikte zeigen auch, dass Lebensräume, wie die in den näher untersuchten FFH-Schutzgebieten „Drömling“ und „Grabensystem Drömling“ (s. Kap. 3.5.3.3), weiteren denn klimatischen Stressoren ausgesetzt sein könnten. Zusätzliche Stressoren neben dem Klimawandel können die Widerstandskraft der Arten, die den Einflüssen des Klimawandels für sich genommen noch standhalten könnten, zusätzlich schwächen und deren Verschwinden aus Lebensräumen wie den FFH-Schutzgebieten im Drömling begünstigen.

Die Einwanderung und Ausbreitung von (nicht)heimischen Arten, wie Feuerlibelle (*Crocothemis erythraea*), Bienenfresser (*Merops apiaster*), Gemeiner Holzbock (*Ixodes ricinus*), Robinie (*Robinia pseudoacacia*) Riesen-Bärenklau (*Heracleum mantegazzianum*) oder Beifußblättriges Traubenkraut (*Ambrosia artemisiifolia*) sind bereits zu beobachten. Einige dieser Arten, jedoch nicht alle, können neben der Gefährdung von Schutzgütern des Naturschutzes, beispielsweise Veränderung des Artenspektrums eines Lebensraumes, auch zu Problemen für die menschliche Gesundheit führen. Dies trifft u.a. auf den Ge-

meinen Holzbock zu, dessen Ausbreitung zur Verbreitung der Lyme-Borreliose und Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME) führt. Die klimatisch bedingte Verlängerung der Pollensaison des hoch allergenen Beifußblättrigen Traubenkrauts oder die Ausbreitung des Riesen-Bärenklau, welcher phototoxische Reaktionen hervorrufen kann, sind ebenso bedeutend für den Naturschutz als auch für den Gesundheitssektor (BfN 2009b).

### 3.5.5. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf

Neben den diskutierten klimatischen Einflüssen auf Schutzgüter existieren weitere Einflussfaktoren, welche im Rahmen dieser Studie nicht untersucht wurden. So können beispielsweise Eingriffe anthropogener oder natürlicher Art Lebensräume (z.B. durch Landnutzungswandel, Habitatzerschneidung oder das (un)beabsichtigte Einbringen fremder Arten) negativ beeinträchtigen (Hoffmann 1995; Sala et al. 2000; Lozán et al. 2008; MLU 2009).

Des Weiteren konnten komplexe Wechselwirkungen innerhalb von Lebensräumen, wie Nahrungsketten, Konkurrenz-, Räuber-Beute- oder symbiotische Beziehungen, Verschiebungen in der Phänologie oder die Erhaltung der Bereitstellung von Serviceleistungen für den Menschen im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet werden. Für eine erste Abschätzung der potentiellen Gefährdung der Natur in Sachsen-Anhalt am Beispiel der FFH-Schutzgebiete und deren Lebensräume ist die Veränderung der Klimatischen Wasserbilanz als zentrale Größe des Wasserhaushaltes jedoch ein guter Indikator, insbesondere für feuchtesensitive Lebensräume wie Moore, Auenwälder oder Feuchtwiesen, ebenso die angewendeten Sensitivitätsindikatoren (Schlumprecht et al. 2005; Petermann et al. 2007).

Zukünftige Studien können darüber hinaus weitere Informationen zu FFH-Schutzgebieten und FFH-LRT einbeziehen, wie sie beispielsweise von der derzeit in Sachsen-Anhalt laufenden Kartierung der Wald- und Offenlandlebensraumtypen nach Anhang I der FFH-RL zu erwarten sind. Sie liefert unter anderem Informationen zur Lage und den Flächenanteilen der FFH-Lebensraumtypen in Schutzgebieten sowie zu ihren lebensraumtypischen Arten, einschließlich der Dominanz der Arten in den FFH-LRT.

Monitoringprogramme ermöglichen ein frühzeitiges Erkennen von Veränderungen und eine Attributierung zu einflussnehmenden Faktoren wie klimatischen Veränderungen. Diese können auf der Ebene von Lebensräumen bis hin zur Artebene durchgeführt werden. Für die Analyse der Verbreitungsänderungen von Arten können komplexe Modelle unter Einbeziehung der biologischen und klimatischen Rahmenbedingungen einer Art- oder Artengemeinschaft angewandt werden (z.B. Thuiller et al. 2005; Thuiller et al. 2006; Pompe et al. 2008), welche jedoch im Rahmen dieser Studie nicht verwendet werden konnten. Für die Modellierung der Verbreitung von Arten könnte jedoch für sehr regionale Aussagen die räumliche und zeitliche Auflösungsgrenze der Klimamodelle ein limitierender Faktor sein.



### 3.5.6. Anpassungsoptionen

Zwar wird der Klimawandel sichtbare Folgen für die Biodiversität in den bestehenden Ökosystemen (BfN 2004; BfN 2006) nach sich ziehen, dennoch gibt es Anpassungsoptionen, von denen Box 3.5.1 einige auflistet. Anpassungsmöglichkeiten hängen jedoch auch von den naturschutzfachlichen Prioritäten für die einzelnen Schutzgebiete sowie der Art und Weise der regionalen Einwirkungen des Klimawandels ab. Aufgrund bestehender Unsicherheiten sollten Anpassungsmaßnahmen möglichst flexibel gestaltet werden.

#### *Box 3.5.1: Anpassungsempfehlungen*

Der Klimawandel beeinflusst bestehende Lebensräume in ihrer Vitalität und inneren Vielfalt. Anpassungsempfehlungen für den Naturschutz wären daher:

- Monitoring des Zustandes und der Veränderungen von Lebensräumen und des Klimas, um Veränderungen rechtzeitig zu erkennen und ggf. gegensteuern zu können sowie für wissenschaftliche Untersuchungen
- Stärkung der Vernetzung von Lebensräumen, ggf. Verlegung von Korridoren, um die Abwanderungsbewegung in günstigere Habitate zu unterstützen
- Wiedervernässung von Feuchtlebensräumen
- Erhöhung der Widerstandsfähigkeit von Lebensräumen
- Besonderer Schutz von endemischen und regional bedeutsamen Lebensräumen und Arten
- Verminderung anthropogener Eingriffe in Lebensräume zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit von Ökosystemen
- Nachhaltige Ausführung von Kompensationsmaßnahmen
- Verminderung von Nutzungskonkurrenzen mit anderen Sektoren
- Stärkung von Synergien bezüglich Anpassungsmaßnahmen zwischen Sektoren sowie innerhalb des Naturschutzsektors
- Schutzziele auf Umsetzbarkeit unter dem Einfluss des Klimawandels überprüfen und ggf. Alternativkonzepte entwickeln

*Box 3.5.2: Weiterführende Informationen zum Naturschutzsektor*

**„Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel - Risiken und Handlungsoptionen“**

Untersucht wurden deutsche NATURA 2000-Schutzgebiete mittels Methoden der statistischen und prozessbasierten Simulation von Klimawirkungen. Ziel war es, zu prüfen, inwieweit die jeweiligen Schutzziele erreicht werden können und um Handlungsoptionen zu entwickeln.

**Projektlaufzeit:** 2006-2009

**Gefördert durch:** Bundesamt für Naturschutz (BfN)

**Link:** <http://www.pik-potsdam.de/infothek/klimawandel-und-schutzgebiete> sowie [http://www.pik-potsdam.de/research/research-domains/earth-system-analysis/backups/biodiversity\\_old/schutzgebiete](http://www.pik-potsdam.de/research/research-domains/earth-system-analysis/backups/biodiversity_old/schutzgebiete)

**Projektverbund:** Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (Koordination), Umweltforschungszentrum Halle (UFZ), Johannes-Gutenberg Universität zu Mainz, Fachhochschule Eberswalde

**Ansprechpartner:** Prof. Dr. Wolfgang Cramer, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

**„Entwicklung von Anpassungsstrategien seitens des Naturschutzes zum Erhalt hochgradig durch den Klimawandel gefährdeter Lebensgemeinschaften“**

**Gefördert durch:** Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) (AZ 25874/)

**Projektlaufzeit:** März 2008 bis Februar 2014

**Projektverbund:** Landschaftsstation im Kreis Höxter e. V. (Koordination), Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Halle (UFZ), Hochschule Ostwestfalen-Lippe (FH), FB 9, Höxter, Naturschutzzentrum Märkischer Kreis, Lüdenscheid

**Link:** <http://www.klimawandel-projekte.de/kontakt/>

**Ansprechpartner:** Dr. Burkhard Beinlich, Landschaftsstation Kreis Höxter

**The Economics of Ecosystems and Biodiversity – TEEB (Die Ökonomie von Ökosystemen und der Biodiversität)**

Der Sachstandsbericht wurde von TEEB, einem globalen Projekt zur Untersuchung der ökonomischen Aspekte von Ökosystemen und Biodiversität, veröffentlicht und unterstreicht die Relevanz von Investitionen in die Wiederherstellung und Erhaltung von Ökosystemen und deren Leistungen sowohl für die Bekämpfung des Klimawandels als auch für die Stärkung der Widerstandskraft gegenüber Klimaänderungen anfälliger Wirtschaftssysteme.

**Link:** <http://www.teebweb.org/LinkClick.aspx?fileticket=L6XLPaoaZv8%3d&tabid=1052&language=en-US> (deutsche Kurzfassung: [http://www.bmu.de/naturschutz\\_biologische\\_vielfalt/downloads/doc/44861.php](http://www.bmu.de/naturschutz_biologische_vielfalt/downloads/doc/44861.php))

**Gefördert durch:** Umweltprogramm der Vereinten Nationen, Europäische Kommission, Bundesumweltministerium Deutschland, Department for Environment, Food and Rural Affairs der britischen Regierung

**„ATEAM - Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling“**

Ziel war die Untersuchung der Vulnerabilität anthropogener, an Ökosystemfunktionen gebundener Stakeholder gegenüber dem Globalen Wandel und die Abschätzung der Vulnerabilität von Ökosystemfunktionen gegenüber dieser Veränderung.

**Gefördert durch:** EU, Projekt Nr. EVK2-2000-00075, 5. Rahmenprogramm, Programm der Europäischen Kommission, 2001 –2003.

**Laufzeit:** 2001-2003

**Projektverbund:** zahlreiche Institutionen, Koordination durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

**Kontakt:** <http://www.pik-potsdam.de/ateam/ateam.html>

**„ALARM- Assessing Large scale Risk for biodiversity with tested Methods“**

Im Fokus stehen ein besseres Verständnis der Biodiversität und der Funktionsweise von terrestrischen sowie Süßwasserökosystemen, mit dem Ziel der Einschätzung und Prognose der Veränderungen in der Biodiversität und dieser Ökosysteme selbst.

**Gefördert durch:** EU 6<sup>th</sup> Framework Programme, Sub-Priority 6.3 (GOCE-CT-2003-506675)

**Laufzeit:** Februar 2004 – Januar 2009

**Projektverbund:** Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle Abt.

Biozönoseforschung (Projektleitung), Georg-August-Universität Göttingen, Universität Hannover, Sustainable Europe Research Institute, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Universität Wien, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Universität Bern, OLANIS Expertensysteme GmbH, L.U.P.O. GmbH

**Kontakt:** <http://www.alarmproject.net/alarm/>

**Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme**

Die Studie dokumentiert den Kenntnisstand zum Globalen Wandel, insbesondere jedoch dem Klimawandel, in Deutschland. Darüber hinaus werden zukünftige Auswirkungen des Globalen Wandels auf sieben klimasensitive Bereiche (Wasser-, Land-, Forstwirtschaft, Biodiversität/Naturschutz, Gesundheit, Tourismus und Verkehr) analysiert sowie Anpassungsmöglichkeiten erörtert.

**Gefördert durch:** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

**Koordination:** Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) e.V.

**Autoren:** Marc Zebisch, Torsten Grothmann, Dagmar Schröter, Clemens Haße, Uta Fritsch, Wolfgang Cramer

**Link:** <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2947.pdf>

**„Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora“**

Aufklärung der Klimasensitivität der in Deutschland vorkommenden wildwachsenden Farn- und Blütenpflanzen auf der Basis von modellierten und beobachteten Arealverschiebungen. Damit sollen u.a. erste Grundlagen für die naturschutzfachliche Bewertung und die Ableitung von Handlungsmöglichkeiten gelegt werden.

**Gefördert durch:** Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Förderkennzeichen 805 81 001)

**Laufzeit:** September 2005 – Juli 2008

**Projektverbund:** Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle, Abt. Biozönoseforschung (Projektleitung), Universität Bayreuth, Institut für Geobotanik, Lehrstuhl für Pflanzenökologie, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Leibniz Universität Hannover, Institut für Geobotanik

**Kontakt:** Dr. Ingolf Kühn (UFZ), Kontakt: [ingolf.kuehn@ufz.de](mailto:ingolf.kuehn@ufz.de), Frank Klingenstein (BfN), [frank.klingenstein@bfm.de](mailto:frank.klingenstein@bfm.de)

### 3.5.7. Literatur

- AG KW (2009): "Abschlussbericht der Unter-Arbeitsgruppe „Modellregionen“." Arbeitsgruppe Klimawandel Sachsen-Anhalt (AG KW) (Hrsg.). Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, . Halle/Saale.
- Berry, P., Dawson, TP, Harrison, PA, Pearson, RG (2002): "Modelling potential impacts of climate change on the bioclimate envelope of species in Britain and Ireland." *Global Ecology And Biogeography* 11(6): 453-462.
- BfN - Bundesamt für Naturschutz (2004): "Daten zur Natur 2004. Hintergrundinformation zur Pressekonferenz." Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.).  
[http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/hintergrundinfo\\_dzn\\_2004.pdf](http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/hintergrundinfo_dzn_2004.pdf).
- BfN - Bundesamt für Naturschutz (2006): "Biologische Vielfalt und Klimawandel- Gefahren, Chancen und Handlungsoptionen." BfN-Skripten. H. Korn, Epple, C. (Hrsg.).  
<http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript148.pdf>
- BfN (2009a): "Natura 2000-Gebietsmeldungen in Deutschland." Umweltbundesamt (UBA), . Letzter Zugriff am: 09.11.2009 2009, <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2861>.
- BfN (2009b): "Neoflora - Invasive gebietsfremde Pflanzen in Deutschland " Bundesamt für Naturschutz, BfN. Letzter Zugriff am: 09.11.2009 2009,  
<http://www.floraweb.de/neoflora/>.
- Ellenberg, H. (1992): "Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa." Verlag Erich Goltze. Göttingen.
- Hoffmann, J. (1995): "Einfluss von Klimaänderungen auf die Vegetation von Kulturlandschaften." *Angewandte Landschaftsökologie* Heft 4: 191-211.
- Holsten, A. (2007): "Ökologische Vulnerabilität von Schutzgebieten gegenüber Klimawandel – exemplarisch untersucht für Brandenburg." Institut für Geowissenschaften. Tübingen, Universität Tübingen: 135 S.
- IPCC (2007): "Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC." Cambridge University Press. Cambridge, UK. 938 S.
- Kropp, J. P., A. Holsten, T. Lissner, O. Roithmeier, F. Hattermann, S. Huang, J. Rock, F. Wechsung, A. Lüttger, L. Costa, M. Steinhäuser, S. Pompe, I. Kühn, C. Walther, M. Klaus, S. Ritchie und M. Mezger (2009): "Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren - Abschlussbericht für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW." Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Potsdam.
- LAU (2009a): "Kartieranleitung Lebensraumtypen Sachsen-Anhalt, Teil Offenland. Zur Kartierung der Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie." Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU), Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU), . 161 S.
- LAU (2009b): "Kartieranleitung Lebensraumtypen Sachsen-Anhalt, Teil Wald. Zur Kartierung der Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie." Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU), . Halle/Saale.
- LAU (2009c): "Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-RL in Sachsen-Anhalt." Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, LAU. Letzter Zugriff am: 22.01.2009 2009, [http://www.mu.sachsen-anhalt.de/start/fachbereich04/natura2000/arten\\_lrt/lebensraumtypen.htm](http://www.mu.sachsen-anhalt.de/start/fachbereich04/natura2000/arten_lrt/lebensraumtypen.htm).
- Lozán, J., H. Graßl, G. Jendritzky, L. Karbe und K. Reise (2008): "Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken."
- MLU (2009): "Entwurf der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel." Fach- und ressortübergreifende Arbeitsgruppe „Anpassung an den Klimawandel". Magdeburg, Ministerium für Landwirtschaft Umwelt Sachsen-Anhalt (MLU). 81 S.
- Normand, S., J.-C. Svenning und F. Skov (2007): "National and European perspectives on climate change sensitivity of the habitats directive characteristic plant species." *Journal for Nature Conservation*(15): 41-53.

- Pampus, M. (2005): "Einschätzungen zu möglichen und bereits nachweisbaren Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Biodiversität in Hessen." 151 S.
- Petermann, J., S. Balzer, G. Ellwanger, E. Schröder und A. Ssymank (2007): "Klimawandel - Herausforderung für das europaweite Schutzgebietssystem Natura 2000." In: S. Balzer, M. Dieterich und B. Beinlich: "Natura 2000 und Klimaänderungen." Bonn - Bad Godesberg, Bundesamt für Naturschutz, Naturschutz und Biologische Vielfalt. Vol. 46.
- Pompe, S., J. Hanspach, F. Badeck, S. Klotz, W. Thuiller und I. Kuhn (2008): "Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany." *Biology Letters* 4(5): 564-567.
- Sala, O. E., F. S. Chapin, J. J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L. F. Huenneke, R. B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D. M. Lodge, H. A. Mooney, M. Oesterheld, N. L. Poff, M. T. Sykes, B. H. Walker, M. Walker und D. H. Wall (2000): "Biodiversity - Global biodiversity scenarios for the year 2100." *Science* 287(5459): 1770-1774.
- Schlumprecht, H., D. Flemming, P. Schneider, B. Tunger und R. Löser (2005): "Folgewirkung der Klimaänderungen für den Naturschutz - Ausgewählte Ökosysteme und Arten, im Druck." Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Sitte, P., H. Ziegler, F. Ehrendorfer und A. Bresinsky (1999): "Straßburger - Lehrbuch der Botanik." Vol. 34. Ausgabe. Gustav Fischer Verlag. 1024 S.
- Thuiller, W., S. Lavorel und M. B. Araujo (2005): "Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change." *Global Ecology And Biogeography* 14(4): 347-357.
- Thuiller, W., S. Lavorel, M. T. Sykes und M. B. Araujo (2006): "Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe." *Diversity And Distributions* 12(1): 49-60.
- Zebisch, M., T. Grothmann, D. Schröter, C. Haße, U. Fritsch und W. Cramer (2005): "Klimawandel in Deutschland, Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme." Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).

### 3.6. Phänologie

**Kernaussagen:**

- Phänologische Entwicklungen können anhand phänologischer Jahreszeiten dargestellt werden und Hinweise auf Klimaänderungen geben.
- In Sachsen-Anhalt haben sich in den letzten Jahrzehnten die phänologischen Frühlings- und Sommerjahreszeiten um mehrere Tage verfrüht.
- Aufgrund der zu erwartenden klimatischen Veränderungen sind in Zukunft weitere Verschiebungen zu erwarten.
- Da die Phänologie stark mit Ökosystemen verbunden ist, können Veränderungen zu Verschiebungen ökosystemarer Prozesse wie z.B. Nahrungsketten führen.

In der folgenden Analyse werden aufgrund der besseren Datenlage ausschließlich phänologische Veränderungen von Pflanzen in den letzten Jahrzehnten in Sachsen-Anhalt näher untersucht. Nach Schirmer et al. (1987, S. 269) ist die Phänologie „die Lehre vom Einfluss des Wetters, der Witterung und des Klimas auf den jahreszeitlichen Entwicklungsgang und die Wachstumsphasen der Pflanzen und Tiere...“. Eine langfristige Änderung dieser Phänologie einer oder mehrerer Arten kann Auswirkungen auf das gesamte Ökosystem haben, z.B. über eine Desynchronisierung von Nahrungsketten (Pampus 2005). Visser und Hollmann (2001) zeigen, dass die Synchronisierung zwischen einigen Schmetterlingslarven und dem Austrieb ihrer Nahrungsbäume in den Niederlanden bereits abgenommen hat. Auf diese Veränderung können jedoch nicht alle Singvögel mit einer Vorverlegung der Brut reagieren (Pampus 2005). Eine Betrachtung einzelner Beispielsarten muss daher auch vor dem Hintergrund von Wechselwirkungen zwischen Arten sowie im Kontext innerhalb eines Lebensraumgefüges gesehen werden.

Für phänologische Auswertungen von Pflanzen stehen verschiedene Methoden zur Auswahl. Ihnen ist gemeinsam, dass für phänologische Untersuchungen wiederkehrende Ereignisse der Pflanzenentwicklung, sogenannte Phasen, wie der Blühbeginn oder Beginn der Blattentfaltung, an einem bestimmten Ort beobachtet und analysiert werden. Sie können dann in Verknüpfung mit entsprechenden klimatischen oder witterungsbedingten Kenngrößen bzw. deren Veränderungen betrachtet werden (Bissolli et al. 2007).

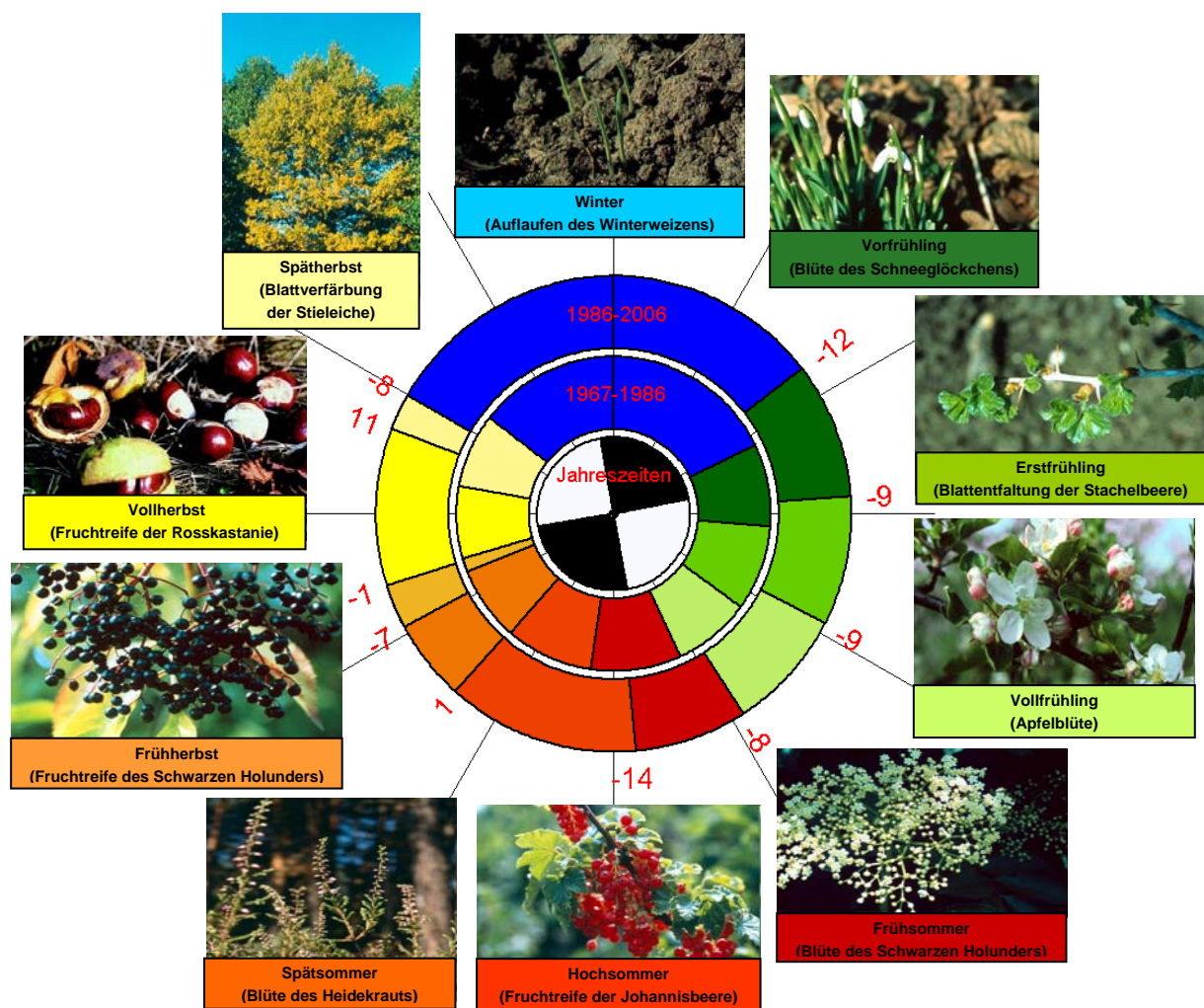
Eine phänologische Untersuchung für Sachsen-Anhalt erfolgte bereits in einer Studie von Kolodziej (2007b; 2007a). Darin wurde die phänologische Entwicklung der Frühjahrs- bis Herbstphasen für die gesamte Landesfläche sowie für zehn Naturräume nach Meynen & Schmithüsen (1962) untersucht. Darüber hinaus wurde die Abhängigkeit der phänologischen Phasen zum Lufttemperaturmittel analysiert. Die folgende Untersuchung kann daher ergänzend zur bereits erstellten Studie verstanden werden.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, Veränderungen zwischen Regionen und Stationen vergleichbar und anschaulich zu machen. Zur Betrachtung der Entwicklung mehrerer Pflanzen unter phänologischen Gesichtspunkten eignet sich besonders das Konzept der sogenannten „Phänologischen Uhr“ (siehe Abb. 3.6.1). Hierbei wird das Jahr in zehn phänologische Jahreszeiten unterteilt, deren Beginn jeweils durch eine oder mehrere Zeigerpflanzen mit einer entsprechenden Phase definiert ist (DWD 2008). Die phänologischen





Veränderungen der Vergangenheit werden im Folgenden mittels phänologischer Uhren für sieben ausgewählte phänologische Stationen sowie für vier Naturräume Sachsen-Anhalts analysiert. Als räumlicher Bezug werden somit im Gegenzug zu Kolodziej (2007b; 2007a) Naturräume herangezogen, welche speziell für Sachsen-Anhalt abgegrenzt wurden (Reichhoff et al. 2001). Die Auswahl der Phasen und zu betrachtenden Zeitperioden erfolgt aufgrund einer systematischen und detaillierten Auswertung der vorliegenden Datenbasis. Auf diese Weise kann der Winter, mit Einschränkungen bei der Interpretation der Ergebnisse, als Phase hinzugenommen werden und somit ist eine übersichtliche Darstellung der Veränderung der Eintrittstermine der Phasen in Form von Phänologischen Uhren möglich.



**Abb. 3.6.1: Phänologische Uhr am Beispiel der Station Jerichow für die Zeiträume 1967-1986 und 1987-2006 mit ihren Zeigerpflanzen und Phasen<sup>1</sup> und kalendarischen Jahreszeiten. Zeitliche Veränderungen in Tagen zwischen den betrachteten Zeiträumen sind am Rand des äußeren Rings der entsprechenden Jahreszeiten dargestellt.**

<sup>1</sup> Fotos: DWD (<http://www.dwd.de>), <http://www.botanik.biologie.uni-muenchen.de> und <http://sanangelo.tamu.edu/agronomy/wheat/feek1.jpg>

### 3.6.1. Methodik der phänologischen Analyse

#### 3.6.1.1. Stationsbasierte Auswertung

Grundlage der Analyse bilden die Daten der phänologischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Insgesamt stand ein Datensatz von 364 phänologischen Stationen in Sachsen-Anhalt mit Informationen zu verschiedenen Phasen (siehe Tab. 3.6.1) für den Zeitraum von 1951-2006 zur Verfügung.

In Tab. 3.6.1 sind die möglichen Pflanzen, welche die phänologischen Jahreszeiten repräsentieren können, aufgelistet. Dabei kann für die Darstellung des Vorfrühlings beispielsweise die Blüte der Sal-Weide, des Schneeglöckchens oder der Haselnuss herangezogen werden.

Nach der ersten Durchsicht zeigte sich eine deutlich schlechtere Datenlage für die Zeigerpflanzen und Phasen der Alternative 3, weshalb die Daten von Alternative 1 und 2 näher untersucht wurden, womit sich die maximale Stationsanzahl mit Daten zu diesen Phasen auf 56 verringerte.

Insgesamt zeigt der Datensatz für die Jahre 1967-2006 die meisten Einträge. Dieser wurde daher näher betrachtet und für die methodische Auswertung in zwei 20-Jahres-Zeitscheiben (1967-1986 und 1987-2006) unterteilt. Bei der Interpretation und Darstellung der Ergebnisse wurden die Veränderungen der Eintrittstermine einzelner Phasen zwischen den 20-Jahres-Zeitscheiben miteinander verglichen. Die größere Datenlücke vieler Phasen, welche etwa in den 80er Jahren auftritt (siehe Anhang Abb. 3.6.6), wird damit zwischen diesen beiden Zeitscheiben gleichmäßig unterteilt.

In einem ersten Schritt wurde aus den verbleibenden Phasen (Alternative 1 und 2 in Tab. 3.6.1) diejenige Kombination<sup>2</sup> aus den sich ergebenden 256 Kombinationen ausgewählt, welche für die größte Anzahl an Stationen die entsprechenden Jahreszeiten abbilden kann. Da jedoch z.T. erhebliche Datenlücken in den Stationsdaten vorliegen, wurde diese Auswahl an ein Qualitätskriterium der Datenlage geknüpft. So wurde als Kriterium dieser Stationsauswahl eine vollständige Datenlage der Frühjahrs-, Herbst- und Sommerphasen für mindestens fünf Jahre innerhalb jedes Jahrzehnts des betrachteten Zeitraums gewählt. Aufgrund der größeren Datenlücken für Winterweizen wurde dieser für die Auswahl nicht herangezogen. Es zeigte sich, dass maximal sieben Stationen (Jerichow, Haldensleben, Riestedt, Börnecke, Cröchern-Blätz, Heuckewalde-Giebelroth und Zeitz) für alle 10 jahreszeitbestimmenden Phasen (mit Ausnahme der Winterphase) innerhalb einer Kombination das oben beschriebene Kriterium erfüllten. Diese Kombination ist der Spalte „Alternative 1“ in Tab. 3.6.1 bzw. Abb. 3.6.1 zu entnehmen und bildet die Grundlage für die weiteren Analysen. Damit unterscheiden sich die untersuchten Zeigerpflanzen mit ihren Phasen in den Jahreszeiten des Frühjahrs und des Hochsommers von den ausgewählten Phasen der phänologischen Studie Sachsen-Anhalts von Kolodziej (2007b).

---

<sup>2</sup> Unter einer Kombination werden im Folgenden die Zeigerpflanzen mit den entsprechenden Phasen verstanden, welche alle zehn phänologischen Jahreszeiten abbilden.

**Tab. 3.6.1: Mögliche Pflanzenindikatoren mit ihrer entsprechenden Phasenkennung (PK) zur Abbildung der Phänologischen Phasen (nach Bissolli et al. 2007; Kolodziej 2007b, a; DWD 2008). Die Phasen in den drei dargestellten Spalten (Alternative 1, 2, und 3) können gegeneinander ausgetauscht werden.**

	Alternative 1			Alternative 2			Alternative 3		
Phänolog. Jahreszeit	Zeiger-pflanze 1	Phase 1	PK1	Zeiger-pflanze 2	Phase 2	PK2	Zeiger-pflanze 3	Phase 3	PK3
<b>Vorfrühling</b>	Schnee-glöckchen	Blüte	2	Sal-Weide	Blüte	4	Haselnuss	Blüte	1
<b>Erstfrühling</b>	Stachel-beere	Blattent-faltung	52	Löwen-zahn	Blüte	116	Forsythie	Blüte	6
<b>Vollfrühling</b>	Apfel	Blüte	62	Stieleiche	Blattent-faltung	13			
<b>Frühsommer</b>	Schwarzer Holunder	Blüte	18	Robinie	Blüte	123			
<b>Hochsommer</b>	Johannis-beere	Frucht-reife	100	Sommer-linde	Blüte	64			
<b>Spätsommer</b>	Heidekraut	Blüte	65	Apfel (früh-reifend)	Frucht-reife	109	Eberesche	Frucht-reife	178
<b>Frühherbst</b>	Schwarzer Holunder	Frucht-reife	67				Kornel-kirsche	Frucht-reife	222
<b>Vollherbst</b>	Ross-kastanie	Frucht-reife	68	Stieleiche	Frucht-reife	72			
<b>Spätherbst</b>	Stieleiche	Blattver-färbung	73	Ross-kastanie	Blattver-färbung	69			
<b>Winter</b>	Winter-weizen	Auf-laufen	94				Apfel (spät-reifend)	Blattfall	263
							Europ. Lär-che	Blattfall	218
							Stieleiche	Blattfall	226

Anschließend wurde die Verschiebung der Phänologischen Jahreszeiten zwischen den Zeiträumen 1967-1986 und 1987-2006 anhand der Veränderung des Mittelwerts des Eintrittstermins der jeweiligen Pflanzen für die sieben Stationen ausgewertet. Die Ergebnisse wurden anschließend in Form einer Phänologischen Uhr dargestellt. Darüber hinaus wurde die Signifikanz des Trends der Veränderung der Jahreszeiten zwischen 1967 und 2006 für jede Station anhand des Menn-Kendall Tests berechnet.

Obwohl insgesamt sieben Stationen das angesetzte Kriterium hinsichtlich ihrer Datenlage erfüllen, weisen die Daten bei einigen Phasen in den 80er Jahren eine Lücke auf. Die entsprechenden berechneten Veränderungen zwischen den Zeitperioden sind damit einer Ungenauigkeit unterworfen.

Für die Winterphase konnte aufgrund der lückenhaften Daten nicht das oben beschriebene Qualitätskriterium angewandt werden, da dies die sieben ausgewählten Stationen zusätzlich stark reduziert hätte. Daher ist eine Analyse der Entwicklung des Winterbeginns mit Vorsicht zu betrachten. Für die Station Cröchern-Blätz lagen keine Daten zum Eintrittsbeginn des Winterweizens der Periode vor, weshalb diese Phase in der phänologischen Uhr nicht dargestellt werden konnte (s. Abb. 3.6.2). Darüber hinaus ist diese phänologische Phase weniger relevant in Bezug auf Analysen im Zusammenhang mit klimatischen Veränderungen als die anderen hier betrachteten wildwachsenden Pflanzen. Der Grund hierfür ist, dass das Auflaufen des Winterweizens neben den klimatischen Bedin-

gungen besonders von landwirtschaftlichen Entscheidungen technischer und wirtschaftlicher Art abhängig ist. Für Deutschland wurde aus diesen Gründen eine langsamere Verschiebung des Eintrittstermins landwirtschaftlicher Phasen als bei Wildpflanzen festgestellt, d.h. die Entscheidungen der Landwirte haben mit den beobachteten klimatischen Veränderungen nicht Schritt gehalten (Menzel et al. 2006b).

### 3.6.1.2. Naturraumbasierte Auswertung

Um neben punktuellen Informationen über Stationen flächenhafte Aussagen für Naturräume Sachsen-Anhalts zu erhalten, wurde die Verschiebung der Phänologischen Phasen ebenfalls auf für die naturräumlichen Großlandschaften (im Folgenden als Landschaften bezeichnet) Sachsen-Anhalts untersucht (siehe Reichhoff et al. 2001). Die Abgrenzung dieser Landschaften erfolgte durch Reichhoff et al. (2001) speziell für das Bundesland aufgrund standörtlicher Faktoren, Informationen zur aktuellen und Potentiell Natürlichen Vegetation, zur aktuellen Flächennutzung sowie aufgrund des Landschaftsbildes. Wegen des sich räumlich stärker unterscheidenden Klimas innerhalb des die Landesfläche durchziehenden Naturraums „Flusstäler und Niederungslandschaften“ eignet sich dieser weniger für eine phänologische Betrachtung. Stationen innerhalb dieses Naturraums wurden daher dem nächstgelegenen Naturraum zugeordnet (siehe Anhang Tab. 3.6.2). Insgesamt wurden damit die vier Naturräume „Ackerebenen“, „Landschaften am Südrand des Tieflandes“, „Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes“ und „Mittelgebirge“ betrachtet, wobei der Naturraum der „Flusstäler und Niederungslandschaften“ räumlich in diese vier integriert wurden. Die der Darstellung der naturraumbasierten Analyse zugrunde liegenden 56 Phänologischen Stationen (siehe Abb. 3.6.3) zeigen eine recht gleichmäßige räumliche Verteilung über die Landesfläche und die betrachteten vier Naturräume.

Es wurden für die naturraumbasierte Auswertung für jedes Jahr von 1967-2006 die Eintrittstermine der entsprechenden Phasen aller 56 Stationen für den jeweiligen Naturraum gemittelt<sup>3</sup>. Anschließend erfolgte analog zur Auswertung auf Stationsbasis für die Zeiträume 1967-1986 und 1987-2006 eine Mittelung des Eintrittstermins jeder phänologischen Jahreszeit innerhalb des entsprechenden Naturraums. Zur Vergleichbarkeit der beiden Ansätze (stations- und naturraumbasierte Auswertung) wurden die Veränderungen auch für die Naturräume in Form einer Phänologischen Uhr dargestellt. Insbesondere in den 80er Jahren treten jedoch größere Datenlücken für die Pflanzenindikatoren mit der Phasenkenntung 18, 100, 65 und 94 auf (siehe Anhang Tab. 3.6.4). Dies ist bei der Interpretation dieser Phasen zu berücksichtigen.

Die vorher ausgewählten sieben Stationen mit einer guten Datenlage sind auf insgesamt zwei Naturräume verteilt (ohne die Betrachtung des Naturraums „Flusstäler und Niederungslandschaften“): „Landschaften am Südrand des Tieflandes“ und „Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes“. Der Grund hierfür ist, dass die Auswahl der einzelnen Stationen an das oben beschriebene Qualitätskriterium bezüglich der Datenlage geknüpft wurde, welches nur sieben Stationen erfüllen, so dass diese sieben der insgesamt 56 Stationen der naturraumbasierten Analyse näher untersucht wurden.

<sup>3</sup> 13 Stationen innerhalb „Ackerebenen“, 17 Stationen innerhalb „Landschaften am Südrand des Tieflandes“, 17 Stationen innerhalb „Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes“ und 9 Stationen innerhalb „Mittelgebirge“.

Neben der Berechnung der Verschiebung der Eintrittstermine der Jahreszeiten zwischen den Zeiträumen 1967-1986 und 1987-2006 wurde ebenfalls die Signifikanz des Trends der phänologischen Veränderung zwischen 1967 und 2006 anhand des Menn-Kendall-Tests berechnet.

### **3.6.2. Bereits beobachtete phänologische Entwicklungen**

Die Ergebnisse sind als graphische Darstellungen der phänologischen Uhren für die ausgewählten Stationen in Abb. 3.6.2 und für die Naturräume in Abb. 3.6.3 dargestellt. Die Werte der jeweiligen Eintrittstermine sowie das Signifikanzniveau des Trends der phänologischen Veränderung sind in Anhang Abb. 3.6.3 und 3.6.5 zu finden.

Zur Darstellung der zeitlichen Veränderung der Eintrittstermine werden zwei unterschiedliche Zeitperioden mittels eines doppelten Ringes dargestellt (nach Bissolli et al. 2007; Hanspach 2008). Der innere Ring stellt dabei die Zeitperiode 1967-1987 dar, der äußere zeigt die jüngere Vergangenheit anhand des Zeitraums 1987-2006 (beginnend mit dem Winter in dunkelblau). Im Zentrum der Graphik sind die kalendarischen Jahreszeiten zur Orientierung eingefügt. Am äußeren Rand befinden sich zwölf Abschnitte der einzelnen Monate (im Uhrzeigersinn beginnend mit dem 1. Januar). Für die Station Jerichow ist dies beispielhaft in Abb. 3.6.1 dargestellt. Sie zeichnet sich durch eine vollständige Datenlage innerhalb der betrachteten Zeiträume aus.

#### **3.6.2.1. Stationsbasierte Auswertung**

Bei den näher untersuchten sieben Phänologischen Stationen fällt in Abb. 3.6.2 und Anhang Abb. 3.6.3 die mit 300 m am höchsten gelegene Station Heuckewalde-Gieberoith mit dem spätesten Eintrittstermin des Frühlings (65. Tag nach Jahresbeginn) auf, den frühesten Termin verzeichnet die Station Haldensleben (51. Tag nach Jahresbeginn), welche auf 55 m Höhe liegt. Als Ursache des deutlichen Unterschieds der Eintrittstermine zwischen den nah beieinander gelegenen Stationen Zeitz und Heuckewalde-Giebelroth könnte die Höhendifferenz von 140 m eine Rolle spielen.

Die durchschnittlich frühesten Eintrittstermine für Frühjahrs- und Sommerphasen weist die Station Zeitz auf, die durchschnittlich spätesten Phasen dieser Jahreszeiten die Station Cröchern-Blätz. Neben Höhendifferenzen können hier klimatische Unterschiede, beispielsweise bedingt durch unterschiedliche Naturräume, die phänologische Situation beeinflussen.

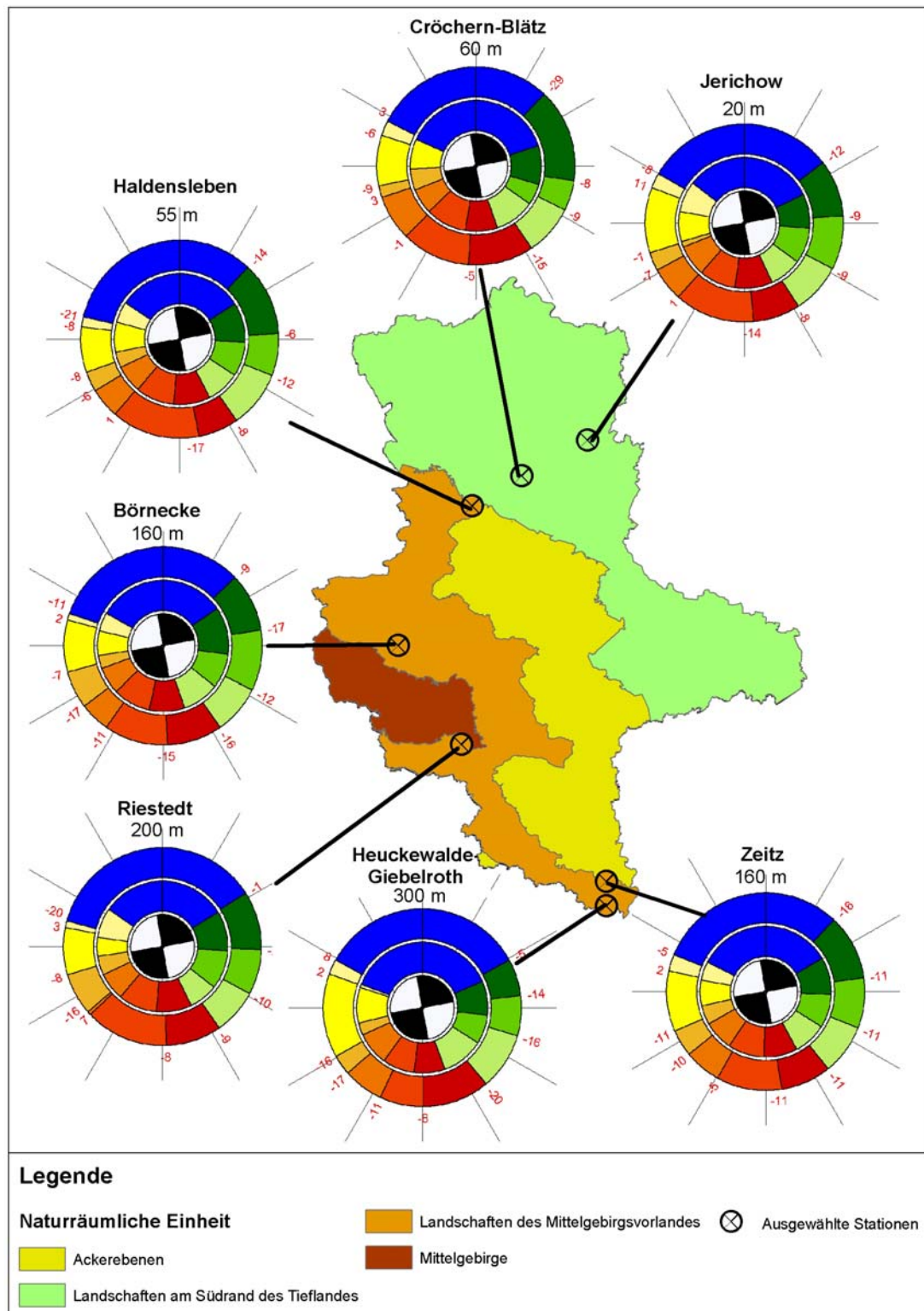
Alle Phasen des Frühjahrs und die meisten Sommer- und Herbstphasen der sieben phänologischen Stationen zeigen eine deutliche Verfrühung des Eintrittstermins. So begann der Vorfrühling 1987-2006 an den Stationen 1-29 Tage früher als im Zeitraum 1967-1986 und der Frühsommer um 8-20 Tage früher. Der Spätsommer und Spätherbst haben sich an einigen Stationen leicht verspätet sowie ebenfalls der Frühherbst an einer Station.

Die Periode von Beginn des Spätherbstes bis zum Beginn des Vorfrühlings verkürzte sich an den sieben untersuchten Stationen zwischen den betrachteten Zeiträumen von 140

auf 128 Tage. Dieser Trend ist mit einer Verkürzung von 140 auf 127 Tage auch für die vier Naturräume festzustellen.

Trotz des allgemeinen Trends der Verfrühung der Jahreszeiten Frühjahr und Sommer, zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen bei der Betrachtung der Signifikanz des Trends (siehe Anhang Abb. 3.6.3 und 3.6.4). So ist die Veränderung des Vorfrühlings nur an der Station Cröchern-Blätz signifikant. In den letzten Jahren verspätete sich der Eintrittstermin des Schneeglöckchens als Zeigerpflanze des Vorfrühlings sogar bei allen sieben ausgewählten Stationen im Vergleich zum allgemeinen Trend der Verfrühung dieser Jahreszeit. Diese Phase ist darüber hinaus durch eine hohe Variabilität zwischen den Jahren gekennzeichnet. Der Vollfrühling und Frühsommer zeigt für alle sieben Stationen einen signifikanten Trend. Dagegen weisen die Spätsommer- und Herbstphasen deutliche Unterschiede der Signifikanzen zwischen den Stationen auf.





**Abb. 3.6.2: Phänologische Uhren von sieben ausgewählten Phänologischen Stationen für die Zeiträume 1967-1986 (innerer Ring) und 1987-2006 (äußerer Ring) mit Höhenangabe.**

**Für die Station Cröchern-Blätz fehlen Daten zum Beginn des Winters für den Zeitraum 1967-1986, weshalb hierfür für die Jahreszeit Spätherbst sowie für den Beginn des Winters keine Aussage getroffen werden kann.**

### 3.6.2.2. Naturraumbasierte Auswertung

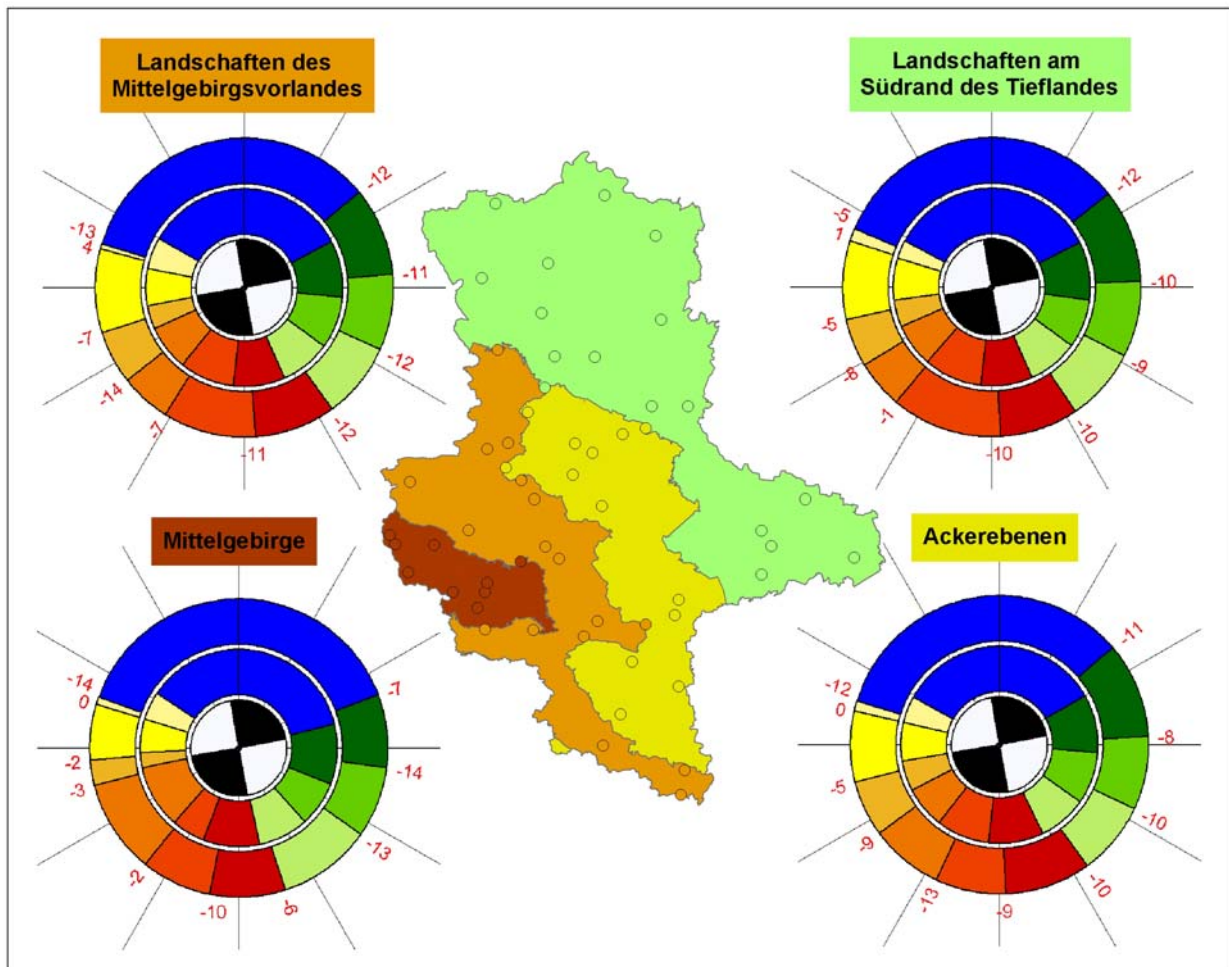
Zunächst einmal sind anhand der naturräumlichen Darstellung Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen festzustellen (Abb. 3.6.3 und Anhang Tab. 3.6.4). So setzt der Vorfrühling im Mittelgebirge 17 Tage später ein als in den tiefer gelegenen Regionen „Ackerebenen“, „Landschaften am Südrand des Tieflandes“ und „Landschaften des Mittelgebirgsvorlandes“. Auch der Frühsommer und Frühherbst beginnen im Mittelgebirge rund 11 Tage bzw. 17 Tage später als in den anderen betrachteten Landschaften. Der Winter dauert im Mittelgebirge mit 133 Tagen 13-14 Tage länger als in den anderen Landschaften.

Des Weiteren zeigen alle Phasen von Vorfrühling bis einschließlich Vollherbst der vier untersuchten Landschaften eine deutliche Verfrühung des Eintrittstermins zwischen den Zeitperioden 1967-1986 und 1987-2006. Der Beginn des Vorfrühlings begann beispielsweise in den einzelnen Regionen um rund 7-12 Tage früher. Der Beginn des Frühsommers verfrühte sich insgesamt um 6-12 Tage, der Frühherbst um 3-14 Tage. Der Beginn des Spätherbstes hat sich dagegen mit durchschnittlich 1 Tag leicht verspätet. Eine Aussage zur Entwicklung des Eintrittstermins des Winters (Auflaufen des Winterweizens) ist aus den zuvor genannten Gründen nur eingeschränkt möglich. Alle vier Regionen deuten jedoch auf eine Verfrühung dieser Phase hin.

Der Trend der phänologischen Entwicklungen von 1967-2006 ist mit Ausnahme des Spätsommers in den Ackerebenen und Landschaften am Südrand des Tieflandes sowie der Herbstphasen im Mittelgebirge in den vier untersuchten Landschaften signifikant.

Eine Betrachtung der zehn untersuchten Phänologischen Phasen für ganz Sachsen Anhalt im längeren Zeitraum von 1951-2006 zeigte darüber hinaus signifikante Veränderungen für alle Jahreszeiten auf; mit Ausnahme des Spätherbstes verfrühten sich die Phasen um 1-4 Tage pro Jahrzehnt, der Spätherbst verspätete sich um 2 Tage pro Jahrzehnt (siehe Anhang Abb. 3.6.6).

Dies macht deutlich, dass die erheblichen Unterschiede zwischen einzelnen Stationen bezüglich der Trends der Veränderungen der Eintrittstermine auf naturräumlicher Ebene durch die Mittelung weniger stark zum Tragen kommen. Entwicklungen der Phänologie einzelner Stationen sind daher nicht unbedingt repräsentativ für die jeweilige Region. Darüber hinaus ist zu beachten, dass Ergebnisse aus Trenduntersuchungen von der Auswahl der Zeithorizonte und der Zeigerpflanzen beeinflusst werden können.



**Abb. 3.6.3: Phänologische Uhren der vier untersuchten Naturräume Sachsen-Anhalts für die Zeiträume 1967-1986 (innerer Ring) und 1987-2006 (äußerer Ring).**

*Die zugrunde liegenden Phänologischen Stationen sind durch entsprechend farbige Kreise markiert. Zeitliche Veränderungen in Tagen zwischen den betrachteten Zeiträumen sind am Rand des äußeren Rings der entsprechenden Jahreszeiten dargestellt.*

### 3.6.3. Diskussion der phänologischen Veränderungen

Die vorliegenden Untersuchungen machen deutlich, dass bereits in den vergangenen Jahrzehnten Veränderungen in der Phänologie in Sachsen-Anhalt beobachtet wurden. Alle phänologischen Hauptjahreszeiten verfrühten sich in den untersuchten Naturräumen seit 1967 bis 2006. Diese Beobachtung stimmt mit den Ergebnissen der Untersuchung von phänologischen Phasen für die Naturräume Sachsen-Anhalts von Kolodziej (2007b; 2007a) überein. Zwischen den Zeitperioden von 1962-1983 und 1995-2007 wurde dort insgesamt eine Verfrühung der Frühjahreszeiten von 10-16 Tagen, der Sommerjahreszeiten von 2-11 Tagen und des Früh- und Vollherbsts um 4-9 Tage festgestellt<sup>4</sup>. Auch der Spätherbst zeigt in dieser Untersuchung eine Verspätung um mehrere Tage. Der Beginn der Frühjahrs- und Sommerphasen wird in Sachsen-Anhalt der Studie zufolge bis zu

<sup>4</sup> Als Mittelwert über 32-35 Naturräume Sachsen-Anhalts nach Meynen-Schmithüsen (1962) für folgende Zeigerpflanzen und Phasen: Salweide (Blüte), Löwenzahn (Blüte), Stiel-Eiche (Blattentfaltung), Schwarzer Holunder (Blüte), Sommer-Linde (Blüte), Heidekraut (Blüte), Schwarzer Holunder (Fruchtreife), Rosskastanie (Fruchtreife), Stieleiche (Blattfall).

85 % durch die Monatsmitteltemperatur der vorangegangenen 2-3 Monate bestimmt. Die phänologische Verschiebung in Sachsen-Anhalt ging einher mit einer signifikanten Erwärmung um  $1,5^{\circ}\text{C}$  im selben Zeitraum. Nach Bernhofer (2008) konnte zwischen 1951-2006 eine signifikante Temperaturzunahme der Jahresmitteltemperatur von  $0,5 - 1,5^{\circ}\text{C}$  beobachtet werden. Die stärkste Zunahme trat dabei im Südosten auf. Bei Vergleich der Jahreszeiten fällt der Winter mit einer besonders starken Erwärmung von  $1,1 - 1,8^{\circ}\text{C}$  auf.

Der Zusammenhang mit der Lufttemperatur nimmt allerdings zu den Herbstphasen hin ab. Hier spielen komplexere Einflussfaktoren wie die Wasserversorgung der Pflanzen oder die Stärke der Nord-Atlantik-Oszillation eine große Rolle (Menzel 2007).

Das Phänomen eines früheren Beginns des Frühlings, Sommers und Herbstes ist in den letzten Jahrzehnten auch in Baden-Württemberg (Schröder et al. 2005), Hessen (Streitfert 2005), Rheinland-Pfalz (Henniges et al. 2005), Sachsen (Chmielewski et al. 2004), Nordrhein-Westfalen (Kropp et al. 2009) sowie auch für die Stationen Potsdam (HANSPACH 2008) und Geisenheim bei Frankfurt (Menzel 2006) beobachtet worden. Eine Analyse zahlreicher phänologischer Stationen in Europa zeigt ebenfalls eine Verfrühung der phänologischen Phasen des Frühjahrs und Sommers (2,5 Tage/Dekade, 1971-2000), welche mit der allgemeinen Erwärmung in Verbindung gebracht werden kann (Menzel et al. 2006b).

#### **3.6.4. Mögliche zukünftige phänologische Entwicklungen, Konsequenzen und Handlungsempfehlungen**

Belegt ist, dass das Klima als Umweltfaktor einen starken Einfluss auf phänologische Entwicklungen hat, besonders auf Frühjahrs- und Sommerphasen (Schnelle 1955; Badeck et al. 2004; Menzel 2006). Um eine Aussage über zukünftig zu erwartende phänologischen Entwicklungen zu treffen, müssen somit beobachtete Veränderungen der Vergangenheit klimatischen Veränderungen im selben Zeitraum zugeordnet werden können. Weitere Analysen sind daher nötig, um die Veränderungen der Vergangenheit mit klimatologischen, hydrologischen oder weiteren Faktoren in Verbindung zu bringen, um basierend auf kausalen Zusammenhängen anschließend Aussagen über zukünftig zu erwartende Veränderungen treffen zu können. Hierzu könnten Temperatursummen-, Regressionsmodelle (Chmielewski et al. 2004; Streitfert & Grünhage 2008) oder komplexere Methoden wie der Bayes'sche Ansatz (siehe Dose & Menzel 2006) sinnvolle methodische Grundlagen bieten. Mögliche Klimakenngrößen können beispielsweise Lufttemperatur, Bodentemperatur, Niederschlag oder Trockenheitsbedingungen sein.

Erste Untersuchungen für andere Regionen, welche auf der Korrelation der bereits beobachteten Veränderungen mit der entsprechenden Lufttemperatur beruhen, deuten auf eine weitere Verschiebung der phänologischen Uhr in der Zukunft hin. So könnten sich bis Mitte des Jahrhunderts die Phänologischen Jahreszeiten im Marburg-Gießener-Lahntal in Hessen um bis zu 8 Tage verfrühen. Auch hat sich der Blütebeginn von Obstgehölzen und Beerensträuchern in dieser Region in der Vergangenheit bereits vorverlagert und



könnte bis Mitte des Jahrhunderts noch einmal um 8-11 Tage früher eintreten<sup>5</sup> (Streitfert 2005; Streitfert & Grünhage 2008). Eine weitere Verfrühung der Frühjahrsphasen bis Mitte des Jahrhunderts wird auch in Sachsen erwartet<sup>6</sup> (Chmielewski et al. 2004).

Vor diesem Hintergrund und mit einer erwartetem weiteren Erwärmung von durchschnittlich 1.8 - 3 K (nach den Modellen WETTREG und REMO unter den Szenarien A2, A1b und B1) bis 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 ist daher auch in Sachsen-Anhalt eine weitere Verschiebung der phänologischen Phasen wahrscheinlich. Allerdings ist eine Projektion der Zusammenhänge von klimatischen Parametern wie Monatsmitteltemperaturen mit dem Eintrittstermin verschiedener Phasen nicht direkt in die Zukunft möglich. Eine Verfrühung der phänologischen Jahreszeiten kann aufgrund physiologischer Bedingungen nicht unbegrenzt erfolgen. So besteht zum Beispiel eine Wechselwirkung des Eintrittstermins mit der Photoperiode (Partanen et al. 1998; Saxe et al. 2001), welche einer übereilten Reaktion der Pflanzen aufgrund einer Erwärmung entgegenwirken kann (Menzel 2007).

Bei der Betrachtung der Veränderung phänologischer Jahreszeiten ist außerdem zu bedenken, dass Organismen unterschiedlich auf Klimaänderungen reagieren (Berry et al. 2003; Harrison et al. 2003). Eine gleichmäßige Verschiebung aller Phasen in der Zukunft ist daher nicht zu erwarten. Es kann zu Entkopplungen biologischer Prozessketten kommen. So zeigt eine Studie von Pflanzen und Schmetterlingen in Deutschland und Großbritannien einen Zusammenhang zwischen Verfrühung der Frühjahrs- und Sommerphasen in den letzten Jahrzehnten mit einer damit verbundenen höheren geographischen Variabilität (Menzel et al. 2006a). Phasenverschiebungen können zu einer zeitlichen Entkopplung von bestehenden biologischen Interaktionen führen, aber auf der anderen Seite auch mobile Arten begünstigen. Zudem können zeitliche Verschiebungen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben, beispielsweise durch früher einsetzende Pollenproduktion. Dies macht deutlich, dass neben dem Naturschutzsektor weitere Sektoren von phänologischen Veränderungen betroffen sein können und sich biologische, ökonomische und soziale Folgen ergeben können, z.B. für die Forst- und Landwirtschaft sowie die Gesundheit. So könnten beispielsweise durch eine längere Vegetationsperiode im Sommer die Bedingungen zur vollen Fruchtreife, und damit Einbürgerung, der nach Deutschland eingewanderten allergenen Pflanze *Ambrosia artemisiifolia* in Zukunft erfüllt sein (Brandes & Nitzsche 2007; Alberternst & Nawrath 2008). Der ökonomische Schaden im Gesundheitswesen durch *Ambrosia artemisiifolia* in Deutschland wird auf rund 20-50 Mio € jährlich geschätzt (Reinhardt et al. 2003) und könnte bei weiterer Ausbreitung der Pflanze deutlich steigen (Alberternst et al. 2006).

Verschiebungen der Phänologie landwirtschaftlicher Anbaupflanzen können zur Mitte des Jahrhunderts im Einzugsgebiet der Elbe zur Möglichkeit einer zweiten Ernte führen, allerdings mit negativen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt (Hattermann et al. 2009).

---

<sup>5</sup> Zeitliche Verschiebung bis 2036-2065 im Vergleich zu bisherig beobachteter Veränderung, nach Berechnungen anhand von Temperatursummen- und Regressionsmodellen mit phänologischen Beobachtungsdaten des DWD und Klimadaten des Modells WETTREG, unter Szenarien A1B, A2, B1 (aus GCM ECHAM5) und B2 (aus GCM ECHAM4).

<sup>6</sup> Nach Berechnungen anhand von Temperatursummen- und Regressionsmodellen mit phänologischen Beobachtungsdaten des DWD, auf Basis von ECHAM4/OPYC3 unter Verwendung des Szenarios A1B.



Diese betroffenen Sektoren stehen nun vor der Herausforderung diese Veränderungen zu berücksichtigen.

Für zukünftige Untersuchungen muss herausgestellt werden, dass nicht allein die eigentlichen Verschiebungen der Eintrittstermine im Fokus der Betrachtungen stehen sollten, sondern die damit verbundenen Veränderungen der Lebenszyklen, Lebensgemeinschaften und Wirkungsketten innerhalb von Ökosystemen. Eine längere Vegetationszeit an sich könnte grundsätzlich die Ökosystemproduktivität von natürlichen oder anthropogenen Ökosystemen erhöhen (Sparks & Menzel 2002). Sollten die zu erwartenden Veränderungen jedoch nicht kontinuierlich, sondern vielmehr mit starken zeitlichen Schwankungen voranschreiten z.B. durch Spätfröste, dann könnten Störungen im Wachstumsrhythmus von Pflanzen auftreten (Chmielewski 2007).

Aufgrund der potenziellen großräumlichen Unterschiede in der phänologischen Entwicklung sind zudem eher regionalspezifische Instrumente der Naturschutzplanung zu empfehlen. Für eine weitere Folgenabschätzung, besonders im Hinblick auf mögliche Entkopplungen von biologischen Interaktionen innerhalb und zwischen Ökosystemen, sind weitere Forschungsanstrengungen und Monitoringinstrumente sinnvoll, welche neben den Pflanzen auch detailliert Wechselwirkungen mit der Tierwelt sowie Wirkungsketten zwischen Sektoren erfassen.

Spezifischere Anpassungsempfehlungen bezüglich phänologischer Entwicklungen sind in Box 3.6.1 sowie in den Kapiteln der Landwirtschaft (Kap. 3.3), des Naturschutzes (Kap. 3.5) und des Weinbaus (Kap. 3.7) zu finden.

*Box 3.6.1: Handlungsempfehlungen zur Phänologie*

Die Projektionen zeigen deutlich eine Vorverlagerung der phänologischen Phasen. Eine gleichmäßige Verschiebung aller ökosystemischen Wechselwirkungen ist jedoch nicht zu erwarten und es kann daher zu Entkopplungen biologischer Prozessketten kommen. Dies wirkt sich besonders auf Ökosysteme und deren Arten aus, aber auch auf gesellschaftliche (Gesundheit, z.B. Pollenallergien) und wirtschaftliche Systeme (Forst- und Landwirtschaft). Anpassungsempfehlungen zur Abschätzung der Folgen wären daher:

- ein konsequentes **Monitoring** der Verschiebungen der Eintrittstermine und der damit verbundenen Veränderungen der Lebenszyklen, Lebensgemeinschaften und Wirkungsketten innerhalb von Ökosystemen
- die Anwendung **regionalspezifischer Instrumente der Naturschutzplanung**
- weitere **Forschungsanstrengungen**, welche neben den Pflanzen auch detailliert Wechselwirkungen mit der Tierwelt sowie Wirkungsketten zwischen Sektoren erfassen

### 3.6.5. Kenntnislücken und Untersuchungsbedarf

Es existiert ein feinmaschiges phänologisches Monitoringsystem des DWD und des Landes Sachsen-Anhalts. Eine Weiterführung dieses Netzwerkes kann wichtige Hinweise auf zeitliche Veränderungen der Vegetation liefern, welche u. a. in Zusammenhang mit Klimawandel gebracht werden können. Allerdings treten in den Daten der Vergangenheit größere Lücken innerhalb einiger Zeiträume auf. Eine Vermeidung dieser Datenlücken in der Zukunft erhöht die Aussagekraft der phänologischen Entwicklungen.



Bei der Interpretation der Konsequenzen der beobachteten phänologischen Veränderungen besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf. So liegen bislang kaum Studien zur zeitlichen Veränderung oder eventuellen Entkopplung von ökosystemaren Prozessen vor.

Phänologische Veränderung der Vergangenheit können nicht ohne weiteres in die Zukunft extrapoliert werden. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf hinsichtlich der dynamischen Reaktionen der Zeigerpflanzen auf ihre Umweltbedingungen.

Weiterführende Informationen zur Phänologie sind in Box 3.6.2 zusammengefasst.

*Box 3.6.2: Weiterführende Informationen zur Phänologie*

**INKLIM 2012, Baustein II: Klimafolgen - Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen**

Im Rahmen dieses Projekts wurden phänologischen Zeitreihen aus Hessen ausgewertet und im Hinblick auf regionale Klimaänderungen bewertet.

**Projektlaufzeit:** 2004-2006

**Quelle:** <http://www.hlug.de/klimawandel/inklim/dokumente/endberichte/phaenologie.pdf>

**Ansprechpartner:** Anita Streitfert, Dr. Ludger Grünhage, Prof. Dr. Hans-Jürgen Jäger, Institut für Pflanzenökologie, Gießen

**KliVEG - Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen**

**Projektlaufzeit:** 2002-2004

**Quelle:** [http://www.smul.sachsen.de/umwelt/download/klima/Kurzbeschreibung\\_FE-Vorhaben\\_KliVEG.pdf](http://www.smul.sachsen.de/umwelt/download/klima/Kurzbeschreibung_FE-Vorhaben_KliVEG.pdf)

**Ansprechpartner:** Prof. Dr. Frank-M. Chmielewski, Antje Müller, Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Humboldt-Universität zu Berlin

**COST 725 - Establishing a European Phenological Data Platform for Climatological Applications**

Das Hauptziel dieses Projekts ist die Erstellung einer europäischen Datenbank für phänologische Beobachtungen, welche für klimatologische Untersuchungen verwendet werden kann, insbesondere zur Identifizierung von Veränderungen.

**Projektlaufzeit:** 2004-2009

**Quelle:** <http://topshare.wur.nl/cost725/70929>

**Ansprechpartner:** Dr. Elisabeth Koch, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

### 3.6.6. Literatur

Alberternst, B. und S. Nawrath (2008): "Beifuß-Ambrosie in Deutschland." Letzter Zugriff am: 26.10. 2008, <http://www.ambrosiainfo.de>.

Alberternst, B., S. Nawrath und F. Klingenstein (2006): "Biologie, Verbreitung und Einschleppungswege von *Ambrosia artemisiifolia* in Deutschland und Bewertung aus Naturschutzsicht." *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* 58(11): 279-285.

Badeck, F. W., A. Bondeau, K. Bottcher, D. Doktor, W. Lucht, J. Schaber und S. Sitch (2004): "Responses of spring phenology to climate change." *New Phytologist* 162(2): 295-309.



- Bernhofer, C., V. Goldberg, J. Franke, M. Surke und J. Adam (2008): "REKLI - Sachsen-Anhalt II, Regionale Klimadiagnose für Sachsen-Anhalt, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt." Institut für Hydrologie und Meteorologie und T. U. Dresden (Hrsg.). Dresden.
- Berry, P. M., T. P. Dawson, P. A. Harrison, R. Pearson und N. Butt (2003): "The sensitivity and vulnerability of terrestrial habitats and species in Britain and Ireland to climate change." 11: 15-23.
- Bissolli, P., G. Müller-Westermeier und C. Polte-Rudolf (2007): "Aufbreitung und Darstellung phänologischer Daten " *Promet* 33(1/2): 14-19.
- Brandes, D. und J. Nitzsche (2007): "Verbreitung, Ökologie und Soziologie von *Ambrosia artemisiifolia* L. in Mitteleuropa." *Tuxenia* 27: 167-194.
- Chmielewski, F.-M. (2007): "Phänologie - ein Indikator zur Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre." *Promet* 33(1/2): 28-35.
- Chmielewski, F.-M., A. Müller und W. Kuchler (2004): "Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen." Eigenverlag HU Berlin. Berlin.
- Dose, V. und A. Menzel (2006): "Bayesian correlation between temperature and blossom onset data." *Global Change Biology* 12: 1451-1459.
- DWD (2008): "Die phänologische Uhr." Letzter Zugriff am: 07.10.08, [www.dwd.de](http://www.dwd.de).
- Hanspach, A. (2008): "Phänologische Uhr Potsdam." Potsdam Institute of Climate Impact Research. Potsdam, <http://www.pik-potsdam.de/~hanspach/phaenouhr/>.
- Harrison, P. A., D. P. Vanhinsbergh, R. J. Fuller und P. M. Berry (2003): "Modelling climate change impacts on the distribution of breeding birds in Britain and Ireland." 11: 31-42.
- Hattermann, F., F. Wechsung, S. Huang und V. Krysanova (2009): "Changes in plant phenology and physiology under climate change and related impacts on regional water resources (Präsentation)." 5th International SWAT Conference, August 5-7, 2009, University of Colorado, Boulder, Colorado.
- Henniges, Y., H. Danzeisen und R.-D. Zimmermann (2005): "Regionale Klimatrends mit Hilfe der phänologischen Uhr, dargestellt am Beispiel Rheinland-Pfalz." *Zeitschrift für Umweltchemie und Umwelttoxikologie. Beitragsserie Klimaänderung und Klimaschutz* 17(1): 28-34.
- Kolodziej, A. (2007a): "Auswirkungen des Klimawandels auf die Phänologie Mitteldeutschlands." In: "Künftige Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt - Sachstand und Handlungsfelder. Workshop am 16. Juni 2006 im Landesamt für Umweltschutz." Halle, Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt. Vol. SH 1/2007.
- Kolodziej, A. (2007b): "Klimawandel in Sachsen-Anhalt: Auswirkungen auf die phänologischen Phasen wildwachsender Pflanzen." Berichte des Deutschen Wetterdienstes No. 231. Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main.
- Kropp, J. P., A. Holsten, T. Lissner, O. Roithmeier, F. Hattermann, S. Huang, J. Rock, F. Wechsung, A. Lüttger, L. Costa, M. Steinhäuser, S. Pompe, I. Kühn, C. Walther, M. Klaus, S. Ritchie und M. Mezger (2009): "Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren - Abschlussbericht für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW." Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Potsdam.
- Menzel, A. (2006): "Zeitliche Verschiebung von Austrieb, Blüte, Fruchtreife und Blattverfärbung im Zuge der rezenten Klimaerwärmung." *Forum für Wissen* 2006: 47-53.
- Menzel, A. (2007): "Phänologische Modelle." *Promet* 33(1/2): 20-27.
- Menzel, A., T. H. Sparks, N. Estrella und D. B. Roy (2006a): "Altered geographic and temporal variability in phenology in response to climate change." *Global Ecology And Biogeography* 15(5): 498-504.
- Menzel, A., J. Von Vopelius, N. Estrella, C. Schleip und V. Dose (2006b): "Farmers' annual activities are not tracking the speed of climate change." *Climate Research* 32(3): 201-207.
- Meynen, E. und J. Schmithüsen (1962): "Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands." Verlag der Bundesanstalt für Landeskunde. Remagen.



- Pampus, M. (2005): "Einschätzungen zu möglichen und bereits nachweisbaren Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Biodiversität in Hessen." 151 S.
- Partanen, J., V. Koski und H. Hanninen (1998): "Effects of photoperiod and temperature on the timing of bud burst in Norway spruce (*Picea abies*).*" Tree Physiology* 18(12): 811-816.
- Reichhoff, L., H. Kugler, K. Refior und G. Warthemann (2001): "Die Landschaftsgliederung Sachsen-Anhalts. Stand: 01.01.2001." Ministerium für Raumordnung, Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.
- Reinhardt, F., M. Herle, F. Bastiansen und B. Streit (2003): "Ökonomische Folgen der Ausbreitung von Neobiota." Texte 79/03. Umweltbundesamt (Hrsg.). Berlin.
- Saxe, H., M. G. R. Cannell, B. Johnsen, M. G. Ryan und G. Vourlitis (2001): "Tree and forest functioning in response to global warming." *New Phytologist* 149(3): 369-399.
- Schirmer, H., W. Buschner, A. Cappel, H. G. Matthäus und M. Schlegel (1987): "Meyers kleines Lexikon Meteorologie." Meyers Lexikonverlag. Mannheim, Wien, Zürich. 496 S.
- Schnelle, F. (1955): "Pflanzen-Phänologie." Probleme der Bioklimatologie. Vol. 3 B. De Rudder und F. Ruttner (Hrsg.). Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.G. Leipzig.
- Schröder, W., G. Schmidt und J. Hasenclever (2005): "Korrelation meteorologischer und pflanzenphänologischer Indikatoren des Klimawandels." *Zeitschrift für Umweltchemie und Umwelttoxikologie. Beitragsserie Klimaänderung und Klimaschutz* 17(1): 94-105.
- Sparks, T. H. und A. Menzel (2002): "Observed changes in seasons: An overview." *International Journal of Climatology* 22(14): 1715-1725.
- Streitfert, A. (2005): "Einfluss steigender Temperaturen und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf Pflanzenphänologie und -anatomie." Institut für Pflanzenökologie Gießen, Justus-Liebig-Universität Gießen
- Streitfert, A. und L. Grünhage (2008): "Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen." INKLIM 2012, Baustein II plus, 08.09.2008. Darmstadt.
- Visser, M. E. und L. J. M. Holleman (2001): "Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology." *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 268(1464): 289-294.

### 3.7. Weinbau

#### Kernaussagen:

- Der Qualitätsweinbau wird in Sachsen-Anhalt weiterhin möglich sein, zum Teil unter günstigeren Bedingungen.
- Die Verbesserung der Wachstums- und Reifebedingungen überwiegt.
- Mögliche Veränderungen der Schaderregersituation konnten bisher nicht untersucht werden.
- Der Anbau thermisch anspruchsvollerer Sorten sollte geprüft werden.
- Weitergehende Beobachtungen der Meteorologie und Phänologie erscheinen notwendig.

#### 3.7.1. Einleitung

Mit 676,27 ha Gesamtfläche (einschl. Thüringen) zählt das Weinbaugebiet Saale-Unstrut zu den kleinen Anbaugebieten Deutschlands (Stand 31.12.2008). Im Jahre 2006 wurde ein Ertrag von 46.732 hl erzielt. Die Weingüter konzentrieren sich im äußersten Süden Sachsen-Anhalts überwiegend an den Hängen der Flusstäler von Saale und Unstrut (vgl. Abb. 3.7.1).

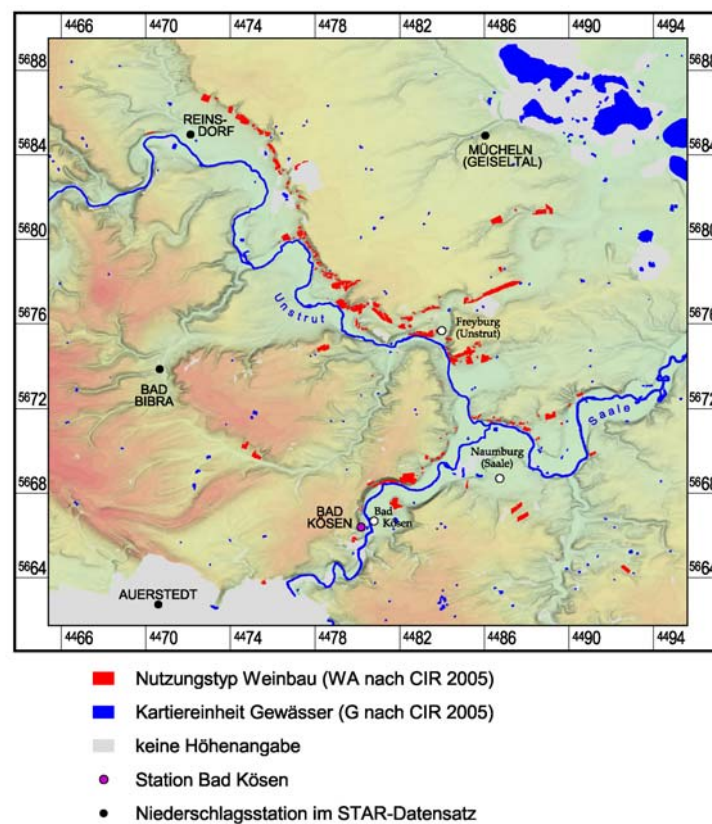
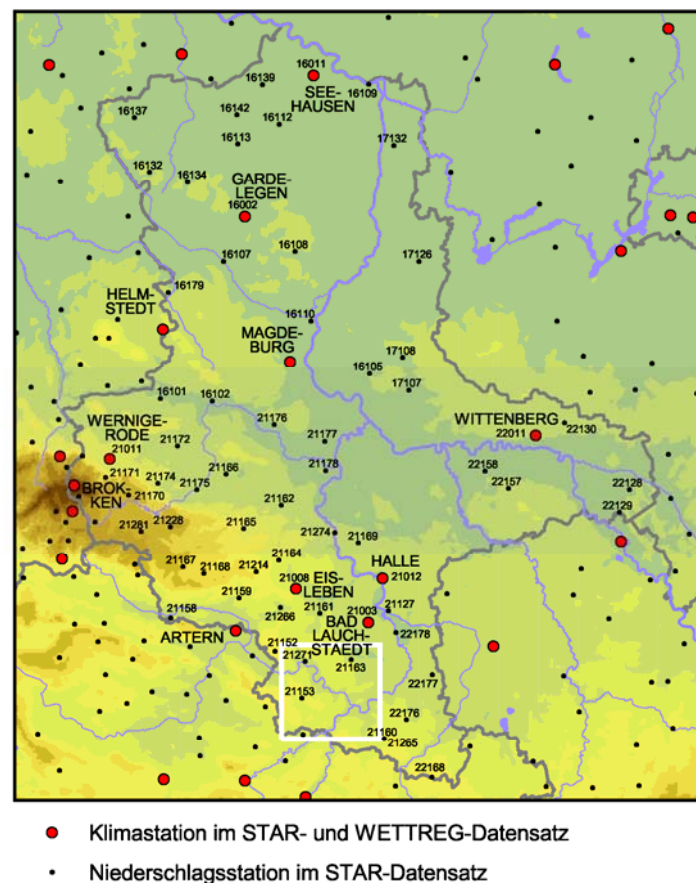


Abb. 3.7.1: Weinbauflächen in Sachsen-Anhalt

Das Brandenburgische Weingut am Wachtelberg in Werder (6,2 ha) ist ebenfalls diesem Weinbaugebiet zugeordnet. In Sachsen-Anhalt befinden sich weitere Rebflächen im Raum Jessen, die jedoch dem sächsischen Weinbaugebiet zugehören. Es überwiegen Weißweinsorten (73,70 % der Gesamtfläche), darunter als wichtigste Sorten Müller-Thurgau (18,29 %), Weißburgunder (12,28 %), Grüner Silvaner (8,46 %) und Riesling (7,46 %). In den letzten Jahren hat sich der Anteil von Rotweinen auf derzeit 26,30 % erhöht. Wichtige Rotweinsorten sind Dornfelder (7,24 %), Portugieser (6,82 %) sowie Blauer Spätburgunder (4,03 %). Die wichtigsten Erzeuger sind die Winzervereinigung Freyburg eG und das Landesweingut Kloster Pforta GmbH. Inwiefern das Weinbaugebiet Saale-Unstrut zunehmend vom Klimawandel beeinflusst wird oder werden könnte, wird im Folgenden anhand regional relevanter klimatischer und phänologischer Kenngrößen untersucht.



**Abb. 3.7.2: Haupt- und Niederschlagsstationen in Sachsen-Anhalt mit dem in Abb. 3.7.1 genutzten Ausschnitt**

### 3.7.2. Datengrundlage und Methodik

Für den Weinsektor wurde aus Gründen der Datenverfügbarkeit das Klimamodell STAR II verwendet. Um eine Vergleichbarkeit mit den anderen beiden regionalen Klimamodellen dieser Klimawirkungsanalyse zu ermöglichen, wurde aus den Modellläufen von STAR II eine Auswahl an Szenarien getroffen: eine Erwärmung von 1,0 K, 1,5 K und 2,0 K sowie das SRES A1B als wahrscheinlichstes Szenario. Dabei wurde jeweils die mittlere Realisie-



rung (normal) untersucht. Eine Analyse der verfügbaren meteorologischen Daten im Weinbaugebiet Saale-Unstrut zeigte, dass keine der in WETTREG bzw. STAR II enthaltenen Stationen direkt im Weinbaugebiet liegt (vgl. Abb. 3.7.2).

Nach umfangreichen Recherchen, die gemeinsam mit den verantwortlichen Bearbeitern des Amtes für Landwirtschaft, Flurneuordnung und Forsten (ALFF) Bad Kösen, des Landesweinguts Kloster Pforta GmbH und der Niederlassung Leipzig des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt wurden, konnte keine ausreichende meteorologische Datengrundlage innerhalb des Weinbaugebietes gefunden werden. Die durch das ALFF bereitgestellten meteorologischen Daten für Bad Kösen wurden für den verfügbaren, sehr kurzen Zeitraum (01.01.1995-31.12.2006) mit den Daten der im Unstruttal nächstgelegenen Hauptstation Artern verglichen (Tab. 3.7.1). Dabei wurde eine hinreichende Übereinstimmung bei den thermischen Bedingungen gefunden, während bei den Niederschlagssummen erhebliche Abweichungen auftraten. Der kurze Beobachtungszeitraum für die Station Bad Kösen ließ keine Generierung darauf aufbauender Zukunftsszenarien zu. Aus diesem Grunde wurden die im Folgenden aufgeführten Untersuchungen an der Hauptstation Artern durchgeführt. Auf mögliche Einschränkungen bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse von Artern auf Bad Kösen wird jeweils in den einzelnen Abschnitten der Auswertung eingegangen.

**Tab. 3.7.1: Vergleich der meteorologischen Werte der Stationen Artern und Bad Kösen für den Zeitraum 01.01.1995-31.12.2006**

Tageswerte	Einheit	Bad Kösen	Artern	Differenz
Mitteltemperatur	°C	9,67	9,44	0,23
Maximumtemperatur	°C	14,19	13,93	0,26
Minimumtemperatur	°C	5,54	5,38	0,17
Mittel der relativen Feuchte	%	76,05	78,26	-2,21
Sonnenscheindauer	h	4,90	4,53	0,37
Mittel des Bedeckungsgrades	1/8	4,94	5,52	-0,58
Dampfdruck	hPa	9,86	9,89	-0,02
Niederschlagshöhe	mm	603,90	493,18	110,72



### 3.7.2.1. Der Huglin-Index

Der Huglin-Index (Huglin 1986) ist als Wärmesumme über Tagesmittel- und Tagesmaximumwerte der Lufttemperatur für den Zeitraum April bis September definiert.

**Gleichung: Huglin-Index**

$$H := \sum_{t=01.apr}^{30.sep} K(x_{Lat}) \cdot \frac{(T_{mit}(t) - 10^{\circ}\text{C}) + (T_{max}(t) - 10^{\circ}\text{C})}{2}$$

mit  $x_{Lat}$  Geographische Breite [ $^{\circ}\text{NB}$  oder  $^{\circ}\text{SB}$ ]  
 $K(x_{Lat})$  Breitengradabhängiger Korrekturfaktor [ $\div$ ] folgender Form:

$$K(x_{Lat}) := \begin{cases} 1.02 & |x_{Lat}| \leq 40^{\circ} \\ 1.02 + 0.04 \cdot \frac{x_{Lat} - 40^{\circ}}{10^{\circ}} & 40^{\circ} < |x_{Lat}| < 50^{\circ} \\ 1.06 & |x_{Lat}| \geq 50^{\circ} \end{cases}$$

$T_{mit}(t)$  Tagesmittel ( $T_{mit}$ ) der Lufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{max}(t)$  Tagesmaximum ( $T_{max}$ ) der Lufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Mit dem Huglin-Index kann ausschließlich ermittelt werden, ob der Wärmebedarf bestimmter Sorten unter den entsprechenden thermischen Bedingungen während der Vegetationsperiode erfüllt wird oder nicht. Damit stellt er eine notwendige Bedingung dar, inwieweit ein Anbau spezifischer Sorten aus thermischer Sicht potentiell sinnvoll ist. Insbesondere lassen sich aus diesem Index keine Aussagen zu anderen Einflüssen (Auftreten und Wirkung von Schaderregern, Bodeneigenschaften, Qualitätsmerkmale und dergleichen) oder etwaige Anbauempfehlungen ableiten (Stock et al. 2007). Da der Huglin-Index sich ausschließlich als verallgemeinerte Temperatursumme berechnet, ist eine enge Übertragung der für die Station Artern ermittelten Ergebnisse für den Standort Bad Kösen möglich.

**Tab. 3.7.2: Huglin-Indizes für wichtige Sorten**

Huglin-Index H	Farbcode	Ausgewählte anbauwürdige Rebsorten
$H = 1500$		kein Anbau empfohlen
$1500 < H = 1600$		Müller-Thurgau
$1600 < H = 1700$		Pinot blanc, Gamay noir
$1700 < H = 1800$		Riesling, Chardonnay, Sylvaner, Sauvignon blanc, Pinot noir
$1800 < H = 1900$		Cabernet franc
$1900 < H = 2000$		Chinon blanc, Cabernet sauvignon, Merlot
$2000 < H = 2100$		Ugni blanc
$2100 < H = 2200$		Grenache, Syrah
$2200 < H = 2300$		Carignan
$2300 < H = 2400$		Aramon

Die zeitliche Abfolge einzelner Entwicklungsstadien und deren Eintrittszeitpunkte bei annualen und perennialen Pflanzen wird üblicherweise als Phänologie bezeichnet. Dieser biologischen Uhr bzw. der „erlebten“ biologischen Zeit kommt innerhalb der Vegetationsperiode eine Schlüsselrolle bei der Aktivierung und Deaktivierung wichtiger Prozesse sowie deren Synchronisierung zu. Der Entwicklungsablauf von der Winterruhe bis zum Laubfall am Rebstock lässt sich in standardisierter Dezimalform (Lorenz et al. 1994) mit Werten zwischen 00 und 100 im Dezimalcode bzw. BBCH-Code<sup>1</sup> beschreiben. Der Einfluss der einzelnen meteorologischen Parameter auf Wachstum, Entwicklungs- und Reifeprozess des Weines ist in den einzelnen Entwicklungsstadien unterschiedlich. Damit werden bei Nutzung eines funktionsfähigen Phänologiemodells sehr detaillierte Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen in den einzelnen Entwicklungsstadien möglich.

### 3.7.2.2. Das Phänologiemodell

Die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Untersuchungen der Rebphänologie und wichtiger abgeleiteter weinbaulich relevanter Klimagrößen basieren auf einem Phänologiemodell nach Hoppmann & Berkelmann-Löhnertz (2000). Das Modell PhenologyVinifera 1.0 wurde zur Beschreibung der Phänologie von Riesling unter Nutzung von Beobachtungen in der Lage Fuchsberg (Geisenheim) im Rheingau entwickelt. Der Ablauf der Phänologie wird wesentlich durch die thermischen Verhältnisse bestimmt und von den übrigen Einflussgrößen nur modifiziert. Durch die gefundene weitgehende Übereinstimmung dieser Verhältnisse an den Standorten Artern und Bad Kösen sollte die Übertragung der Ergebnisse des Phänologiemodells möglich sein.

### 3.7.2.3. Eingangsgrößen

Zur Berechnung der Rebphänologie wurden die Tageswerte der folgenden meteorologischen Größen verwendet:

$T_{\min}$	Minimum der Lufttemperatur [°C]
$T_{\max}$	Maximum der Lufttemperatur [°C]
$r_H$	Mittel der relativen Luftfeuchte [%]
$p_D$	Mittel des Dampfdrucks [hPa]
$P_P$	Summe Niederschlag [mm]
$Q$	Summe Globalstrahlung [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

### 3.7.2.4. Phänologische Phasen

Die Einteilung der phänologischen Entwicklung ist aus Tab. 3.7.3 ersichtlich. Als Reifephase wird der Entwicklungsabschnitt zwischen Reifebeginn und Lesereife definiert.

<sup>1</sup> Dieser Code wird ausgegeben von der Biologischen Bundesanstalt, dem Bundessortenamt und der Chemischen Industrie (daher die Abkürzung BBCH) und soll Auskunft über das morphologische Entwicklungsstadium einer Pflanze geben.



**Tab. 3.7.3: Einteilung der Rebphänologie in sechs Hauptphasen**

Phase	Beginn	BBCH	Ende	BBCH	Triebkräfte
1	Dormanz	00	Austrieb	09	$T_{\min}, T_{\max}$
2	Austrieb	09	Blühbeginn	61	$T_{\min}, T_{\max}$
3	Blühbeginn	61	Blühende	69	$T_{\min}, T_{\max}, r_H, p_D$
4	Blühende	69	Reifebeginn	81	$T_{\min}, T_{\max}, r_H, p_D, P_P, Q$
5	Reifebeginn	81	Lesereife	89	$T_{\min}, T_{\max}, r_H, p_D, P_P, Q$
6	Lesereife	89	Dormanz	100	

### 3.7.2.5. Weinbaulich relevante Klimagrößen

Durch die Nutzung des Phänologiemodells lassen sich eine Vielzahl von weinbaulich relevanten Klimakenngrößen berechnen (vgl. Tab. 3.7.4). In die Auswertung zur Analyse möglicher kritischer Klimaeinflüsse wurden daraus exemplarisch einige weinbaulich besonders relevante Klimagrößen einbezogen:

- Schadfröste ( $T_{\min} < -15^{\circ}\text{C}$ )
- Spätfröste nach Austrieb und vor Blühbeginn ( $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ )
- Thermische Wachstums- und Reifebedingungen, einschließlich der Tropennächte ( $T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ )
- Feuchteverhältnisse ab Blühende und Fäulnisrisiken in der Reifephase.

Tab. 3.7.4: Weinbaulich relevante Klimagrößen

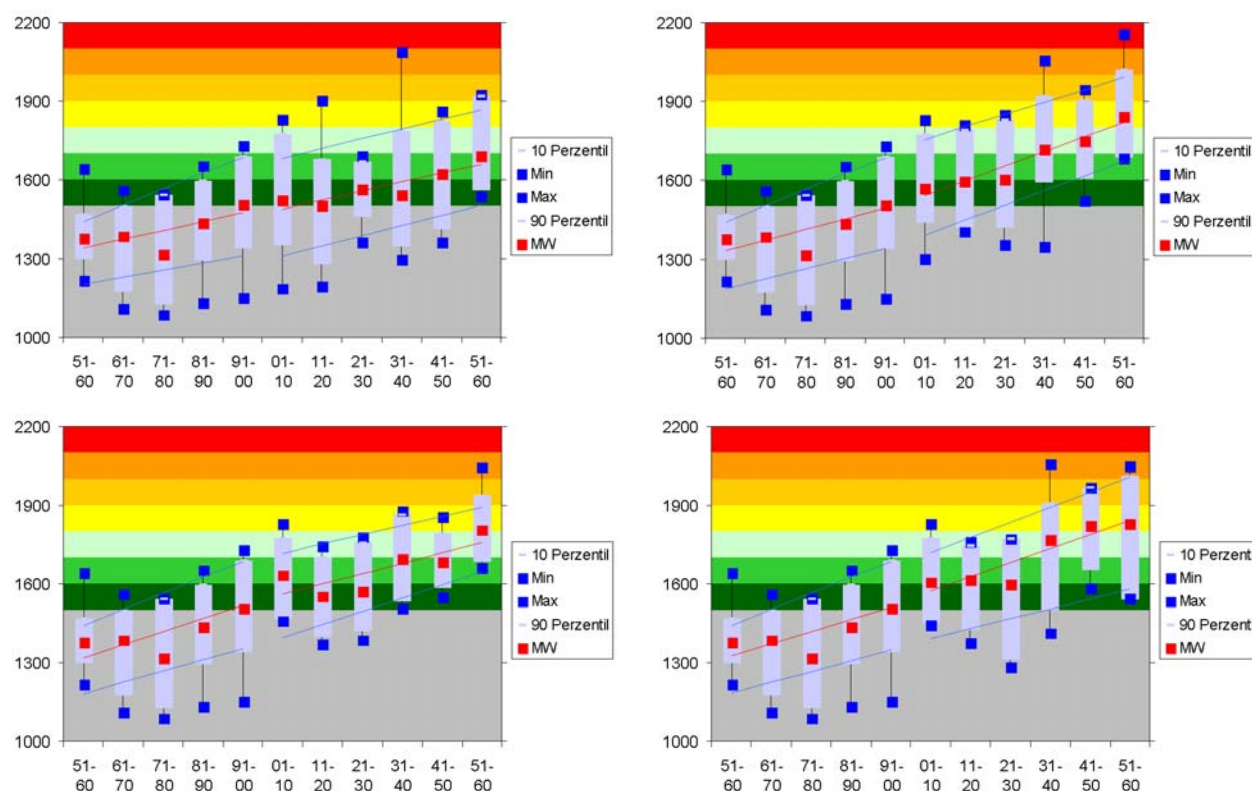
Ausgabename	Modellintern	Phän	Bedeutung	Variable	Einheit	Bedingung
Variable				lfd. Jahr	AD	
FST	IFrostSchadTage	1	Frostschadtage ab 1.1. vor Veg.-Beg.	Anzahl	Tage	Tmin<-15°C
FS2	IIFrostSchadTage2	1	Frostschadtage nach Lese nach Veg.-Ende	Anzahl	Tage	Tmin<-15°C
ISF	ISpaetFrost	2	Thermischer Spätfrost	Anzahl	Tage	Tmin<0°C
ISt	IStrahlFrost	2	Radiativer Spätfrost	Anzahl	Tage	Tmin<2°C; Bewo<=4/8; Wind<=1.5m/s
IFF	IFruehFrost	5	Frühfrost	Anzahl	Tage	Tmin<0°C
IrA	IRebSchnell	2	Rebwachstum Schnell	Anzahl	Tage	20°C<=Tmax<25°C
IrO	IRebOpt	2	Rebwachstum Optimum	Anzahl	Tage	25°C<=Tmax<30°C
IrD	IRebDec	2	Rebwachstum verlangsamt	Anzahl	Tage	30°C<=Tmax<35°C
IrI	IRebInh	2	Rebwachstum gehemmt	Anzahl	Tage	35°C<=Tmax
IRA	IRebSchnell6	4	Rebwachstum Schnell	Anzahl	Tage	20°C<=Tmax<25°C
IRO	IRebOpt6	4	Rebwachstum Optimum	Anzahl	Tage	25°C<=Tmax<30°C
IRS	IRebSubOpt6	4	Rebwachstum Suboptimum	Anzahl	Tage	30°C<=Tmax<35°C
IRD	IRebDec6	4	Rebwachstum verlangsamt	Anzahl	Tage	35°C<=Tmax
ImD	IReifDecMin	5	Reife verlangsamt durch Tmin	Anzahl	Tage	Tmin<=7°C
ImC	IReifCommod	5	Reife günstig	Anzahl	Tage	7°C<Tmin<=20°C
ImU	IReifUnCommod	5	Reife ungünstig	Anzahl	Tage	20°C<Tmin
IMA	IReifSchnell	5	Reife schnell	Anzahl	Tage	20°C<=Tmax<25°C
IMO	IReifOpt	5	Reife optimal	Anzahl	Tage	25°C<=Tmax<30°C
IMS	IReifSubOpt	5	Reife suboptimal	Anzahl	Tage	30°C<=Tmax<35°C
IMD	IReifDec	5	Reife ungünstig	Anzahl	Tage	35°C<=Tmax
IB	IBluehD	3	Blühdauer verlangsamt Tmin	Anzahl	Tage	Tmin<=10°C
IEW	IEisWeinTage	1	Anzahl möglicher Eiswein-Tage	Anzahl	Tage	Tmin<=-7°C
Eiswein_am	CEisweinDatum	1	Erster möglicher Eisweinlesetag (Vorjahr)	Datum	Datum	Tmin<=-7°C
IT	ITrock	2-5	Anzahl der Trockentage gesamte Veg.-Per.	Anzahl	Tage	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
ITP	ITrockPhase	2-5	Anzahl der Trockenphasen gesamte Veg.-Per.	Anzahl	Ereignis	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
IT2	ITrock4	2	Anzahl der Trockentage	Anzahl	Tage	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
IP2	ITrockPhase4	2	Anzahl der Trockenphasen	Anzahl	Ereignis	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
SP2	SumPetvTrock4	2	Summe der pot. Evapotransp. in Trockenphasen	Summe	mm	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
IT3	ITrock5	3	Anzahl der Trockentage	Anzahl	Tage	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
IP3	ITrockPhase5	3	Anzahl der Trockenphasen	Anzahl	Ereignis	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
SP3	SumPetvTrock5	3	Summe der pot. Evapotransp. in Trockenphasen	Summe	mm	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
IT4	ITrock6	4	Anzahl der Trockentage	Anzahl	Tage	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
IP4	ITrockPhase6	4	Anzahl der Trockenphasen	Anzahl	Ereignis	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
SP4	SumPetvTrock6	4	Summe der pot. Evapotransp. in Trockenphasen	Summe	mm	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
IT5	ITrock7	5	Anzahl der Trockentage	Anzahl	Tage	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
IP5	ITrockPhase7	5	Anzahl der Trockenphasen	Anzahl	Ereignis	Nied=0 ; min. 2 Tage lang

Ausgabename	Modellintern	Phän	Bedeutung	Variable	Einheit	Bedingung
Variable				lfd. Jahr	AD	
SP5	SumPetvTrock7	5	Summe der pot. Evapotransp. in Trockenphasen	Summe	mm	Nied=0 ; min. 2 Tage lang
INs	INass	2-5	Anzahl der Nasstage gesamte Veg.-Per.	Anzahl	Tage	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
INP	INassPhase	2-5	Anzahl der Nassphasen gesamte Veg.-Per.	Anzahl	Ereignis	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
IN2	INass4	2	Anzahl der Nasstage	Anzahl	Tage	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
Ip2	INassPhase4	2	Anzahl der Nassphasen	Anzahl	Ereignis	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
SW2	SumNiedWet4	2	Summe der Niederschläge in Nassphasen	Summe	mm	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
IN3	INass5	3	Anzahl der Nasstage	Anzahl	Tage	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
Ip3	INassPhase5	3	Anzahl der Nassphasen	Anzahl	Ereignis	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
SW3	SumNiedWet5	3	Summe der Niederschläge in Nassphasen	Summe	mm	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
IN4	INass6	4	Anzahl der Nasstage	Anzahl	Tage	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
Ip4	INassPhase6	4	Anzahl der Nassphasen	Anzahl	Ereignis	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
SW4	SumNiedWet6	4	Summe der Niederschläge in Nassphasen	Summe	mm	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
IN5	INass7	5	Anzahl der Nasstage	Anzahl	Tage	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
Ip5	INassPhase7	5	Anzahl der Nassphasen	Anzahl	Ereignis	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
SW5	SumNiedWet7	5	Summe der Niederschläge in Nassphasen	Summe	mm	Nied>0 ; min. 2 Tage lang
P2	SumPoteV4	2	Summe der pot. Evapotranspiration	Summe	mm	2<=Phäno<=5
P3	SumPoteV5	3	Summe der pot. Evapotranspiration	Summe	mm	2<=Phäno<=5
P4	SumPoteV6	4	Summe der pot. Evapotranspiration	Summe	mm	2<=Phäno<=5
P5	SumPoteV7	5	Summe der pot. Evapotranspiration	Summe	mm	2<=Phäno<=5
SN2	SumNied4	2	Summe der Niederschläge	Summe	mm	2<=Phäno<=5
SN3	SumNied5	3	Summe der Niederschläge	Summe	mm	2<=Phäno<=5
SN4	SumNied6	4	Summe der Niederschläge	Summe	mm	2<=Phäno<=5
SN5	SumNied7	5	Summe der Niederschläge	Summe	mm	2<=Phäno<=5
WB2	WSB4	2	Wasserbilanz	Summe	mm	2<=Phäno<=5
WB3	WSB5	3	Wasserbilanz	Summe	mm	2<=Phäno<=5
WB4	WSB6	4	Wasserbilanz	Summe	mm	2<=Phäno<=5
WB5	WSB7	5	Wasserbilanz	Summe	mm	2<=Phäno<=5

### 3.7.3. Ergebnisse

#### 3.7.3.1. Entwicklung des Huglin-Index

Der Huglin-Index zeigt für alle vier verwendeten Szenarien einen Anstieg seit den 1950er Jahren. Seit den 1990er Jahren ist dabei ein Niveau erreicht worden, das zunehmend den Anbau thermisch anspruchsvollerer Sorten erlaubt. Dieser Trend setzt sich auch in allen vier Zukunftsszenarien fort, wenn auch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. In den nächsten Jahrzehnten werden sich damit die thermischen Bedingungen für den Anbau in der Vegetationsperiode weiter verbessern. So könnten (ab etwa 2020-2030) beispielsweise Riesling, Sauvignon blanc, Spätburgunder, in besonders günstigen Lagen eventuell auch Cabernet-Sorten eine wachsende Bedeutung gewinnen. Es können jedoch aus dem Huglin-Index keine Aussagen zu den thermischen Bedingungen außerhalb der Vegetationsperiode (z.B. Schadfrost) und zu detaillierten, Weinbaulich relevanten meteorologischen Abläufen (z.B. Spätfrost, Feuchtigkeitsverhältnisse, Fäulnisbegünstigung) abgeleitet werden. Viele dieser Kenngrößen sind phänologie- und somit sortenabhängig, weshalb eine umfassende Analyse hier nicht möglich war.



**Abb. 3.7.3: Entwicklung des Huglin-Index am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für die Szenarien mit einer Erwärmung um 1,0K (o. li.), 1,5K (u. li.) bzw. 2,0K (o. re.) und für das Szenario A1B (u. re.).**



### 3.7.3.2. Auswirkungen auf die Rebphänologie

#### Zeitlicher Ablauf der Phasen

Alle wichtigen Phasen der phänologischen Entwicklung zeigen seit den 1950er Jahren eine Verfrühung. Diese Tendenz setzt sich auch in allen vier Szenarien fort. Nur für die unwahrscheinliche 1.0K-Erwärmung ist eine Stabilisierung des Austriebstermins auf dem Niveau der 1990er Jahre zu erwarten. Alle anderen Szenarien zeigen eine starke Verfrühung aller Phasen, bis hin zu Austriebsterminen ab Ende der ersten bis Mitte der zweiten Aprildekade (vgl. Abb. 3.7.4). Auch die Reifung wird in Zukunft immer früher im Jahresverlauf stattfinden. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen werden im Abschnitt 3.7.3.3 erläutert.

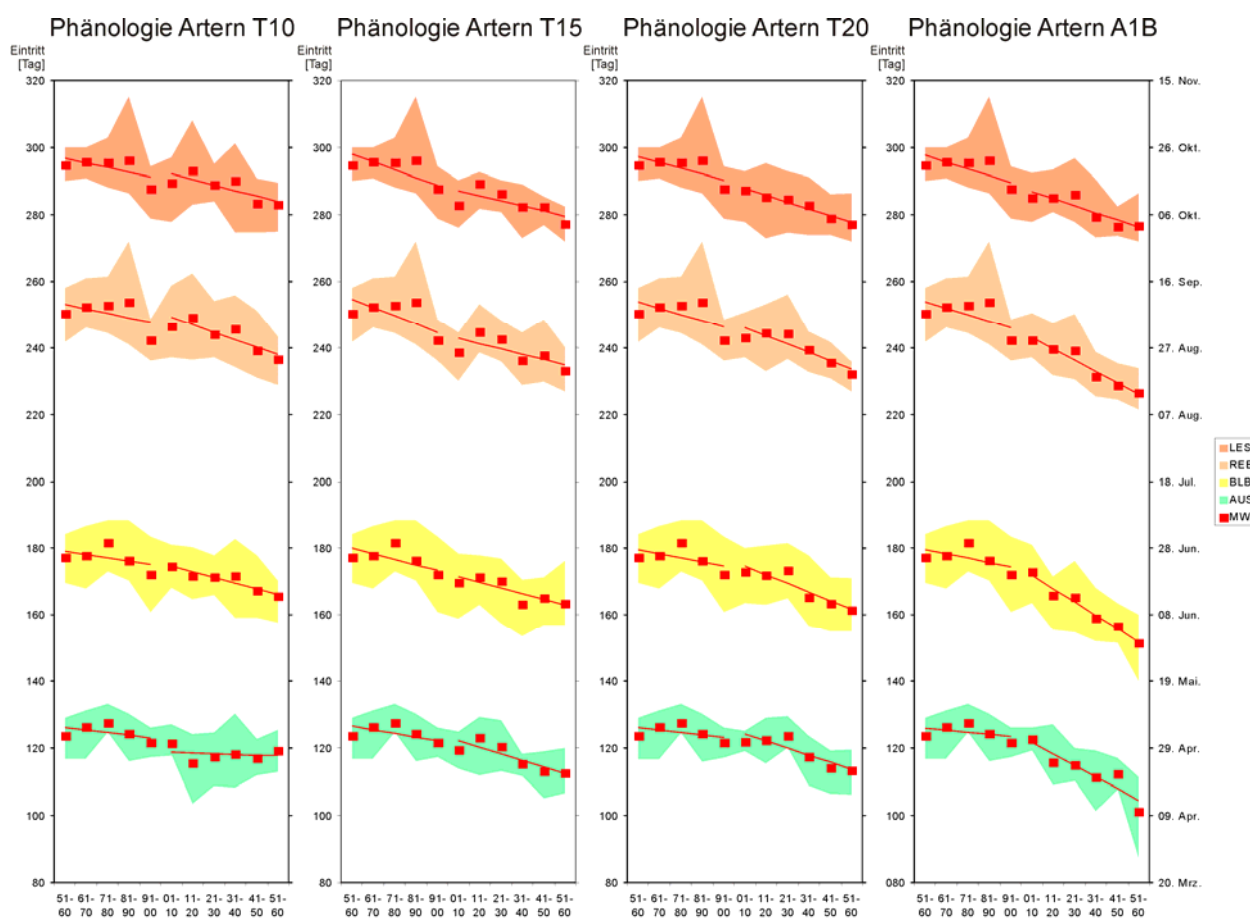
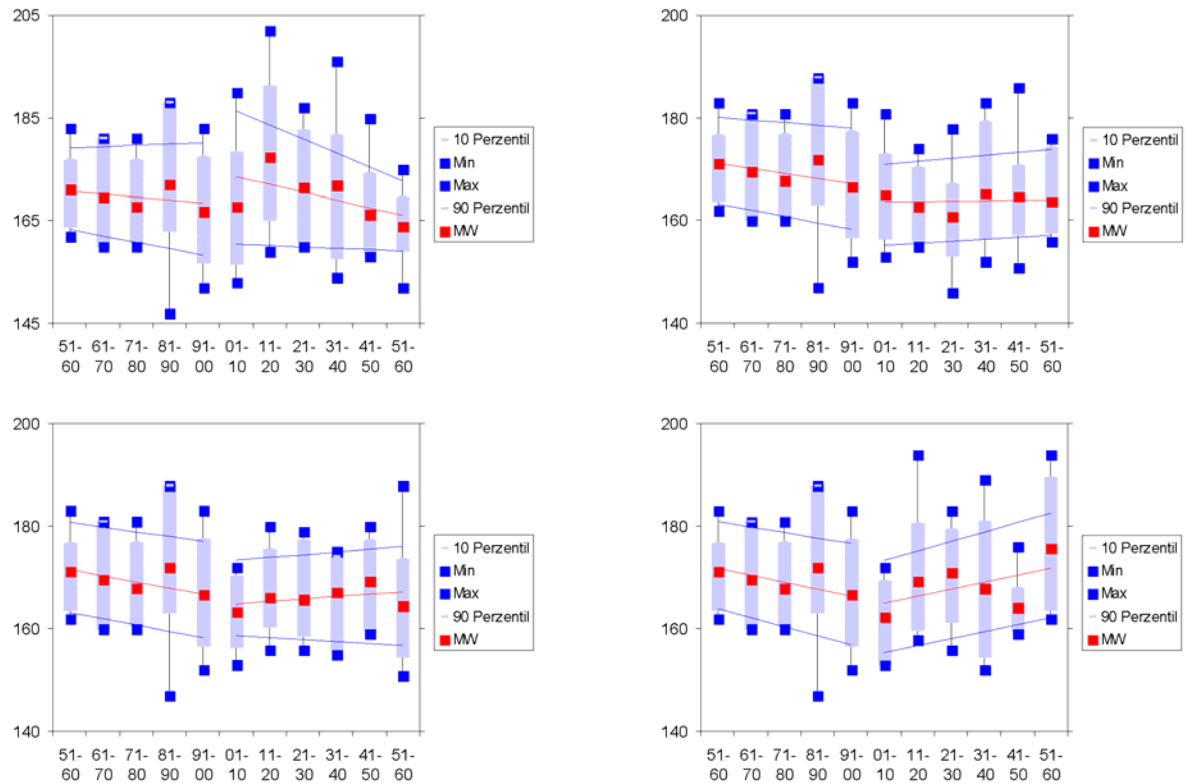


Abb. 3.7.4: Entwicklung des zeitlichen Ablaufes der phänologischen Phasen

Austrieb (AUS), Blühbeginn (BLB), Reifebeginn (REB) und Lesereife (LES) für *Vitis vinifera* L. cv Riesling am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für die Szenarien mit einer Erwärmung um 1,0K, 1,5K bzw. 2,0K und für das Szenario A1B (v. l. n. r.).

#### Dauer der Vegetationsperiode

Trotz unterschiedlicher Tendenzen (sowohl geringe Verlängerung als auch Verkürzung) zeigt sich, dass die Dauer der Vegetationsperiode (von Austrieb bis Lesereife) in allen Szenarien in einem Bereich liegt, der für den Anbau der recht anspruchsvollen und spät-reifenden Sorte Riesling notwendig ist. Damit kann in Zukunft für diese und alle früher reifenden Sorten von einer genügend langen Vegetationsperiode ausgegangen werden.



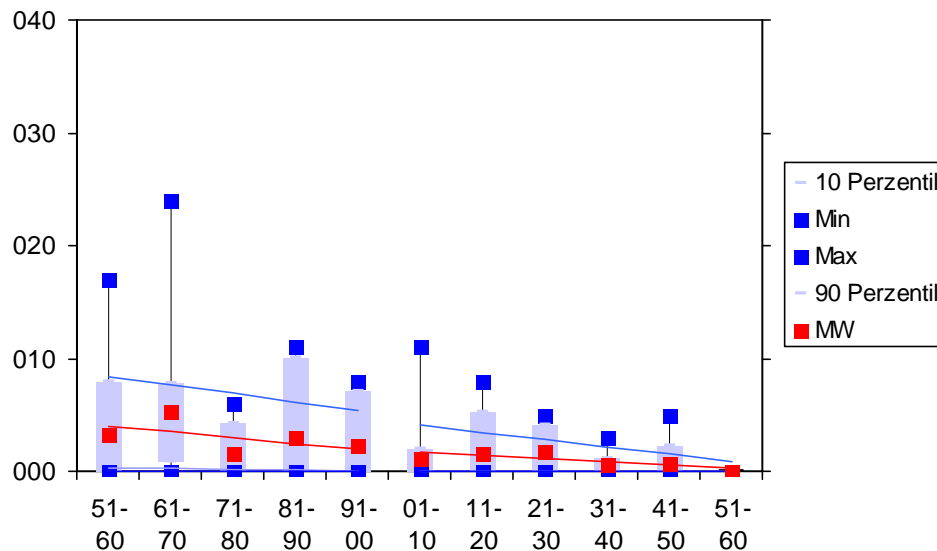
**Abb. 3.7.5: Entwicklung der Länge der jährlichen Vegetationsperiode**

Die Grafiken zeigen die Entwicklung der jährlichen Vegetationsperiode von *Vitis vinifera* L. cv Riesling am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für die Szenarien mit einer Erwärmung um 1,0K (o. li.), 1,5K (u. li.) bzw. 2,0K (o. re.) und für das Szenario A1B (u. re.).

### 3.7.3.3. Änderungen weinbaulich relevanter Klimagrößen

#### Schadfröste

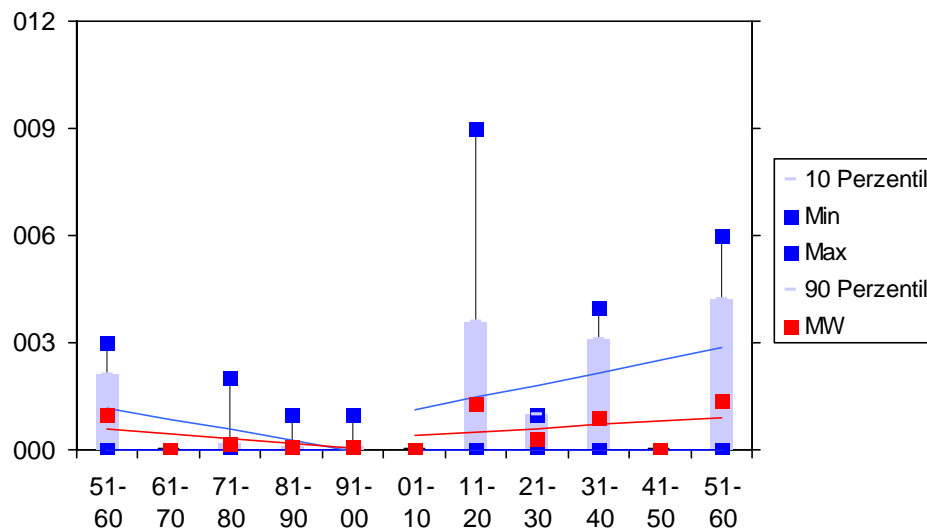
Die Häufigkeit von Schadfrösten zeigt seit 1951 eine deutliche Tendenz zur Abnahme, die sich im Zukunftsszenario fortsetzt. Schadfröste werden in den kommenden Jahrzehnten immer seltener. Im Wesentlichen verbessern sich dadurch die Anbaubedingungen, insbesondere für den Aufwuchs von Junganlagen.



**Abb. 3.7.6: Entwicklung der Häufigkeit des Auftretens von Schadfrösten am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für das Szenario A1B.**

### Spätfröste

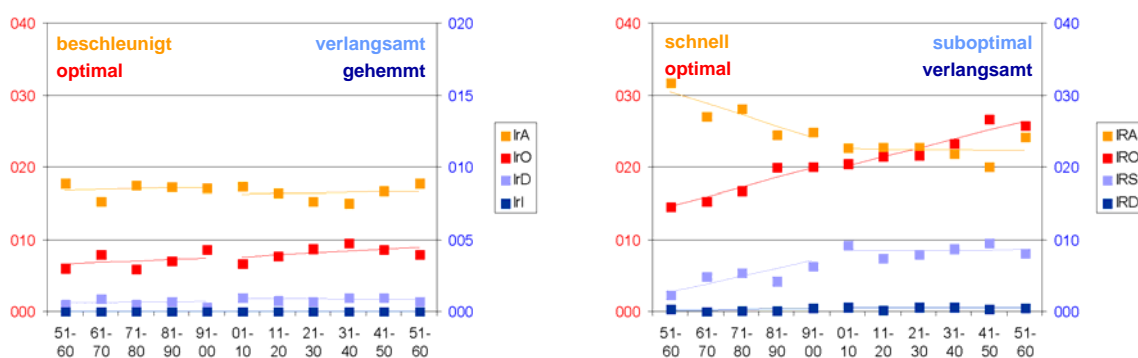
Die Spätfröste (definiert durch  $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$  nach Austrieb) zeigen seit den 1950er Jahren bis zur Gegenwart eine deutliche Tendenz zur Abnahme. In den nächsten Jahrzehnten besteht jedoch weiterhin das Risiko für Spätfröste. Insbesondere wegen des zunehmend früheren Austriebs kann sich die Anzahl der Spätfröste wieder erhöhen. Dieses Ergebnis verdeutlicht exemplarisch die Komplexität der Abschätzung von Klimawirkungen für den Weinbau in Sachsen-Anhalt und geht damit über einfache, nicht mit einem dynamischen Phänologiemodell gestützte Abschätzungen hinaus.



**Abb. 3.7.7: Entwicklung der Häufigkeit des Auftretens von Spätfrösten am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für das Szenario A1B.**

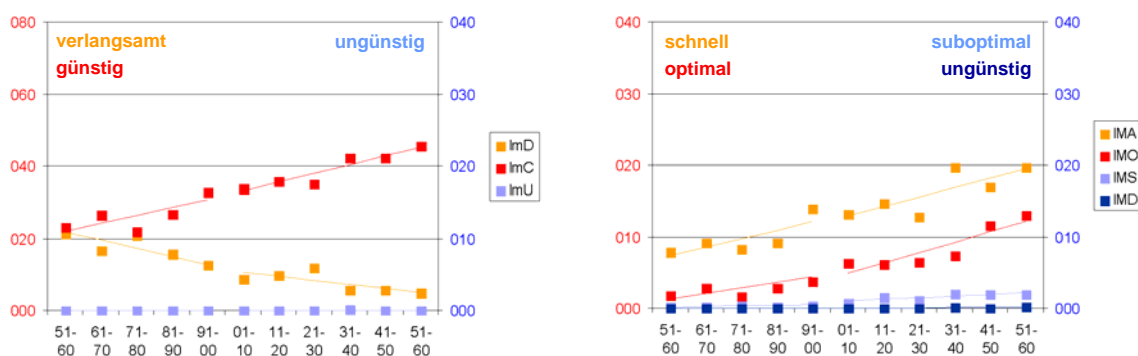
### Thermische Entwicklungsbedingungen

Die thermischen Entwicklungsbedingungen wurden getrennt für die Hauptwachstums- und die Reifephase untersucht. Die thermischen Bedingungen während der Hauptwachstums- und Reifephase werden sich in den nächsten Jahrzehnten im Allgemeinen verbessern. Insbesondere das Auftreten ungünstiger Bedingungen für Wachstum und Reife durch zu geringe Werte der täglichen Minimal- und Maximaltemperaturen geht deutlich zurück, gleichzeitig nimmt die Anzahl der Tage im und um den optimalen Bereich zu. Zu hohe Temperaturen, die sich negativ auswirken, treten im Szenario nicht auf, da die erwarteten Temperaturerhöhungen dafür zu gering ausfallen. Im Gegensatz zu südlicher gelegenen Weinbauregionen in Deutschland, die zunehmend unter zu hohen Nachttemperaturen leiden werden, konnten insbesondere keine für die Reifung ungünstigen Tropennächte für die Weinbaugebiete in Sachsen-Anhalt detektiert werden. Diese Bedingungen können sich positiv auf die angestrebte Weinqualität und den typischen Charakter der Saale-Unstrut-Weine auswirken.



**Abb. 3.7.8: Thermische Wachstumsbedingungen der Phasen Austrieb-Blüte und Blüte-Reife**

Die Grafiken zeigen die thermischen Wachstumsbedingungen ( $T_{max}$ ) für die Phase Austrieb bis Blüte (links) und Blüte bis Reifebeginn (rechts) am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für das Szenario A1B.



**Abb. 3.7.9: Thermische Bedingungen während der Reifephase**

Die Grafiken zeigen die thermischen Bedingungen als  $T_{min}$  (links) und  $T_{max}$  (rechts) am Standort Artern im Zeitraum 1951-2060 für das Szenario A1B.

### Feuchteverhältnisse ab Blühende und Fäulnisrisiken in der Reifephase

Eine detaillierte Analyse der Feuchtigkeitsverhältnisse wurde für den Standort Artern durchgeführt. Die Unterschiede der mittleren jährlichen Niederschlagssummen der Standorte Artern (493mm) und Bad Kösen (604mm) erscheinen zu groß, um eine verlässliche Übertragung der Ergebnisse sicher zu stellen. Daher wird an dieser Stelle auf die Darstellung der Ergebnisse verzichtet. Es wird nochmals darauf verwiesen, dass die Resultate zum Huglin-Index wegen seiner ausschließlichen Temperaturabhängigkeit nicht dieser Einschränkung unterliegen. Der Verlauf der Phänologie wird von dem aktuellen Temperaturverlauf dominiert und durch unterschiedliche Feuchteverhältnisse nur modifiziert, so dass auch die erarbeiteten Ergebnisse zu diesem Fragenkomplex auswertbar waren.

### 3.7.4. Zusammenfassung

Einige Bedingungen für den Weinbau werden sich in Sachsen-Anhalt in den nächsten Jahrzehnten ändern. Der Qualitätsweinbau wird weiter möglich sein. Aus Sicht der Bearbeiter überwiegen positive Wirkungen. Insbesondere die thermischen Bedingungen werden sich verbessern. Daher erscheint der zunehmende Anbau thermisch anspruchsvollerer Sorten möglich. Wachstum und Reife werden in Zukunft häufiger unter günstigeren bis hin zu optimalen Temperaturverläufen stattfinden. Es werden jedoch weiterhin einige der spezifischen und bisher typischen Gefährdungen (z. B. Spätfröste) bestehen bleiben.

### 3.7.5. Anpassungsoptionen

Durch die erwartete Verbesserung der thermischen Bedingungen während der Vegetationsperiode erweitert sich die Bandbreite der für den Anbau geeigneten Sorten wie Riesling, Sauvignon blanc, Spätburgunder. In besonders günstigen Lagen wird eventuell auch der Anbau von Cabernets möglich. Die thermischen Bedingungen für den Anbau der bereits jetzt zunehmend genutzten hochqualitativen Rebsorte Weißburgunder werden sich ebenfalls verbessern. Besonderer Aufmerksamkeit bedürfen ebenfalls Beobachtung und Auswertung von Schaderregerwirkungen. Ergänzend sollten meteorologische Größen und Phänologie wichtiger Sorten an typischen Standorten des Weinbaugebiets beobachtet werden.

### 3.7.6. Kenntnislücken und Handlungsbedarf

Während der Bearbeitung zeigte sich, dass die Datengrundlage (Meteorologie und Phänologie wichtiger Sorten) für detaillierte Untersuchungen und insbesondere die Erstellung/Nutzung fundierter Zukunftsszenarien nicht ausreichend war. Es wird im Ergebnis der Studie dringend empfohlen, meteorologische Beobachtungen nach DWD-Standard an wichtigen Weinbaustandorten (drei Stationen entlang der Unstrut) aufzunehmen bzw. weiterzuführen. Diese Messungen müssen für eine Nutzung der vorhandenen Modelllösungen folgende Werte umfassen:

- $T_{\text{mit}}$  Tagesmaximum der Lufttemperatur [°C]
- $T_{\text{mit}}$  Tagesmittel der Lufttemperatur [°C]
- $T_{\text{min}}$  Tagesminimum der Lufttemperatur [°C]

- $r_H$  Tagesmittel der relativen Feuchte [%]
- $p_D$  Tagesmittel des Dampfdrucks [hPa]
- $P_p$  Tagessumme des Niederschlags [mm]
- $Q$  Tagessumme der Globalstrahlung [ $J \cdot m^{-2}$ ]

Für wichtige bzw. potentiell wichtige Sorten wird die Aufnahme (bzw. Weiterführung) von Sortenprüfungen mit Beobachtungen wichtiger phänologischer Phasen und der wichtigsten weinbaulichen Parameter (mindestens Zucker- und Säuregehalt in der Reifephase; Schädlingsbefall) durch einen bis zwei der größeren Weinbaubetriebe unter Einbeziehung des Institutes für Weinbauforschung eV der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg empfohlen. Mindestens die Eintrittsdaten folgender Phasen sind zu bonitieren:

- AUS Austrieb [Datum]
- BLB Blühbeginn [Datum]
- BLE Blühende [Datum]
- REB Reifebeginn [Datum]
- LES Lesereife [Datum]
- DOR Dormanzbeginn [Datum]

Die Bearbeiter schätzen ein, dass der Rebsorte Weißburgunder im Hochqualitätssegment eine zunehmende Bedeutung zukommen wird. Empfohlen wird für weitergehende Untersuchungen ein gemeinsames Vorhaben durch das Landesweingut Klosterpforta GmbH, das Institut für Weinbauforschung eV der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und das PIK eV zum Weinbau an Saale-Unstrut unter den Bedingungen des Klimawandels.



*Box 3.7.1: Anpassungsempfehlungen zum Weinbau*

- Untersuchungen zum Anbau anspruchsvollerer Sorten wie Weißburgunder, Riesling, Sauvignon blanc, Spätburgunder und in besonders günstigen Lagen eventuell auch Cabernets. Abschätzungen ihrer potentiellen (ökonomischen) Bedeutung als ergänzende bzw. alternative Sortenwahl.
- Beobachtungen meteorologischer Größen und der Phänologie potenziell wichtiger Sorten an typischen Standorten des Weinbaugebiets.
- Beobachtung und Auswertung von Schaderregerwirkungen.
- Untersuchung klimatischen Einflusses auf zukünftige Bodenbeschaffenheit in Weinanbaugebieten.

*Box 3.7.2: Weiterführende Informationen zum Weinbau*
**Verbundvorhaben Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung (KLARA)  
Analyse spezifischer Verwundbarkeiten und Handlungsoptionen.**

**Auftraggeber:** Förderung durch Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

**Quelle:** <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr99.pdf>  
(Stand Oktober 2009)

**Ansprechpartner:** LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Prof. Dr. Manfred Stock, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).

**Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinanbau in Deutschland (Klima 2050)**

**Gefördert durch:** Forschungsring des deutschen Weinbaus bei der DLG

**Projektlaufzeit:** Juli 2003 bis März 2006

**Quelle:** <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr106.pdf>  
(Stand Oktober 2009)

**Ansprechpartner:** Prof. Dr. Manfred Stock, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).

**Indikatoren der klimabezogenen Vulnerabilität des deutschen Weinbaus gegenüber Schaderregern im Zeitraum 2010-2050 (INKLIV.2050)**

**Gefördert durch:** Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau

Rheinland Pfalz; Forschungsring des deutschen Weinbaus bei der DLG

**Projektlaufzeit:** Juli 2007 bis März 2010

**Ansprechpartner:** Prof. Dr. Manfred Stock, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).

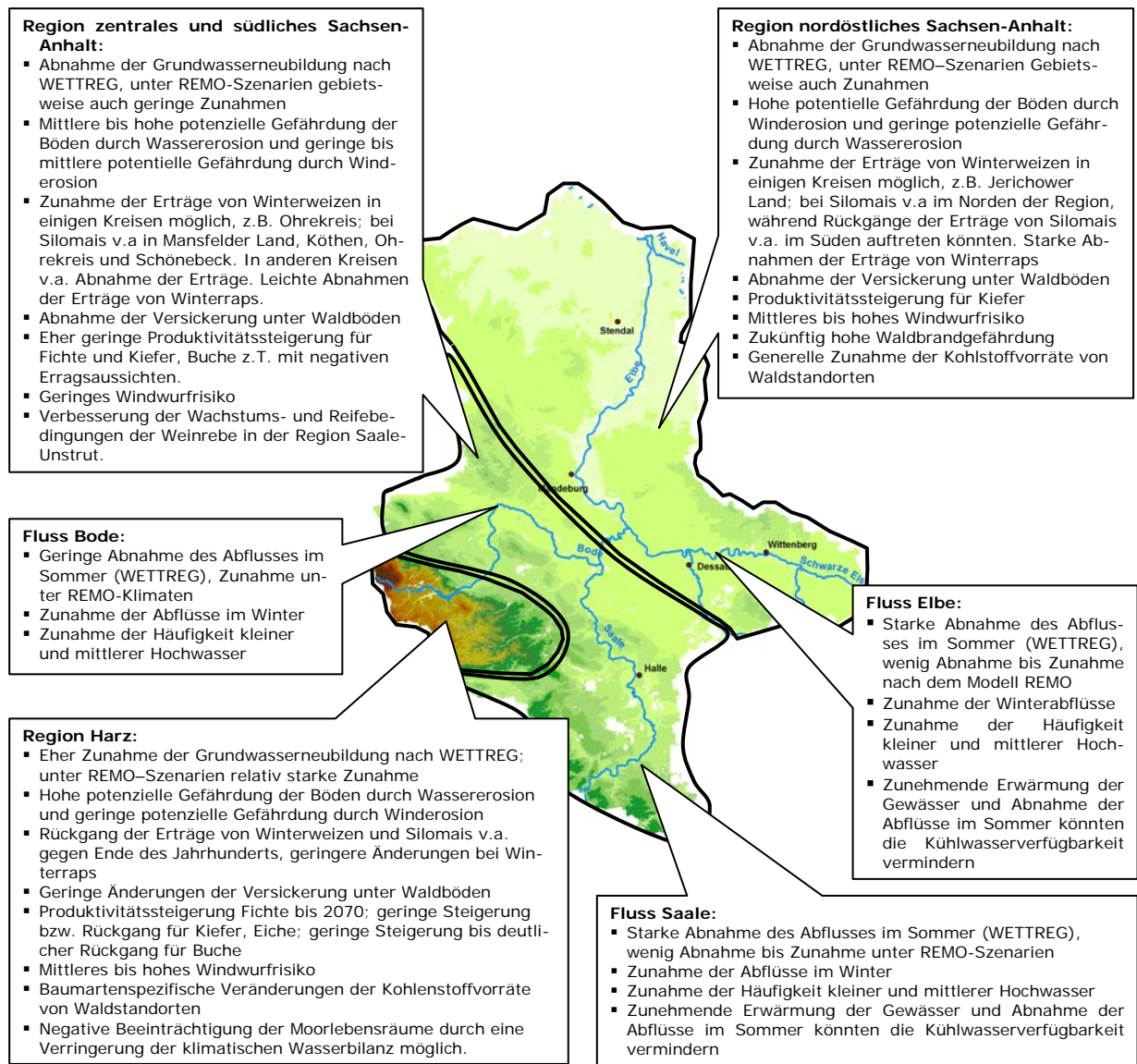
### 3.7.7. Literatur

- Hoppmann, D. und B. Berkelmann-Löhnertz (2000): "The prognosis of phenological stages of *Vitis vinifera* (cv. Riesling) for optimizing pest management." *EPPO Bulletin* 30: 121-126.
- Huglin, P. (1986): "Biologie et écologie de la vigne." Payot (Hrsg.). Lausanne, Switzerland. 370 S.
- Lorenz, D., K. Eichhorn, H. Blei-Holder, R. Klose, U. Meier und E. Weber (1994): "Phänologische Entwicklungsstadien der Weinrebe (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*)." *Wein-Wissenschaft* 49(2): 66-70.
- Stock, M., F. Badeck, F.-W. Gerstengarbe, T. Hoppmann, T. Kartschall, H. Österle, P. C. Werner und M. Wodinski (2007): "Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinanbau in Deutschland (Klima 2050)." PIK Report No. 106. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam.

## 4. Synthese der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Studie wurden mögliche zukünftige Klimawirkungen auf die ausgewählten Sektoren. Wasser, Boden, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz, Phänologie und Weinbau in Sachsen-Anhalt untersucht. Die Sektoren zeigen deutliche Unterschiede in den Klimawirkungen, insbesondere hinsichtlich ihrer räumlichen Ausprägung. Durch die zwei unterschiedlichen regionalen Klimamodelle (WETTREG und REMO), welche als Klimarandbedingung gewählt wurden, werden zwei unterschiedliche Klimawandelsignale für die Region vorgegeben (siehe Kapitel 2.5 und 2.6): Für beide steigt die Temperatur (Flächenmittel) um ca. 2,1-3,0°C (A2), 2,3-3,0 °C (A1B) bzw. 1,8-2,0°C (B1) bis zum Ende diesen Jahrhunderts an. Während die Niederschläge entgegen dem bereits im 20. Jahrhundert beobachteten Trend in den durch REMO simulierten Szenarien insgesamt steigen, nehmen sie, konform mit den Beobachtungsdaten, in den mit WETTREG simulierten Szenarien ab. Insgesamt fallen die durch REMO simulierten klimatischen Bedingungen in Sachsen-Anhalt deutlich feuchter und wärmer aus. Beide Klimamodelle schreiben jedoch den generellen, beobachteten Trend zu weniger Niederschlägen im Sommer und steigenden Niederschlägen im Winter fort. Dies bedeutet, zumindest für die REMO Simulationen, eine Intensivierung des Niederschlagsgeschehens in der Zukunft. Allerdings sind Extremereignisse bis heute in Klimamodellen nur unzureichend repräsentiert (siehe Kap. 2.7).

Die unterschiedlichen Ausprägungen der abgeleiteten Klimafolgen lassen sich qualitativ anhand von drei Großregionen Sachsens-Anhalts zusammenfassen: (i) für die Region Harz, (ii) die Region nordöstliches Sachsen-Anhalt sowie für das zentrale und südliche Sachsen-Anhalt. Eine Synthese der Auswirkungen auf die betrachteten Sektoren innerhalb dieser Regionen und auf die Flusseinzugsgebiete der Elbe, Saale und Bode ist in Abb. 4.1 dargestellt.



**Abb. 4.1: Räumliche Synthese der Auswirkungen der zu erwartenden klimatischen Veränderungen auf die betrachteten Sektoren Sachsen-Anhalts, differenziert nach drei Großregionen sowie den Flüssen Bode, Elbe und Saale**

Auch die Entwicklung des Abflussgeschehens in den Einzugsgebieten Sachsen-Anhalts wird durch die für die Zukunft projizierten klimatischen Randbedingungen geprägt (siehe Kapitel 3.1): Unter den klimatischen Bedingungen des Modells WETTREG zeigen die Abflüsse in der Elbe und Saale im Allgemeinen eine deutliche Verschiebung der Abflussspitzen in das zeitige Frühjahr und weniger Abfluss im Sommer. Die Flüsse Elbe und Saale werden besonders von einer Abnahme der Abflüsse in den Sommermonaten betroffen sein. Für die Weser kann unter den definierten Bedingungen zwar auch von Rückgängen des Abflusses im Sommer und einer Zunahme im Winter ausgegangen werden, aber insgesamt fallen die Rückgänge im Sommer geringer aus. Die Verringerung der sommerlichen Abflüsse und die zunehmende Erwärmung der Gewässer könnten unter diesen Szenarienbedingungen die Einhaltung ökologischer Parameter erschweren und die Kühlwasserverfügbarkeit vermindern. Diese Ergebnisse werden auch durch andere Studien (z.B. GLOWA-Elbe) unterstützt.

Mit der Klimarandbedingung des Modells REMO zeigt sich ein etwas anderes Bild: Zwar wird auch hier der Unterschied zwischen winterlichen und sommerlichen Abflüssen größer, aber durch die teilweise starke Zunahme der Niederschläge im Elbeinzugsgebiet sinken die sommerlichen Abflüsse kaum und zeigen insbesondere für das B1 Szenario sogar eine Zunahme der Abflüsse auch im Sommerhalbjahr. Noch stärker fällt allerdings die Zunahme im Winter aus.

Regional nehmen die Grundwasserneubildung und die Abflüsse mit dem Klimamodell WETTREG als Randbedingung im Windschatten des Harzes ab und in den westlichen Mittelgebirgslagen eher zu. Unter Verwendung der Klimadaten des Modells REMO nimmt die Grundwasserneubildung teilweise auch im zentralen Teil Sachsen-Anhalts ab, aber räumlich deutlich weniger ausgeprägt, und in den Mittelgebirgslagen gibt es eine deutliche Zunahme.

Die Entwicklung der Hochwassersituation ist insgesamt unsicher, allerdings gibt es Anzeichen, dass kleine und mittlere Hochwasserereignisse in Zukunft häufiger auftreten.

Durch eine leichte Zunahme von Starkniederschlagsereignissen im Jahr, vor allem im Winter, welche Wassererosion befördern können, sind die Bodenregionen der Paläozoischen Mittelgebirge und Bergländer sowie Mesozoische Berg- und Hügelländer mit Löss am stärksten durch Wassererosion betroffen (siehe Kapitel 3.2). Durch die ebenfalls zu erwartende leichte Zunahme an Trockentagen im Jahr, jedoch vor allem im Sommer, verbunden mit Tagen mit erosionswirksamer Windgeschwindigkeiten, steigt in Zukunft in Regionen der Altmoränenlandschaften sowie Löss- und Sandlösslandschaften auf Ackerflächen die potentielle Winderosionsgefährdung.

Ohne den Effekt einer ansteigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration auf das Pflanzenwachstum werden die Erträge von Winterweizen unter den simulierten Klimaveränderungen (siehe Kapitel 3.3) hauptsächlich auf den Schwarzerdeböden und etwas weniger in der Altmark zunehmen. Für die Tieflandregionen ergeben die Modellanalysen widersprüchliche Ergebnisse bei der durch Klimawandel induzierten Ertragsänderung. Allerdings kann die geringere Wassernachlieferung in einigen Regionen des Tieflandes bei zurückgehenden Niederschlägen und ansteigender Verdunstung die mit den Ertragsmodellen simulierten, zurückgehenden Erträge von Winterweizen und Silomais erklären. Winterraps wies den Modellergebnissen zufolge in allen Regionen stärkere Ertragsrückgänge zum Ende des Jahrhunderts auf. Allerdings sind die Ergebnisse für das Ertragsmodell Raps durch eine deutlich geringere Anpassung in der Validierungsperiode wesentlich weniger belastbar als die Ergebnisse zu Winterweizen oder Silomais. Für die Region Harz wurden leicht zunehmende (REMO) bis abnehmende Erträge (WETTREG) bei Winterweizen und Silomais simuliert. Ausreichende Niederschläge bei einem Temperaturanstieg werden allerdings wahrscheinlich die Bedingungen für die Ausschöpfung des Ertragspotentials in der Harzregion eher positiv beeinflussen.

Der CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt wird die berechneten Ertragsrückgänge teilweise kompensieren können. Die Wirkung auf den Ertrag wird bei Winterweizen und Raps deutlicher als bei Mais durch den unterschiedlichen Fotosyntheseweg sein, abhängig von der Stickstoff- und Wasserversorgung der Pflanzen. Ansteigende Preise und abnehmende Verfügbarkeit des Düngers können den CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt weniger zum Tragen kommen lassen. Eine höhere Stickstoffeffizienz ist zuletzt, nicht nur aus klimapolitischer Sicht, wünschenswert.

Für die Forstwirtschaft zeigen sich unterschiedliche Richtungen der Klimawirkungen auf. So ist in Folge der betrachteten klimatischen Veränderungen eine Zunahme der Produktivität von Kiefern- und Eichenbeständen aufgrund einer verlängerten Vegetationsperiode in den nächsten Jahrzehnten zu erwarten (siehe Kapitel 3.4). Für Fichte und Buche sind die Wirkungen stark standortabhängig. Eine zu erwartende Zunahme an Sturmereignissen könnte jedoch insbesondere im Oberharz und in den Endmoränenzügen im nördlichen und östlichen Sachsen-Anhalt zu Ertragsminderungen durch Windwurf führen.

Die Berechnungen für die Waldbestände ergeben in den nächsten Jahrzehnten einen Anstieg des Kohlenstoffvorrats von Waldstandorten in den meisten der von Fichten- und Kiefernbeständen dominierten Regionen. Rückgänge im Kohlenstoffspeicher wurden für Buchenbestände ermittelt.

Für einige Waldböden kann es zur Minderung der jährlichen klimatischen Wasserbilanz und der jährlichen Versickerungsraten kommen. Die Waldbrandgefahr nimmt unter den gewählten Klimaszenarien vor allem im Norden und Osten des Landes zu.

Ein allgemeiner Rückgang der klimatischen Wasserbilanz im Jahr und vor allem in der Vegetationsperiode (April – September) könnte einen negativen Einfluss auf Feuchtlebensräume haben, beispielsweise auf Moore in den Naturräumen der Mittelgebirge sowie im Norden der südlichen Landschaften am Rande des Tieflandes (siehe Kapitel 3.5).

In der Vergangenheit haben sich zeitliche Prozesse der Pflanzen bereits deutlich verändert (siehe Kapitel 3.6). So konnte eine Verfrühung der Vegetationsperiode bzw. phänologischer Phasen festgestellt werden. Weitere Verschiebungen sind in der Zukunft zu erwarten, was zu Entkopplungen von Prozessen wie Nahrungsketten in Ökosystemen führen kann.

Für den Weinbau kann mit einer Zunahme des Potenzials des Weinbaugebiets Saale-Unstrut aufgrund einer Verbesserung der Wachstums- und Reifebedingungen der Weinrebe gerechnet werden (siehe Kapitel 3.7). Es werden jedoch weiterhin einige der spezifischen und bisher typischen Gefährdungen (z. B. Spätfröste) bestehen bleiben.

Zusammenfassend scheinen die untersuchten Klimawirkungen in den unterschiedlichen Sektoren Sachsen-Anhalts beherrschbar zu sein. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist allerdings für spezifische Sektoren, beispielsweise den Wassersektor, ein verändertes und auch nachhaltiges Management, um neben potenziellen negativen Klimawirkungen auch konkurrierende Bedarfe besser steuern zu können.







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

## **Impressum**

Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt - Halle (2013) Heft 3 (Band 1):

## **Vulnerabilitätsstudie 2009, Bericht (Band 1)**

Autoren:

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

J. Kropp, O. Roithmeier, F. Hattermann, C. Rachimow, A. Lüttger, F. Wechsung, P. Lasch,  
E.S. Christiansen, C. Reyer, F. Suckow, M. Gutsch, A. Holsten, T. Kartschall, M. Wodinski,  
Y. Hauf, T. Conradt, H. Österle, C. Walther, T. Lissner, N. Lux, V. Tekken, S. Ritchie,  
J. Kossak, M. Klaus, L. Costa, T. Vetter, M. Klose

Redaktion:

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

Foto Titelseite: Manfred Unglaube (2012)

Herausgeber und Bezug:

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

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

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

März 2013

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

**ISSN 0941-7281**

