



Klimaprojektionen, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Europäische Union. Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung: Investition in Ihre Zukunft/
Unia Europejska. Europejski Fundusz Rozwoju
Regionalnego: Inwestujemy w waszą przyszłość



Klimawandel, Luftverschmutzung und ökologische
Belastungsgrenzen von Ökosystemen im
polnisch-sächsischen Grenzraum





Klimawandel, Luftverschmutzung und ökologische Belastungsgrenzen
von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum

Klimaprojektionen, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen



Autoren

Teile A und B

**Sächsisches Landesamt für Umwelt,
Landwirtschaft und Geologie**

Susann Schwarzak
unter Mitwirkung von Andreas Völlings und Michaela Surke

Universität Wrocław, Institut für Geographie und Regionalentwicklung

Maciej Kryza
Marek Błaś
Mariusz Szymanowski
Małgorzata Werner
Mieczysław Sobik
Krzysztof Migała

Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft (IMGW-PIB), Wrocław

Bartłomiej Miszuk
Irena Otop
Ewa Liana
Marzenna Strońska
Agnieszka Kolanek

Teil C

**Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH
(ÖKO-Data)**

Hans-Dieter Nagel
Thomas Scheuschner
Angela Schlutow
Regine Weigelt-Kirchner



Inhalt

A Klimaprojektionen	
Einführung Klimawandel	7
Historischer Klimawandel	7
Ursachen von Klimaänderungen	7
Extremereignisse	9
Grundlagen	10
Globale und regionale Klimamodelle	10
Klimaszenarien	11
Unsicherheiten	12
Datenbasis und Methoden	13
Regionales Klimamodell WETTREG	13
Verwendete Klimaszenarien	14
Ensemble-Ansatz	15
Vertrauensbereich	15
Auswertung regionaler Klimaprojektionen	15
Ergebnisse	16
Modellvalidierung	16
Lufttemperatur	16
Agrarmeteorologische Indizes	28
Bioklimatische Indikatoren.....	32
Zusammenfassung.....	42
Klimatische Entwicklung.....	42
Agrarmeteorologische Entwicklung	42
Bioklimatische Entwicklung	43
B Modellierung der Luftverschmutzung	
Einleitung	45
Datengrundlage und Methode	46
Das FRAME-Modell	46
Datengrundlage	46
Validierung der FRAME-Modellergebnisse	52
Zusammenfassung der FRAME-Modellläufe	60
Ergebnisse	61
Gegenwärtige Depositionen	61
Zukünftige Deposition	64
Zusammenfassung	65

C Belastungsgrenzen von Ökosystemen

Einleitung	67
Datengrundlage und Methodik	67
Ergebnisse	70
Critical Load für das Basisklima 1971–2000	70
Critical Load in Abhängigkeit von verschiedenen Klimaszenarien	72
Überschreitung der Critical Load in Abhängigkeit von Luftschadstoffen im Zeitraum 2000 bis 2030	73
Bewertung der Auswirkungen von Schadstoffeinträgen und Klimawandel auf die Gefährdung von Ökosystemen	74
Ergebnisvergleich mit anderen Studien	75
Zusammenfassung	77
Literaturverzeichnis	78
Abbildungsverzeichnis	81
Tabellenverzeichnis	86
Impressum	88



Vorwort

Klimaschutz und Klimaanpassung bilden zentrale Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Auch der polnisch-sächsische Grenzraum ist durch den Klimawandel betroffen und wird vor neue Herausforderungen gestellt. Ertragsausfälle in Folge von Dürren oder Starkniederschlägen, Zunahme von Schädlingen, Schäden durch Überschwemmungen und Stürme oder wirtschaftliche Einbußen durch Schneeunsicherheit in den höheren Lagen verweisen auf weitreichende negative Folgen für Umwelt und Gesellschaft. Damit sich diese in Zukunft nicht erheblich verstärken und nachfolgende Generationen gleichwertige Lebensbedingungen gegenüber heute erfahren können, müssen weitreichende Schritte zum Klimaschutz umgesetzt werden. Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgase entscheiden darüber, wie stark uns die klimatischen Änderungen in Zukunft treffen werden und welche Welt wir unseren Kindern übergeben. Wo der Klimawandel unvermeidbare Folgen zeigt, müssen geeignete Klimaanpassungsmaßnahmen entwickelt werden, um die Risiken des Klimawandels zu mildern oder mögliche Chancen zu nutzen.

Mit dem vorliegenden Bericht sowie dem Heft „Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum“ (MEHLER et al. 2014) liegt eine umfassende Analyse über die gegenwärtige und zukünftig mögliche klimatische und lufthygienische Entwicklung im polnisch-sächsischen Grenzraum vor. Die Erstellung einer grenzüberschreitenden Datenbasis für die Analyse der Entwicklung des Klimas und der Luftschadstoffe ermöglicht es, gezielt Aussagen für den Grenzraum abzuleiten. Geeignete Indikatoren verdeutlichen Betroffenen und regionalen Akteuren die Auswirkungen des Klimawandels und zeigen die Notwendigkeit des Handlungsbedarfs auf. Um belastbarere Aussagen zur Bandbreite des zukünftigen Klimas treffen zu können, wird ein Ensemble an Klimaprojektionen auf Grundlage verschiedener Annahmen (Klimaszenarien) und globaler Klimamodelle analysiert.

Die Ergebnisse der zukünftig möglichen klimatischen Entwicklung werden innerhalb dieses Berichts in **Teil A** ausführlich vorgestellt. Diese bilden eine Grundlage für die Analyse der Entwicklung der Luftverschmutzung, welche in **Teil B** beschrieben wird. Aufbauend auf den projizierten Klima- und Depositionsszenarien werden die Entwicklung und die Überschreitung von Belastungsgrenzen von Ökosystemen (Critical Load) bestimmt. Die Ergebnisse werden in **Teil C** zusammengefasst dargestellt.

A

Klimaprojektionen



Einführung Klimawandel

Der Klimawandel ist bereits in vollem Gange. Langfristige meteorologische Messungen in Mitteleuropa belegen, dass sich das Klima verändert und die Lufttemperatur seit 1900 bereits um ca. 1 °C zugenommen hat. Ebenso wird angenommen, dass die gegenwärtigen klimatischen Änderungen sehr wahrscheinlich verantwortlich sind für eine zunehmende Häufigkeit von extremen Wetterereignissen (IPCC 2013). Laut der Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft verdoppelten sich beispielsweise in den USA die Schäden durch schwere Gewitter im Zeitraum 1990 bis 2009 gegenüber 1970 bis 1989 (MUNICH RE 2013).

Darüber hinaus wird anhand von aktuellen Klimaprojektionen simuliert, dass eine weitere Freisetzung von Treibhausgasen zu einer zunehmenden globalen Klimaerwärmung bis zu 4 °C bis zum Jahr 2100 und den damit einhergehenden Änderungen am Klimasystem führen kann (IPCC 2013). Eine weitere Zunahme von extremen Wetterereignissen wäre dadurch sehr wahrscheinlich. Die Aufnahme von mehr Wasserdampf durch eine wärmere Atmosphäre kann die Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen begünstigen. Auch kann die wärmebedingte Erhöhung der Verdunstung regional verstärkt Dürren und Trockenperioden verursachen. Des Weiteren kann der Anstieg latenter Energie durch mehr Wasserdampf in der Atmosphäre stärkere Stürme zur Folge haben. Beobachtet wird auch eine Zunahme langanhaltender blockierender Wetterlagen, die oft zu extremen Witterungsereignissen wie Starkniederschlägen, Hitzewellen oder Trockenperioden führen, wie z. B. die Hitzewelle 2003 in Mitteleuropa.

Ziel der Europäischen Union ist es, die globale Erwärmung unter 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu halten (siehe Artikel 2 der UNFCCC), um eine „gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems“ zu verhindern. Um das „Zwei-Grad-Ziel“ langfristig erreichen zu können, müssten die globalen Emissionen auf 2 Gigatonnen pro Jahr gesenkt werden (JAEGER & OPPENHEIMER 2005). Das im vorliegenden Bericht verwendete Klimaszenario RCP2.6 repräsentiert die notwendigen Annahmen hinsichtlich Treibhausgaskonzentrationen und Strahlungsantrieb, um das „2-Grad-Ziel“ langfristig erreichen zu können.

Historischer Klimawandel

Seit Beginn der Erdgeschichte unterliegt das Klima unzähligen Veränderungen (Abbildung 1). Im Pleistozän (vor 2,6 bis 0,01 Mio. Jahren) wechselten sich Eiszeiten und Warmzeiten gegenseitig ab, und Glet-

scher dehnten sich von Norden bis nach Sachsen und Polen aus. Der Zeitraum 1350 bis 1850, auch als „kleine Eiszeit“ bezeichnet, war etwa 1 Grad kälter als heute, während die Lufttemperatur in der mittelalterlichen Warmzeit und im Klimaoptimum der Römerzeit etwa 1 Grad höher lag (SCHÖNWIESE 1992). Seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts vollzieht sich jedoch ein globaler Temperaturanstieg, der einzigartig in seinem Ausmaß und seiner Geschwindigkeit ist. MOBERG et al. (2005) gehen davon aus, dass die gegenwärtigen Temperaturen die wärmsten auf der Nordhalbkugel seit 2000 Jahren sind.

Auch im polnisch-sächsischen Grenzraum zeigt sich bereits gegenwärtig ein positiver Trend der Mitteltemperatur von 1,1 °C im Zeitraum 1971–2010. Die stärkste Temperaturzunahme konnte im Frühjahr und Sommer (absoluter Trend: +1,7 °C / +1,8 °C) beobachtet werden, während im Herbst und Winter moderatere Trends festgestellt wurden (absoluter Trend: +1,0 °C / +0,2 °C) (MEHLER et al. 2014).

Ursachen von Klimaänderungen

Zu den wesentlichen Ursachen von Klimaänderungen gehören:

- Änderung der solaren Einstrahlung
- Änderung der planetaren Albedo (Reflexionsvermögen)
- Änderung der in den Weltraum abgegebenen Strahlung sowie
- die natürliche interne Klimavariabilität

Änderung der solaren Einstrahlung

Die Einstrahlung der Sonne unterliegt verschiedenen Schwankungen und beeinflusst damit das Klima der Erde. Diese werden im Wesentlichen durch Änderungen der Parameter der Erdum-

Abbildung 1
Rekonstruktion des mittleren Temperatur- und Niederschlagsverlaufs der Erde seit 3,8 Milliarden Jahren.
E = Eiszeitalter, E (unterstrichen) = Eiszeitalter mit Eisbildungen an beiden geografischen Polen, W = eisfreies Warmklima (SCHÖNWIESE 1992)

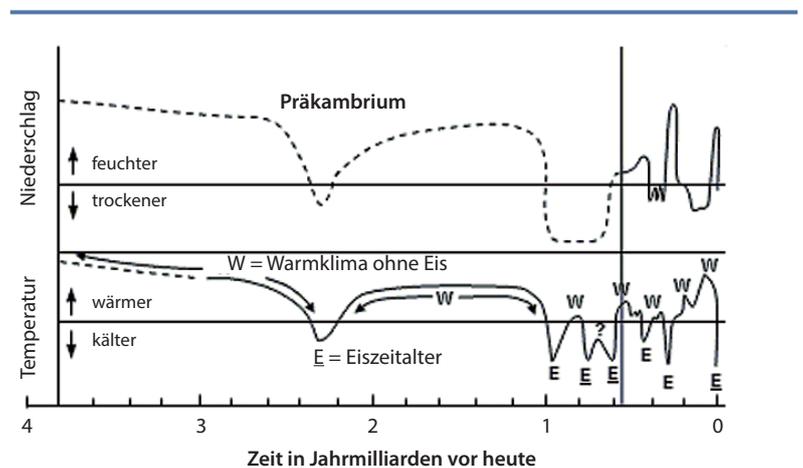
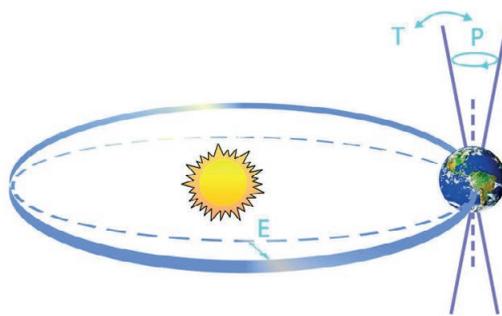


Abbildung 2

Schematische Darstellung der die Eiszeitzyklen antreibenden Änderungen der Erdumlaufbahn (Milankovitch-Zyklen).

'T' kennzeichnet die Variation in der Neigung der Erdachse gegen die Erdbahnebene (Obliquität), 'E' kennzeichnet die Abweichung der elliptischen Erdbahn von der Kreisbahn (Exzentrizität), und 'P' kennzeichnet die Präzession, eine Art Pendelbewegung der Achse der Erde (IPCC 2007, FAQ 6.1, Fig. 1 nach RAHMSTORF und SCHELLENHUBER 2006)



Ursprungs sein. Maßgebliche Faktoren, die in der Atmosphäre auf die Reflexion der Strahlung einwirken, sind Wolkenbedeckung und Aerosole (Kondensationskerne, Eiskeime). Auf der Erde beeinflusst die Beschaffenheit der Oberfläche (Land-Eis-Meer-Verteilung) in Abhängigkeit ihrer Helligkeit das Rückstrahlvermögen. Eine nur mit Eis bedeckte Erde würde beispielsweise viel stärker reflektieren und wäre deutlich kälter, als gegenwärtig beobachtet wird. Der zunehmende Rückgang der Eis- und Schneebedeckung in Folge der globalen Erwärmung verringert damit die Albedo, so dass sich der Erwärmungsprozess selbst verstärkt. Durch Rodung von Wäldern, Bebauung usw. beeinflusst der Mensch zusätzlich das Reflexionsvermögen und damit das Klima auf der Erde.

laufbahn um die Sonne (Milankovitch-Zyklen; [Abbildung 2](#)) und der Sonnenaktivität verursacht. Während der sogenannte Sonnenfleckenzyklus eine mittlere Wiederkehr von elf Jahren zeigt, treten die Milankovitch-Zyklen mit einer Periode von mehreren Jahrtausenden auf. Solche langfristigen Schwankungen gelten beispielsweise als Verursacher des Kalt-Warm-Zyklus im Pleistozän ([SCHÖNWIESE 2003](#)).

Änderung der planetaren Albedo

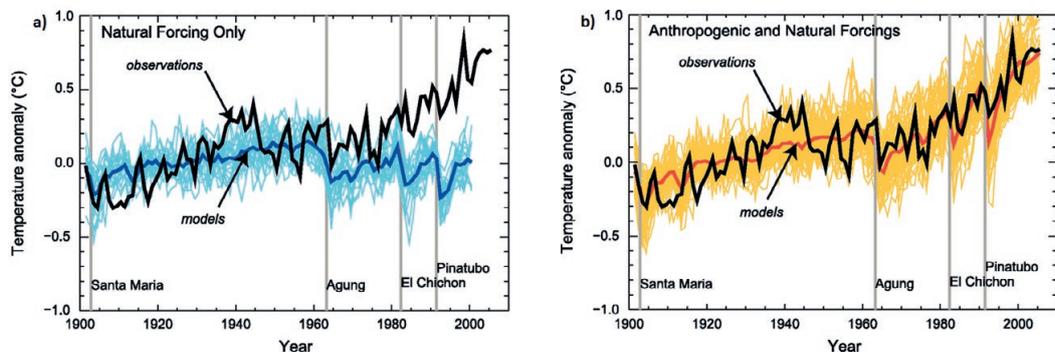
Ein Teil der solaren Einstrahlung wird in der Atmosphäre (atmosphärische Albedo) und an der Erdoberfläche (terrestrische Albedo) reflektiert. Ursachen der Änderung dieser planetaren Albedo können natürlichen (z. B. Vulkanausbrüche) oder anthropogenen (Energieerzeugung, Verkehr u. a.)

Änderung der in den Weltraum abgegebenen Strahlung

Dass auf der Erde Bedingungen herrschen, die Leben in der uns bekannten Form ermöglichen, liegt im Wesentlichen an der Zusammensetzung der Erdatmosphäre aus verschiedenen Gasen. Der Anteil der sogenannten Treibhausgase lässt die kurzwellige Wärmestrahlung der Sonne passieren und absorbiert Teile der von der Erdoberfläche reflektierten Sonnenstrahlung. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt würde die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche -18 °C betragen. Seit der Industrialisierung verändert der Mensch allerdings zunehmend die Zusammensetzung der Atmosphäre. Durch die Nutzung fossiler Energieträger und der großflächigen Rodung von Wäldern hat sich besonders der Anteil an Kohlendioxid (heute knapp 400 ppm), gegenüber vorindustrieller Zeit (280 ppm), erheblich erhöht.

Abbildung 3

a) Globale mittlere Lufttemperaturanomalie relativ zu 1901–1950, beobachtet (schwarze Linie, HadCRUT3a) und simuliert unter Einfluss natürlicher Einflussfaktoren (blaue Linie = Mittel Modellensemble, hellblau = Schwankungsbereich der Simulationen), b) ähnlich wie in a) unter Antrieb anthropogener und natürlicher Faktoren (rot = Mittel des Modellensembles, orange = Schwankungsbereich der Simulationen); vertikale graue Linien repräsentieren bedeutende Vulkanausbrüche (IPCC 2007, Fig. 9.5)



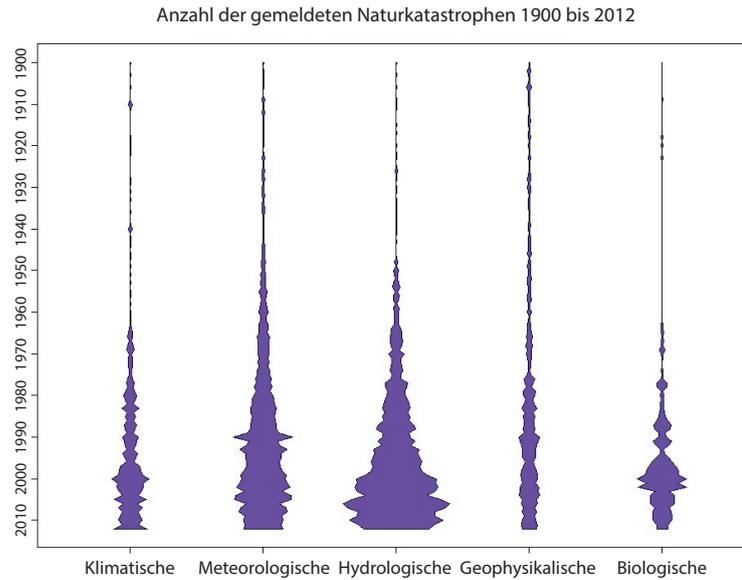


Abbildung 4

Anzahl der gemeldeten Naturkatastrophen 1900 bis 2012 (EM-DATA: The OFDA/CRED International Disaster Database – www.emdat.be – Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium)

Die in den Sachstandsberichten des IPCC dargestellten Ergebnisse der Klimaexperten belegen, dass die globale und regionale Temperaturerhöhung im Wesentlichen auf den Einfluss des Menschen zurückzuführen ist (IPCC 2007, 2013). Der beobachtete Erwärmungstrend zeigt einen eindeutigen Zusammenhang mit den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen in die Atmosphäre. Modelle, die lediglich die natürlichen Einflussfaktoren berücksichtigen, sind nicht in der Lage, den gegenwärtig beobachteten Temperaturanstieg abzubilden (Abbildung 3).

Natürliche interne Klimavariabilität

Ein Beispiel für die interne Variabilität des Klimas ist das El Niño-Phänomen im tropischen Pazifik. Während El Niño verhält sich der Luftdruck am Boden im westlichen und östlichen Pazifik entgegengesetzt, was mit einer Abschwächung der Passatwinde einhergeht. Im Osten des tropischen Pazifik erhöht sich in Folge die Meeresoberflächentemperatur mit Auswirkungen für die atmosphärische Zirkulation. In Regionen wie Peru, wo sonst trockene Bedingungen herrschen, können hohe Niederschlagssummen fallen, während in Australien anhaltende Trockenheit zu Dürren führt. Wegen der engen Verbindung zwischen El Niño und der Südlichen Oszillation spricht man heute im Allgemeinen von ENSO-Phänomen (LATIF 2003).

Über dem Nordatlantik und Europa bestimmt zum großen Teil die Nordatlantische Oszillation (NAO) die Klimavariabilität (HURELL 1995, HURELL & VAN

LOON 1997). Ein positiver NAO-Index (Luftdruckdifferenz zwischen Islandtief und Azorenhoch) bringt beispielsweise milde Winter in Europa, während in Nordkanada zur gleichen Zeit strenge Winter herrschen (siehe Winter 2013/2014).

Extremereignisse

In einer aktuellen Studie der Weltorganisation für Meteorologie (WMO 2014) wird die Anzahl der gemeldeten Naturkatastrophen seit 1900 dargestellt. Besonders meteorologisch (z. B. Stürme, Gewitter) und hydrologisch (z. B. Hochwasser) bedingte Ereignisse zeigen in den letzten vier Dekaden eine steigende Häufigkeit (Abbildung 4).

Im polnisch-sächsischen Grenzraum sind es am häufigsten Hochwasser und Stürme, die weitreichende Folgen für Umwelt und Gesellschaft haben. So gehören beispielsweise die Elbehochwasser der Sommer 2002 und 2013 in Sachsen bzw. die Oderhochwasser 1997 und 2010 im westlichen Teil Polens zu den größten Fluten des 20. Jahrhunderts (Tabelle 1). Während des Wintersturms Kyrill am 18. Januar 2007, welcher vor allem in Sachsen große Schäden anrichtete, starben europaweit 55 Menschen, 13 davon in Deutschland und 6 in Polen. Insgesamt fielen in Deutschland rund 37 Mio. Kubikmeter Holz dem Sturm zum Opfer. In den Wäldern der westlichen Sudeten verursachte Kyrill etwa 1,1 Mio. Kubikmeter Sturmholz. Im Jahr 2008 entstanden durch die Stürme Paula (26./27. Januar 2008) und Emma (1./2. März 2008) in den Sudeten 0,7 Mio. Kubikmeter Sturmholz (PAWLIK

Tabelle 1

Die größten Naturkatastrophen in Deutschland und Polen 1900 bis 2014 sortiert nach der Anzahl der betroffenen Personen (EM-DATA: The OFDA/CRED International Disaster Database – www.emdat.be – Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium)

Nr.	Deutschland		
	Katastrophe	Datum	Anzahl der Betroffenen
1	Hochwasser	11.08.2002	330108
2	Hochwasser	21.12.1993	100000
3	Hochwasser	11.05.1999	100000
4	Sturm	21.01.1995	30000
5	Hochwasser	28.05.2013	6350
6	Hochwasser	04.07.1997	5200
7	Erdbeben	13.04.1992	1525
8	Hochwasser	28.03.2006	1000
9	Epidemie	01.02.2002	600
10	Hochwasser	10.07.2005	450

Nr.	Polen		
	Katastrophe	Datum	Anzahl der Betroffenen
1	Hochwasser	03.07.1997	224500
2	Hochwasser	17.05.2010	100000
3	Hochwasser	Januar 82	16824
4	Hochwasser	20.07.2001	15000
5	Hochwasser	Juli 1980	4500
6	Hochwasser	17.03.2005	3600
7	Hochwasser	23.07.1998	1200
8	Sturm	01.03.2008	1060
9	Hochwasser	04.08.1977	1000

2012). Auch extreme Temperaturen führen immer wieder zu Schäden und Todesopfern. Der Hitzesommer 2003 kostete beispielsweise in Deutschland 9.355 Menschen das Leben (WMO 2014).

Grundlagen

Globale und regionale Klimamodelle

Bis heute sind das Klimasystem und alle Wirkungszusammenhänge zwischen Erde, Ozean und Atmosphäre nicht hundertprozentig erforscht bzw. verstanden. Selbst modernste Klimamodelle sind daher nicht in der Lage, das Klimasystem in all seinen Teilprozessen und Komponenten vollständig zu repräsentieren. Dennoch liefern Klimamodelle wertvolle Einblicke in die komplexen Wechselwirkungen der Komponenten und Prozesse sowie wichtige Erkenntnisse über die Folgen von natürlichen und menschlichen Einflüssen auf das Klimasystem. Mittels physikalisch-mathematischer Gleichungen wird versucht, das Klimasystem der Erde numerisch abzubilden. Dabei werden neben den für das Klima wichtigen Prozessen in der Atmosphäre, im Ozean und an der Erdoberfläche auch Pedosphäre (Boden), Biosphäre und Kryosphäre (Eisschilde und Gletscher) mit ihren vielfältigen Wechselwirkungen betrachtet. Besonders hochkomplexe globale Zirkulationsmodelle (GCM) ermöglichen es, statistische Kenngrößen abzuleiten und den mittleren Zustand und die Variabilität des Wettergeschehens zu beschreiben (LfULG 2005). Klimamodellrechnungen bilden damit eine wichtige Grundlage für gesellschaftliche und politische Entscheidungen zum Klimaschutz und über

die Eingrenzung und Abschätzung der Folgen des Klimawandels.

Um die regional unterschiedlichen Ausprägungen der Klimaänderungen genauer beschreiben zu können, werden die Simulationen der globalen Modelle, die standardmäßig mit Gitterweiten von etwa 100 bis 300 km arbeiten, mit regionalen Klimamodellen (RCM) räumlich verfeinert. Beim sogenannten Downscaling werden die Ergebnisse globaler Klimamodelle für bestimmte Regionen herunterskaliert und ermöglichen es, regional differenzierte Klimaänderungstendenzen aufzuzeigen (Abbildung 5).

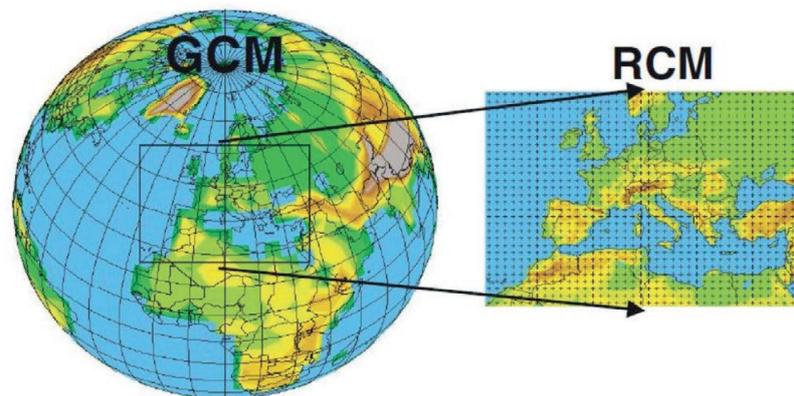
In der regionalen Klimamodellierung unterscheidet man zwischen zwei verschiedenen Methoden: den dynamischen und statistischen regionalen Klimamodellen.

Dynamische Klimamodelle

Dynamische Klimamodelle sind dreidimensionale atmosphärische Zirkulationsmodelle, in denen die großskaligen Strömungsmuster der Atmosphäre simuliert werden, um die regionale Klimaentwicklung zu berechnen. Dabei werden lokale Eigenschaften der Erdoberfläche, wie die Land-Meer-Verteilung oder Vegetationsbedeckung berücksichtigt. Die Simulation der Zeitschritte erfolgt für ein räumliches Gitter mit einer horizontalen Auflösung von etwa 2,5 bis 50 km. An den seitlichen Modellrändern benötigen dynamische RCMs Informationen über großräumige Zirkulationsmuster. Diese Informationen erhalten sie durch den Antrieb eines globalen Klimamodells aus Reanalysedaten oder einer großskaligeren regionalen Simulation. Nachteil der



Abbildung 5
Schematische Darstellung
des Downscaling
(GIORGI 2008)



detaillierten Simulation der meteorologischen Prozesse ist, dass dynamische Modelle sehr zeit- und rechenaufwendig sind und damit nur auf bestimmte Modellregionen begrenzt angewendet werden können (BERNHOFER et al. 2009). In Deutschland verwendete Modelle sind das Regionalisierungsmodell¹ REMO vom Max-Planck Institut für Meteorologie (JACOB & PODZUN 1997) sowie COSMO-CLM (Climate Local Model) der CLM Community².

Statistische Klimamodelle

Anders als bei den dynamischen Modellen basieren die statistischen regionalen Klimamodelle auf der Analyse statistischer Zusammenhänge zwischen beobachteten großräumigen atmosphärischen Mustern und dem lokalen Wettergeschehen. Die Projektionen der Zeitschritte liegen nicht für Gitterpunkte, sondern auf Stationsbasis vor. Aber auch statistische Modelle benötigen Randinformationen von globalen Modellen zur Regionalisierung. Der wesentliche Vorteil der Methode besteht darin, dass diese Modelle einen vergleichsweise geringen Rechenaufwand benötigen und zeit- sowie kosteneffizienter sind als dynamische Modelle. Verbreitet sind in Deutschland v. a. die Modelle STAR vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (ORLOWSKY et al. 2007) und WETTREG der Firma Climate & Environment Consulting in Potsdam.

Im Rahmen des Projekts KLAPS wird die statistische Methode WETTREG 2013 zur Regionalisierung herangezogen, welche im Kapitel *Datenbasis und Methodik* (S. 13 ff.) detaillierter beschrieben ist.

Klimaszenarien

Um Projektionen des zukünftigen Klimas modellieren zu können, müssen Annahmen und Randbedingungen über die zukünftig mögliche Entwicklung (z. B. Bevölkerung, technisch-wirtschaftlicher Fortschritt, ökonomische und soziale Entwicklung, Ressourcenverbrauch) getroffen werden. Diese Annahmen werden als globale Klimaszenarien durch das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entwickelt (IPCC 2007, 2013). Diese sogenannten Projektionen der Zukunft bilden im Gegensatz zu Prognosen keine Vorhersagen, sondern sind Abbildungen möglicher zukünftiger Klimaentwicklungen. Damit Klimaszenarien als Eingangsgröße für globale Klimamodelle verwendet werden können, müssen die verschiedenen Annahmen in die Dimension der Treibhausgase umgerechnet werden.

Im aktuellen 5. Sachstandsreport des IPCC (AR5) werden zwei Szenariogruppen unterschieden. Erstere, die sogenannten SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios, NAKICENOVIC & SWART 2000), liegen den IPCC Berichten 2001 und 2007 zu Grunde. Unter den SRES-Szenarien erfolgt eine Abschätzung des Ausstoßes von Treibhausgasen, der als Antrieb für die globalen Modelle dient. Die insgesamt 40 Emissionsszenarien werden in die vier Hauptgruppen A1, A2, B1 und B2 unterteilt (Abbildung 6).

Mit dem 5. Sachstandsbericht des IPCC (AR5) wurde eine neue Szenario-Philosophie eingeführt. Die sogenannten Representative Concentration Pathway (RCP)-Szenarien geben repräsentative Konzentrationspfade in Form des Strahlungsantriebs vor. Sie werden unterschieden in RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5. Die Zahlenwerte repräsentie-

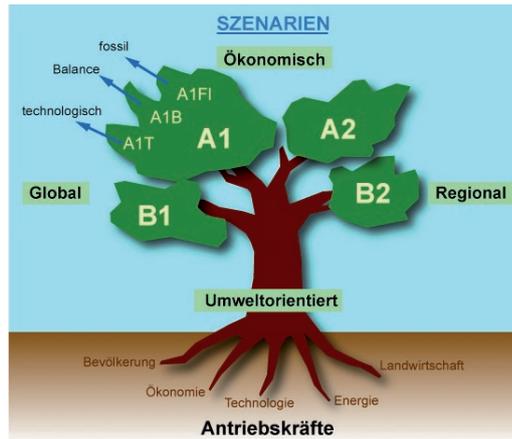
¹ www.remo-rcm.de

² www.clm-community.eu

Abbildung 6

Anschauliche Darstellung der SRES-Szenarien des IPCC

(http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaszenarien_nach_IPCC_2000, NAKICENOVIC & SWART (Eds.), Fig. 1-4)



Unsicherheiten

Aufgrund der Komplexität des Klimasystems, fehlenden Kenntnissen über die zukünftige Entwicklung und der natürlichen Klimavariabilität sind Klimaprojektionen mit einer Reihe von Unsicherheiten verbunden. Diese sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Annahmen über zukünftige Treibhausgaskonzentrationen

Die Höhe der Treibhausgaskonzentration hat einen wesentlichen Einfluss auf die zukünftige klimatische Entwicklung. Eine Einhaltung des „2-Grad-Ziels“ mit 50% Wahrscheinlichkeit kann beispielsweise nur durch eine Begrenzung der CO₂-Konzentration auf 450 ppm (parts per million) gewährleistet werden (RAHMSTORF & SCHELLENHUBER 2006). Bis Ende des 21. Jahrhunderts geht der IPCC von einem weiteren Anstieg der CO₂-Konzentrationen aus, die bis zu dreimal höher liegen als die heutigen Werte (CO₂-Jahresmittel 2012 = 393,1 ppm, WMO 2013). Mit wachsendem Zeithorizont nimmt die Unsicherheit der Emissionsszenarien und damit auch der Konzentrationsszenarien weiter zu (HAWKINS & SUTTON 2009).

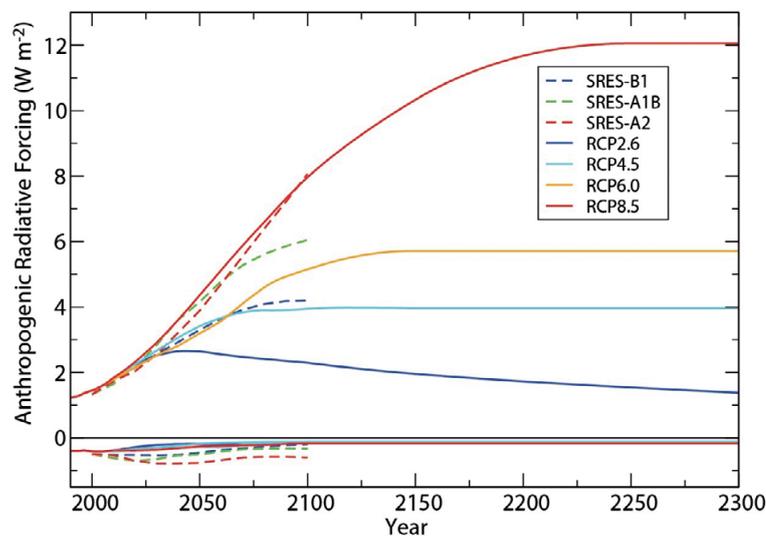
Komplexität des Erdsystems und Grenzen der Klimamodellierung

Noch längst sind nicht alle klimatisch relevanten Prozesse und Zusammenhänge des Erdsystems erforscht und verstanden. Dies liegt einerseits an fehlenden oder ungenauen Daten und andererseits an unzureichenden Messungen in den verschiede-

ren die Veränderung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 gegenüber dem vorindustriellen Niveau Mitte des 19. Jahrhunderts in W/m² (Abbildung 7). Im Klimamodell werden darauf aufbauend die Emissionen berechnet, die notwendig sind, um den jeweiligen Strahlungsantrieb zu erreichen. Damit kann die zeitliche Entwicklung der Konzentration von Treibhausgasen abgeschätzt werden. Der Vorteil der RCP-Szenarien liegt darin, dass sie über den Strahlungsantrieb passgenauer als Eingangsgrößen für globale Klimamodelle dienen und in der Gegenwart besser zu ermitteln sind als der Treibhausgasausstoß (KREIENKAMP et al. 2013).

Abbildung 7

Zeitliche Entwicklung des anthropogenen Strahlungsantriebs gegenüber dem vorindustriellen Niveau (1765) zwischen 2000 und 2300 unter RCP-Szenarien (durchgezogene Linie) und SRES-Szenarien (gestrichelte Linie). Positive Werte entsprechen dem gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb, negative Werte repräsentieren den Antrieb durch alle anthropogen bedingten Aerosol-Strahlungswechselwirkungen. Der gesamte Strahlungsantrieb der RCP-Familie wurde unter Berücksichtigung der Wirksamkeit der verschiedenen Antriebe berechnet (MEINSHAUSEN et al., 2011a). (IPCC 2013, Fig. 12.3)





nen atmosphärischen Schichten. Rückkopplungen durch Wolkenprozesse bleiben die größte Unsicherheitsquelle bei der Klimamodellierung. Des Weiteren ist es aufgrund der limitierten Rechenkapazität teilweise nicht möglich, bekannte und erfasste Prozesse des Erdsystems in den Klimamodellen zu berücksichtigen. Wie gut das reale Klima simuliert wird, hängt unter anderem auch von der Maschenweite des Gitternetzes ab, die wiederum eine Folge der verfügbaren Computerleistung ist.

Natürliche Klimavariabilität

Eine weitere Schwierigkeit, das zukünftige Klima bereits heute festzustellen, besteht in der geringen Kenntnis der natürlichen Klimavariabilität (z. B. Änderungen der Sonnenaktivität), der die anthropogenen Veränderungen hinzugefügt werden. Die Ableitung der natürlichen Klimaschwankungen kann sich zwar auf Beobachtungsdaten stützen, ist jedoch wegen der in der Regel zu kurzen Zeitreihen der historischen Daten nur sehr begrenzt möglich. Ebenso können große Naturkatastrophen, wie eine Serie von Vulkanausbrüchen, Auswirkungen auf die zukünftige klimatische Entwicklung zeigen.

Um Unsicherheiten zu minimieren, lässt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit zukünftiger klimatischer Änderungen daher besser durch ein Spektrum an Klimaprojektionen, einem sogenannten Ensemble, bewerten. Zu beachten ist stets, dass Klimaprojektionen als „Wenn-Dann-Aussagen“ zu betrachten sind, die nicht den Anspruch haben, die Zukunft zu zeigen. Somit bilden auch Ensembles nur eine Bandbreite möglicher Zukünfte ab.

Datenbasis und Methoden

Regionales Klimamodell WETTREG

Die **wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode** (WETTREG) geht aus dem für den Freistaat Sachsen angepassten Modellansatz WEREX (**W**etterlagen-**R**egionalisierung-**E**xtrême) hervor und wurde von der Firma *Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH*² entwickelt. Das statistische Modellverfahren wurde für die Projektion auf ganz Deutschland angepasst. Seit 2002/2003 wird WETTREG für Studien zum regionalen Klimawandel eingesetzt und ist mit den Versionen WR06, WR10 und WR13_v02 kontinuierlich erweitert und verbessert worden (SPEKAT et al. 2007, KREIENKAMP et al. 2010, 2013). Für das Projekt KLAPS wird die aktuelle Version WETTREG 2013 (WR13_v02) verwendet (Tabelle 2).

Regionalmodell	WETTREG 2013
Betreiber	Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
Typ	Statistisches Modell
Globalantrieb	ECHAM5 MPI-OM, MPI ESM-LR
Räumliche Auflösung	26 Klimastationen
Zeitliche Auflösung	Tageswerte
Kontrollzeitraum	1951–2000
Projektionszeitraum	2001–2100
Simulationsläufe	5 (Szenarien) x 10 (Realisierungen) x 26 (Klimastationen) = 1300 Simulationen

Tabelle 2
Charakterisierung des verwendeten Regionalmodells WETTREG

Die Regionalisierungsmethode erfolgt in drei Schritten:

Zirkulationsmuster

Unter der Annahme, dass Zirkulationsmuster die großräumige und regionale Skala miteinander verbinden, werden diese im ersten Schritt klassifiziert. Bei WETTREG werden zunächst Werteparameter eines regionalen meteorologischen Parameters bestimmt. Jedem Wertebereich wird im Folgenden eine Zirkulationsform zugeordnet. So werden unter WETTREG 2013 zwölf „kalte“ bis „warme“ und acht „trockene“ bis „feuchte“ Klassen gebildet (Abbildung 8). Zur Definition der Muster werden Klimadaten der Gegenwart (Reanalysen) verwendet. Über das Prinzip der Wiedererkennung werden schließlich simulierte atmosphärische Verhältnisse an einem Tag in der Zukunft einer bestimmten WETTREG-Klasse zugeordnet.

Wettergenerator

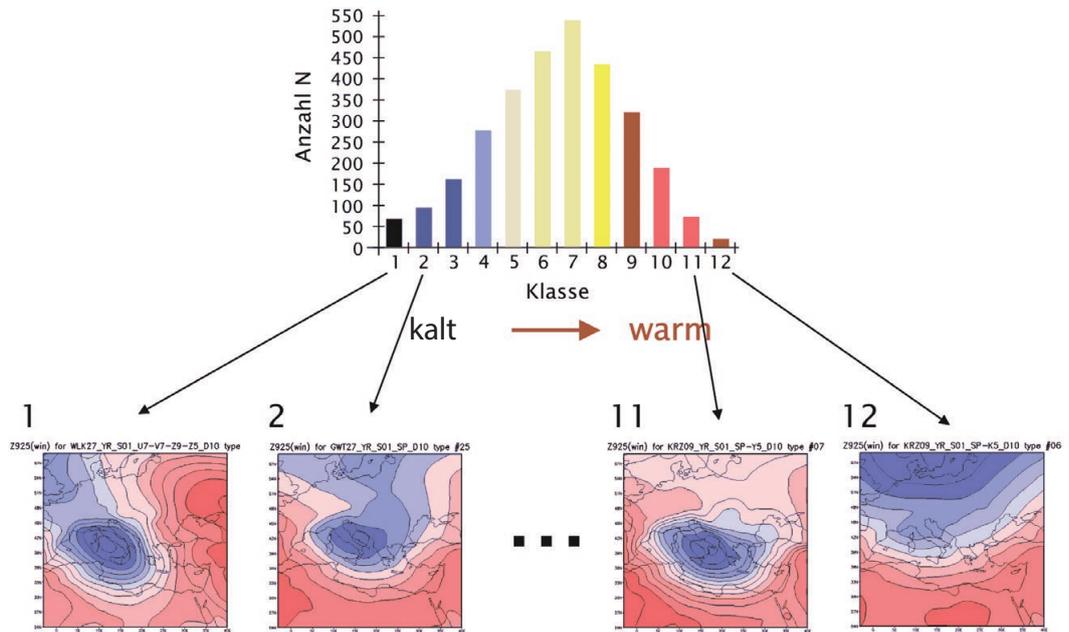
Im nächsten Schritt werden lokale Zeitreihen meteorologischer Parameter der Gegenwart mittels eines stochastischen Wettergenerators zu neuen Zeitreihen zusammengesetzt (Synthetisierung). Die Häufigkeit der Zirkulationsmuster wird als Randbedingung für die Verwendung/Verwerfung eines Zeitsegments angewendet. Mit dem stochastischen Wettergenerator werden verschiedene Varianten des gegenwärtigen Klimas in Abhängigkeit von einer Klimaprojektion und basierend auf einem Treibhausgasszenario erzeugt.

Regressionsbasierte Einarbeitung weiterer GCM-Spezifika

Die sich mit der Zeit ändernde Häufigkeit von Zirkulationsmustern beschreibt nur einen Teil der Signatur einer zukünftigen Klimaänderung. Über statistische Regressionsbeziehungen können

² <http://www.cec-potsdam.de/index.html>

Abbildung 8
Prinzip der Bildung von
Zirkulationsmustern



Änderungen physikalischer Größen direkt aus der Modellsimulation errechnet werden. Aus diesen Änderungen leiten sich Korrekturfaktoren ab, die den synthetisierten Zeitreihen als weitere Signatur aufgeprägt wird.

Zur besseren Abschätzung der Modellvariabilität hat es sich als praktisch erwiesen, für jedes GCM-Szenario zehn Läufe von WETTREG, sogenannte Realisierungen, zu erzeugen. Alle zehn Realisierungen sind dabei gleich wahrscheinlich und können einzeln analysiert werden. Vereinfacht wird oftmals das Mittel aller zehn Läufe dargestellt, welches durch arithmetische Mittelung der Zeitreihen berechnet wird. Auswertungen auf Tagesbasis erfordern es, vor der Mittelung jede Realisierung einzeln auszuwerten. Bei Monaten, Jahreszeiten und Jahren kann das arithmetische Mittel direkt gebildet werden.

Im Gegensatz zu dynamischen Klimamodellen zeigt das statistische Modell WETTREG den Vorteil, dass es deutlich geringere Rechenzeiten benötigt und für einen größeren räumlichen Ausschnitt Klimaprojektionen erzeugt werden können. Darüber hinaus werden Beobachtungsdaten durch eine statistisch konsistente Beschreibung des gegenwärtigen und zukünftigen Klimas besser wiedergegeben. Aufgrund der hohen Übereinstimmung der Kontrollläufe mit den beobachteten Messungen

gilt WETTREG als gut geeignet für die Modellierung zukünftiger klimatischer Bedingungen.

Verwendete Klimaszenarien

Im Projekt KLAPS wird einerseits das SRES-Emissionsszenario A1B aus der A1-Familie benutzt. Angenommen wird eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer bis Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, einer raschen Entwicklung neuer effizienter Technologien und einer ausgewogenen Nutzung aller Energiequellen. Das Szenario A1B ist eines der am häufigsten berechneten Klimaszenarien. Die im vorliegenden Bericht erzielten Ergebnisse lassen sich somit gut mit anderen Studien vergleichen. Mit Einführung der RCP-Szenarienfamilie (IPCC 2013) werden die vorhandenen SRES-Szenarien ergänzt, wobei alle verwendeten Szenarien als gleich wahrscheinlich gelten. Aus aktuellem Anlass wurden in KLAPS, zusätzlich zu A1B, die beiden RCP-Szenarien 2.6 und 8.5 verwendet, welche die gesamte Bandbreite der RCP-Szenarien abdecken. Während der Primärenergieverbrauch unter RCP8.5 (entsprechend 1.370 ppm CO₂-Äquivalent) dreimal so hoch wie heute angenommen wird, orientiert sich RCP2.6 (entsprechend 490 ppm CO₂-Äquivalent) am globalen „2-Grad-Ziel“, also einer Erwärmung bis Ende des 21. Jahrhunderts unterhalb von 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Stand (RANDALLS 2010).



Ensemble-Ansatz

Bei der Modellierung zukünftig möglicher klimatischer Bedingungen wird in den letzten Jahren verstärkt ein Ensemble-Ansatz verfolgt. Durch die Betrachtung mehrerer Modellresultate wird eine höhere Belastbarkeit der gewonnenen Ergebnisse gewährleistet und die Bandbreite einer möglichen zukünftigen Entwicklung aufgezeigt (VAN DER LINDEN & MITCHELL 2009). Im Rahmen von KLAPS wird ein sogenanntes Multi-Modell-Multi-Szenario-Ensemble angewandt, wobei die verwendeten Globalmodelle lediglich unterschiedlichen Generationen entstammen (KREIENKAMP & SPEKAT 2013). Das Ensemble wird aus den Klimaprojektionen der zwei Globalmodelle ECHAM5 MPI-OM und MPI-ESM-LR angetrieben. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den verwendeten GCMs lediglich um Modellversionen unterschiedlicher Generationen handelt. Für die Szenarien A1B und RCP2.6 wird vom Globalmodell jeweils der 1. Lauf gerechnet. Um die modell-interne Variabilität besser abschätzen zu können, wird für RCP8.5 zudem ein multipler Lauf erzeugt, dessen Startpunkte zu unterschiedlichen Zeiten im vorindustriellen Zeitraum liegen (Abbildung 9).

Schlussendlich muss darauf hingewiesen werden, dass es sich um eine projektbedingte, jedoch fachlich begründete Auswahl an Modellen und Szenarien (Ensemble of opportunity) handelt und hierdurch möglicherweise nicht der vollständige Bereich der zukünftigen Entwicklung anhand der berechneten Projektionen beschrieben werden kann (PARKER 2011).

Vertrauensbereich

Güte und Belastbarkeit von Klimaänderungssignalen hängen stark von der Amplitude der beschriebenen Änderungssignale ab. Mit Hilfe eines Vertrauensbereichs, auch Konfidenzintervall genannt, ist es möglich, Klimasignale von natürlicher Klimavariabilität (Rauschen) zu unterscheiden (TAUBENHEIM 1969, KREIENKAMP & SPEKAT 2013). Der Vertrauensbereich wird im Projekt KLAPS mit Hilfe der Standardabweichung sd über einen Referenzzeitraum (1971–2000) bestimmt. Die Berechnung des Erwartungswertes μ erfolgt nach folgender Formel:

$$\mu = \bar{x} \pm t_{\beta}(n) * \frac{sd}{\sqrt{N}}$$

mit N : Anzahl der Werte, n : Freiheitsgrad, β : Irrtumswahrscheinlichkeit, $t_{\beta}(n)$: Signifikanzlevel der t -Verteilung (Students test) in Abhängigkeit von Freiheitsgrad und Irrtumswahrscheinlichkeit. Für $n=30$ and $\beta=0,01$ (1 % Irrtumswahrscheinlichkeit) ist $t=2,75$.

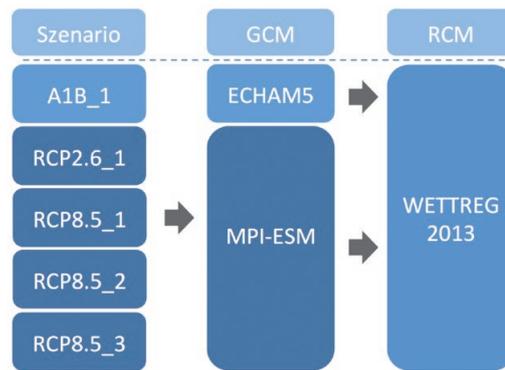


Abbildung 9
Zuordnung der
verwendeten Modelle
und Szenarien

Der Vertrauensbereich gibt den Bereich an, den ein Klimaparameter verlassen muss, um als eindeutiges Änderungssignal definiert werden zu können. Der Vertrauensbereich ist als gestrichelte Linie in den Diagrammen in Kapitel 4.2 dargestellt.

Auswertung regionaler Klimaprojektionen

Im Rahmen des EU-Projekts KLAPS wurden die fünf definierten Klimaprojektionen für insgesamt 26 deutsche, polnische und tschechische Klimastationen mit dem statistischen regionalen Klimamodell WETTREG 2013 erzeugt (Kreienkamp et al. 2013). Für jede Station werden jeweils 10 Realisierungen pro Klimaszenario im Zeitraum 1951–2100 berechnet, um die modellinterne Variabilität berücksichtigen zu können. Insgesamt stehen damit 1.300 erzeugte Datenreihen für die Analyse der klimatischen Änderung im polnisch-sächsischen Grenzraum zur Verfügung. Fokus dieser Analyse bilden die thermische und bioklimatische Entwicklung im Zeitraum 1971–2100.

Als erster Schritt werden die simulierten Klimadaten im Kontrollzeitraum 1971–2000 mit den beobachteten Werten im gleichen Zeitraum verglichen. Die Abweichung der simulierten von den beobachteten Daten dient der Einschätzung, wie gut das verwendete Modell WETTREG 2013 in der Lage ist, das Klima der Gegenwart abzubilden. Anschließend erfolgt die Analyse der Klimaprojektionen für die zwei Zeitscheiben 2021–2050 (mittelfristige Zukunft) sowie 2071–2100 (langfristige Zukunft). Damit systematische Fehler der Klimaprojektionen die Ergebnisse nicht verfälschen, werden Änderungssignale gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 berechnet. Als Änderungssignal wird die Differenz der Zeitscheibenmittel bzw. Jahresmittel zum jeweiligen Mittelwert 1971–2000 verstanden. Der in den Abbildungen im Kapitel *Ergebnisse* (S. 16 ff.) dargestellte Schwankungsbereich (grau) um die Projektionsmittelwerte zeigt die szenariobedingte Modellvariabilität auf.

Im Rahmen von KLAPS wurden alle fünf Szenarioläufe einzeln ausgewertet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird allerdings für RCP8.5 ein mittlerer Szenariolauf dargestellt. Die aus den verschiedenen Läufen resultierende Bandbreite wird anschaulich anhand von Boxplot-Diagrammen verdeutlicht.

ungsdaten beträgt $+0,2^{\circ}\text{C}$ (Abbildung 10, unten). Im Jahresverlauf lassen sich geringe Überschätzungen durch die Resimulationen bis zu $+0,7^{\circ}\text{C}$ (Minimumtemperatur im Mai) unter allen ausgewählten Klimaszenarien feststellen. Die grau hinterlegte Fläche repräsentiert die modellbedingte als auch räumliche Schwankungsbreite in Abhängigkeit aller betrachteten 1.300 Realisierungen.

Ergebnisse

Modellvalidierung

Mittels des Vergleichs beobachteter und resimulierter Klimadaten (20C-Daten der Modellsimulationen) wird eine Modellvalidierung durchgeführt. Hierbei wird die Differenz zwischen den Resimulationen und den tatsächlich beobachteten Klimadaten innerhalb des 30-jährigen Zeitraums 1971–2000 berechnet.

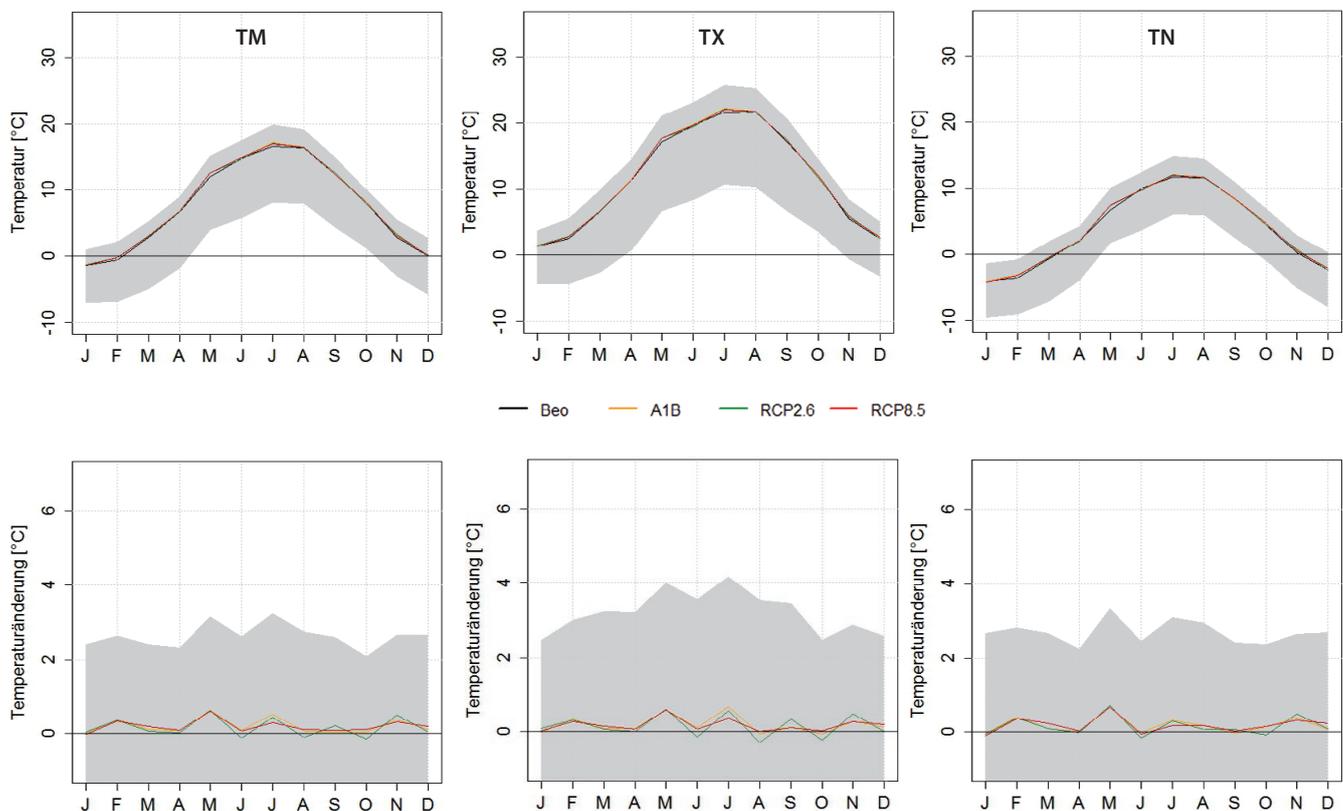
Generell kann die beobachtete Lufttemperatur unter allen verwendeten Klimaszenarien sehr gut durch die Resimulationen repräsentiert werden, wie der typische Jahresgang der Lufttemperatur im Projektgebiet zeigt (Abbildung 10, oben). Die mittlere jährliche Abweichung von Modell- zu Beobach-

Mit Hilfe der Bestimmung des Konfidenzintervalls lässt sich die Güte der genannten Ergebnisse abschätzen. Gemäß diesem Index werden jährliche Temperaturabweichungen von $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ (Mitteltemperatur TM, Maximum der Temperatur TX) bzw. $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ (Minimum der Temperatur TN) in den Bereich der natürlichen Variabilität (Rauschen) eingeordnet. Demzufolge zeigen Beobachtungen und Modelldaten eine sehr gute bis gute Übereinstimmung für das Klimaelement Lufttemperatur unter allen Szenarien für den Zeithorizont 1971–2000 (KREIENKAMP et al. 2013).

Lufttemperatur

Im Zeitraum 1971 bis 2000 liegt die jährliche Mitteltemperatur im Projektgebiet bei $7,5^{\circ}\text{C}$. Für das 21. Jahrhundert wird unter allen betrachteten Kli-

Abbildung 10
Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$] 1971–2000 (oben) und Änderung der Jahresgänge unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6, RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3) im Vergleich zum Jahresgang der Beobachtungswerte (Beo) 1971–2000



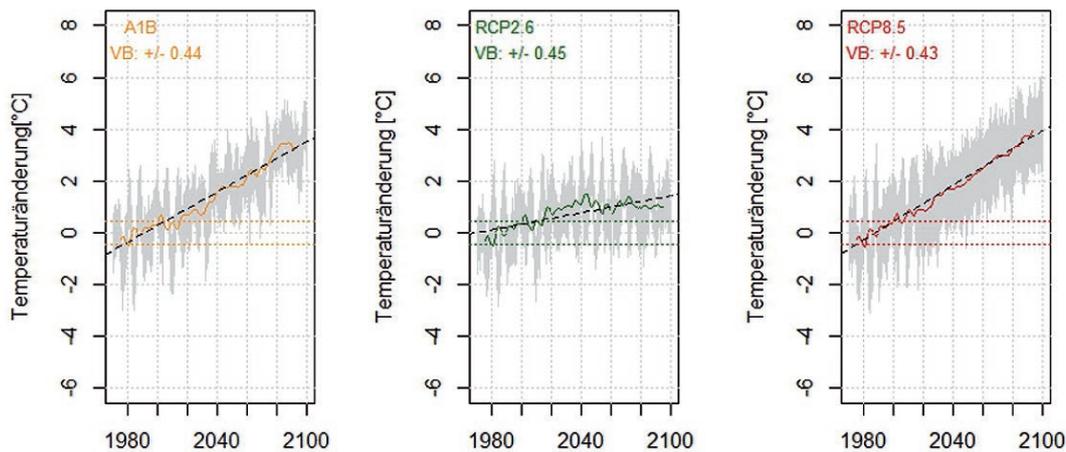
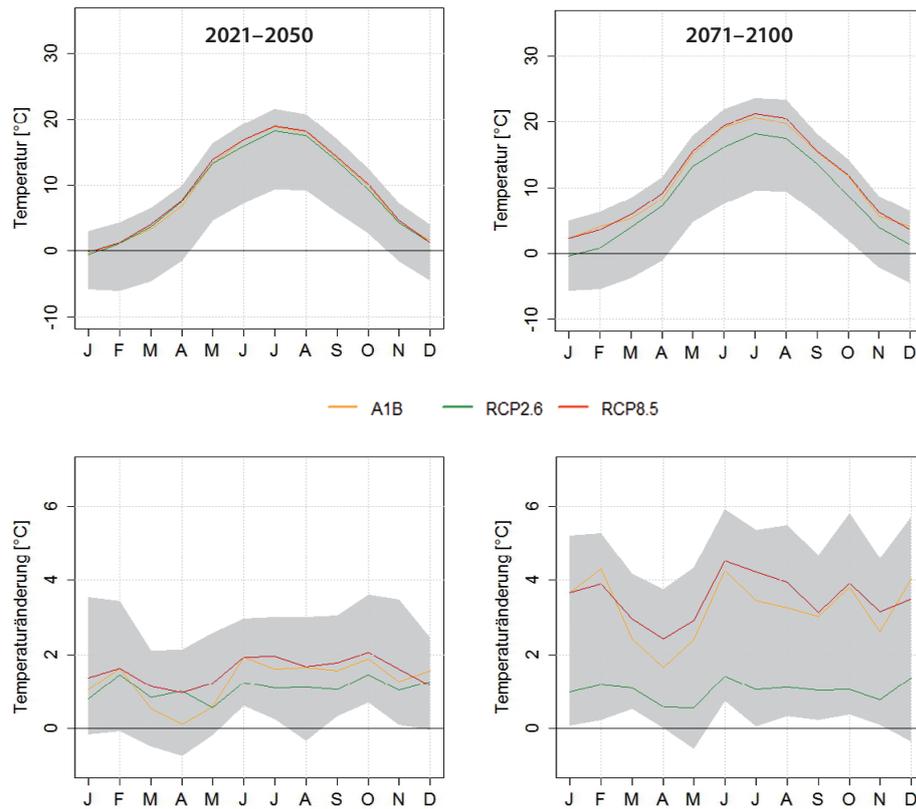


Abbildung 11
Jährliche Änderung der mittleren Lufttemperatur [°C] 1971–2100 unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1, 2, 3) im Projektgebiet (gepunktet = Vertrauensbereich, gestrichelt = linearer Trend, Linie = 11-jährig gleitendes Mittel, grau = Schwankungsbereich aller Realisierungen)

maszenarien ein zunehmender Erwärmungstrend für den polnisch-sächsischen Grenzraum projiziert (Abbildung 11). In Abhängigkeit verschiedener Klimaszenarien und Globalmodelle zeigen sich unterschiedliche Verläufe der zukünftig möglichen klimatischen Entwicklung. So variiert der Temperaturanstieg zwischen $+1,0\text{ °C}$ (RCP2.6) und $+4,0\text{ °C}$ (RCP8.5) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Zukünftige Jahresmitteltemperaturen zwischen $8,5\text{ °C}$ und $11,5\text{ °C}$ im Projektgebiet wären möglich. Während die Änderungssignale bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts ein ähnliches Niveau zeigen, nimmt deren Bandbreite zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich zu. Unter dem an das „2-Grad-Ziel“ orientierte Szenario RCP2.6 stagniert der Temperaturanstieg ab Mitte des Jahrhunderts bei $+1,0\text{ °C}$ und unterscheidet sich damit deutlich von den projizierten Verläufen unter RCP8.5 und dem Emissionsszenario A1B.

Um die dekadische Variabilität von Klimaparametern berücksichtigen zu können, wird ein 11-jährig gleitendes Mittel berechnet. Anhand des Vertrauensbereichs kann zudem das Intervall der natürlichen Variabilität der mittleren Lufttemperatur von robusten Temperaturänderungssignalen getrennt werden. Ab etwa 2020 verlässt die Temperaturkurve den Vertrauensbereich im positiven Bereich, so dass der Temperaturanstieg im Projektgebiet als robustes Signal bewertet werden kann. Grau hinterlegt sind die mittleren Jahreswerte aller berechneten Simulationen. Diese verdeutlichen die jährliche Schwankung der Temperatur in Abhängigkeit aller Simulationen, die sich in ihrer mittleren Amplitude nur wenig verändert.

Abbildung 12
 Jahresgang der Lufttemperatur [°C] 2021–2050 (links) und 2071–2100 (rechts) sowie Änderung im Jahresgang gegenüber 1971–2000 (unten) im Projektgebiet für die Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)



In [Abbildung 12](#) ist der mittlere Jahresgang der Mitteltemperatur in den Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 sowie deren Änderungssignale gegenüber 1971–2000 abgebildet. Grau hinterlegt ist der modell- als auch räumlich bedingte Schwankungsbereich dargestellt. Werden nur die Mittelwerte betrachtet, zeigt sich gegenüber 1971–2000 im Jahresgang 2021–2050 je nach Szenario ein monatlicher Temperaturanstieg von +0,1 °C bis +1,9 °C. Während die Projektionen in der nahen Zukunft ähnliche Verläufe aufzeigen, nimmt die Bandbreite zwischen den Szenarien zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich zu. Das „optimistische“ Szenario RCP2.6 grenzt sich durch geringere Temperaturzunahmen deutlich von den Szenarien A1B und RCP8.5 ab. Im monatlichen Vergleich liegt die Zunahme der Mitteltemperatur 2071–2100 zwischen +0,6 °C und +4,5 °C. Auffällig ist das moderate Erwärmungssignal im Frühjahr in beiden Zeitscheiben, welches dem gegenwärtig beobachteten deutlichen Temperaturanstieg in dieser Jahreszeit entgegensteht. KREIENKAMP & SPEKAT (2013) verweisen in ihrer Arbeit auf den Einfluss der verwendeten Globalmodelle ECHAM5 und MPI-ESM, die an dieser Stelle möglicherweise ihren „Fingerabdruck“ hinterlassen.

Ein Vergleich der jährlichen und saisonalen Verteilung der Temperaturänderung anhand von Boxplots verdeutlicht die Höhe und den zeitlichen Schwerpunkt der Erwärmung im Projektgebiet ([Abbildung 13](#)). Die Ergebnisse zeigen, dass der Anstieg der Lufttemperatur zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich höher ist, als zur Mitte des Jahrhunderts. Die stärkste Zunahme zeigt sich für die Maximumtemperatur (TX) im Sommer, welche eine entscheidende Rolle für die Entwicklung des Auftretens warmer Ereignistage wie Hitzetage spielt. Die höchste Zunahme der Minimumtemperatur (TN) wird dagegen im Winter projiziert mit Folgen für die Entwicklung des Auftretens von kalten Ereignistagen. Das schwache Erwärmungssignal im Frühjahr (< +1 °C) hebt sich in beiden Zeitscheiben und unter allen Klimaszenarien deutlich hervor. Verglichen mit 2021–2050 nimmt zum Ende des 21. Jahrhunderts vor allem im Winter die Temperatur noch einmal stark zu. Der größte Schwankungsbereich zeigt sich für die Minimumtemperatur im Sommer. Da diese besonders stark von lokalen Faktoren wie der Beschaffenheit der Oberfläche oder dem Relief abhängt, können kleinräumig deutliche Temperaturunterschiede erreicht werden.

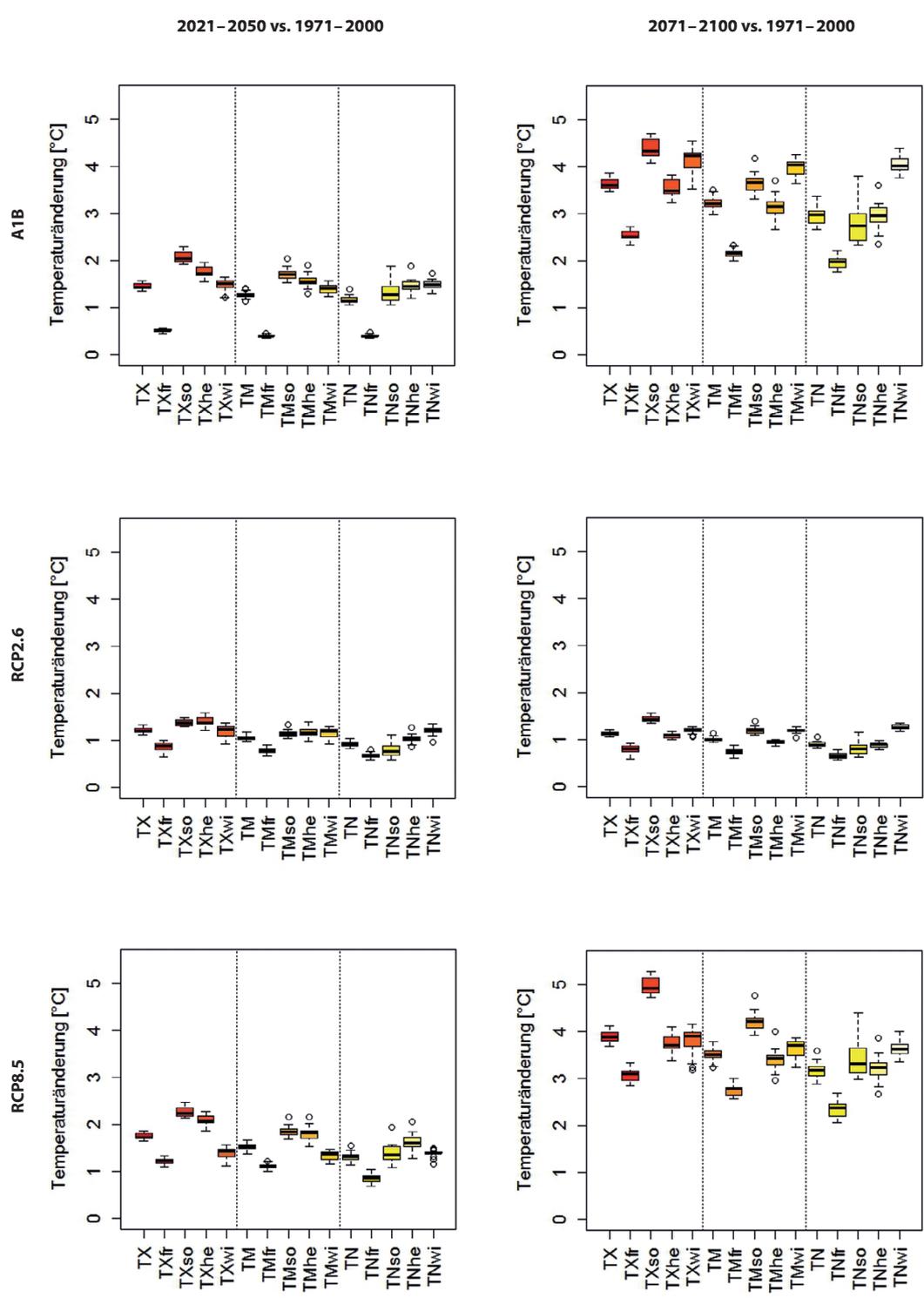


Abbildung 13
Verteilung der jährlichen und jahreszeitlichen Temperaturänderung 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 im Projektgebiet (dicke schwarze Linie = Median, Box = 50% der Daten, Whisker = Minimum/Maximum der Werte im Datensatz oder 1,5-Fache des Interquartilabstands, Punkte = Ausreißer)

Tabelle 3
Szenariobedingte
Bandbreite der jährlichen
und jahreszeitlichen
Änderung der Lufttemperatur
2021 – 2050 und
2071 – 2100 gegenüber
1971 – 2000 in den ver-
schiedenen Höhenstufen

	Höhenstufe	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
2021 – 2050	Maximumtemperatur					
	Tiefland	0,5 – 1,2	1,3 – 2,2	1,4 – 2,0	1,3 – 1,5	1,2 – 1,7
	Hügelland	0,5 – 1,2	1,3 – 2,2	1,4 – 2,1	1,3 – 1,4	1,2 – 1,8
	Bergland	0,5 – 1,3	1,4 – 2,4	1,4 – 2,1	1,2 – 1,3	1,2 – 1,8
	Kammlagen	0,5 – 1,2	1,4 – 2,3	1,5 – 2,1	1,0 – 1,2	1,2 – 1,7
	Mitteltemperatur					
	Tiefland	0,4 – 1,1	1,1 – 1,8	1,1 – 1,8	1,2 – 1,4	1,0 – 1,5
	Hügelland	0,4 – 1,1	1,1 – 1,8	1,1 – 1,8	1,2 – 1,4	1,1 – 1,5
	Bergland	0,4 – 1,1	1,2 – 1,9	1,2 – 1,8	1,2 – 1,3	1,1 – 1,6
	Kammlagen	0,4 – 1,1	1,2 – 2,0	1,2 – 1,9	1,0 – 1,2	1,1 – 1,6
	Minimumtemperatur					
	Tiefland	0,4 – 0,8	0,7 – 1,3	1,0 – 1,5	1,2 – 1,4	0,9 – 1,3
	Hügelland	0,4 – 0,8	0,8 – 1,4	1,0 – 1,6	1,2 – 1,4	0,9 – 1,3
	Bergland	0,4 – 0,9	0,8 – 1,3	1,0 – 1,7	1,3 – 1,4	1,0 – 1,3
	Kammlagen	0,4 – 0,9	0,9 – 1,6	1,1 – 1,8	1,1 – 1,3	1,0 – 1,4
	2071 – 2100	Maximumtemperatur				
Tiefland		0,7 – 3,0	1,4 – 4,8	1,1 – 3,7	1,2 – 4,0	1,1 – 3,9
Hügelland		0,8 – 3,1	1,4 – 4,9	1,1 – 3,7	1,2 – 3,9	1,1 – 3,9
Bergland		0,8 – 3,2	1,5 – 5,2	1,1 – 3,8	1,2 – 3,8	1,2 – 4,0
Kammlagen		0,9 – 3,1	1,5 – 5,1	1,1 – 3,8	1,2 – 3,4	1,1 – 3,9
Mitteltemperatur						
Tiefland		0,7 – 2,7	1,1 – 4,1	1,0 – 3,3	1,2 – 3,8	1,0 – 3,5
Hügelland		0,7 – 2,7	1,2 – 4,2	0,9 – 3,3	1,2 – 3,6	1,0 – 3,5
Bergland		0,8 – 2,8	1,2 – 4,3	1,0 – 3,4	1,2 – 3,6	1,0 – 3,5
Kammlagen		0,8 – 2,8	1,3 – 4,4	1,0 – 3,6	1,2 – 3,5	1,1 – 3,6
Minimumtemperatur						
Tiefland		0,6 – 2,3	0,8 – 3,2	0,9 – 3,0	1,2 – 3,6	0,9 – 3,0
Hügelland		0,6 – 2,3	0,8 – 3,3	0,9 – 3,2	1,3 – 3,7	0,9 – 3,1
Bergland		0,7 – 2,4	0,8 – 3,3	0,9 – 3,2	1,3 – 3,8	0,9 – 3,2
Kammlagen		0,8 – 2,5	1,0 – 3,9	0,9 – 3,5	1,3 – 3,5	1,0 – 3,4

Anhand der höhenspezifischen Analyse der Temperaturentwicklung lassen sich regionale Unterschiede innerhalb des polnisch-sächsischen Grenzraums aufzeigen. Zum Teil weisen die Berg- und Kammlagen im Süden der Projektregion einen etwas stärkeren Erwärmungstrend gegenüber den niederen Lagen auf (Tabelle 3). Die höchsten Änderungssignale werden für die Maximumtemperatur im Sommer im Bergland mit +1,5 bis +5,2 °C zum

Ende des 21. Jahrhunderts erwartet. Im Winter ist langfristig ein Temperaturanstieg von +1,2 bis +4,0 °C möglich, jedoch mit Schwerpunkt im Tiefland. Im Herbst variiert der Erwärmungstrend zwischen +0,9 und +3,8 °C, während im Frühjahr etwas geringe Temperaturzunahmen von +0,6 bis +3,2 °C für den Zeitraum 2071–2100 gegenüber 1971–2000 projiziert werden.

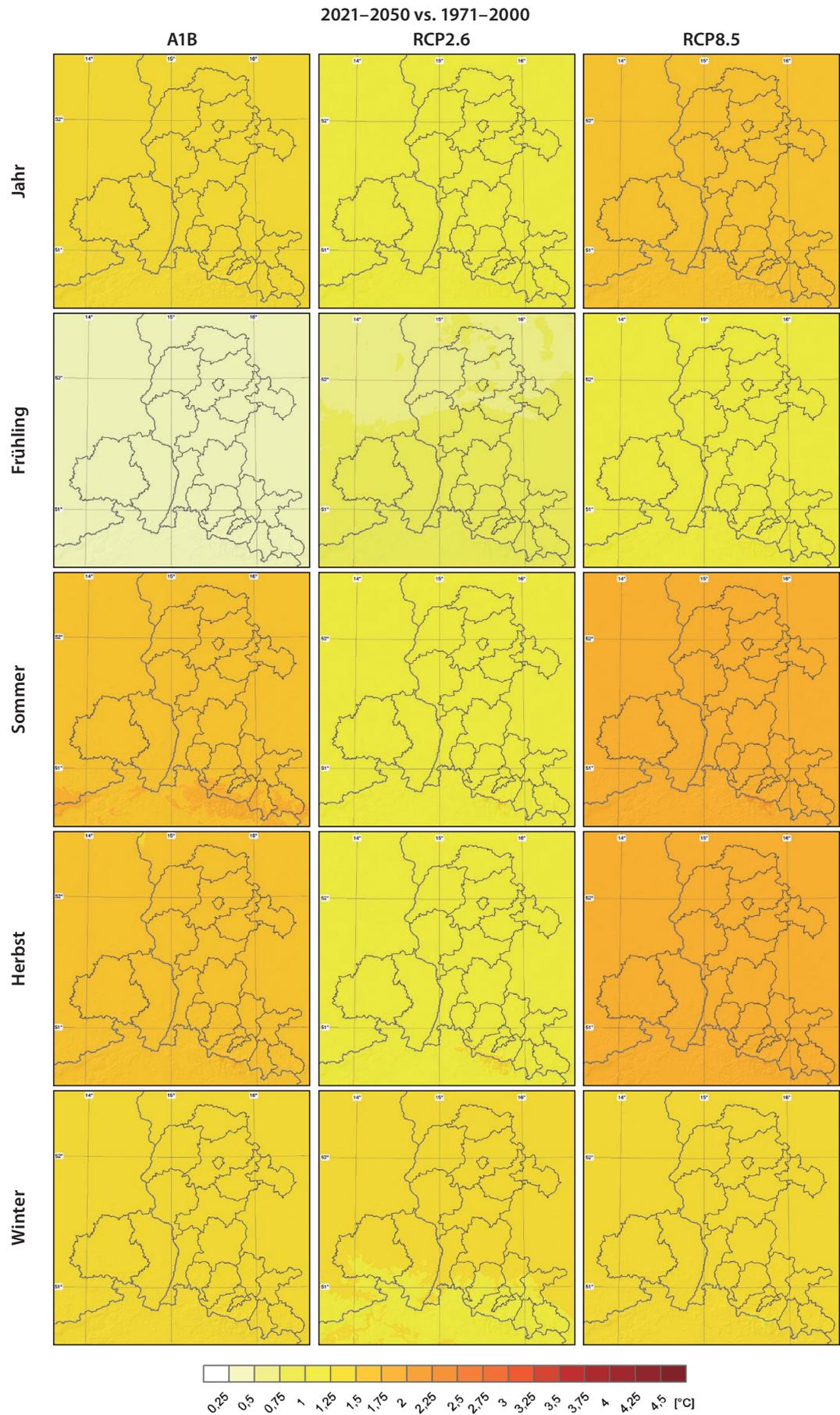


Räumliche Variabilität

In [Abbildung 14](#) werden die simulierten jährlichen und jahreszeitlichen Temperaturveränderungen für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 relativ zum Zeitraum 1971–2000 räumlich dargestellt. Der dafür verwendete Interpolationsansatz wird in SZYMANOWSKI & KRYZA (2012) sowie in Heft 1 „Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum“ beschrieben (MEHLER et al. 2014). Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts zeigen sich kaum räumliche Unterschiede. Zum Ende des Jahrhunderts werden für die Berg- und Kammlagen teilweise etwas stärkere Temperaturanstiege gegenüber dem Tiefland projiziert. Im Winter verhalten sich die räumlichen Muster unter A1B und RCP8.5 umgekehrt.



Abbildung 14
 Änderung der mittleren
 Lufttemperatur [°C]
 für die Klimaszenarien
 A1B, RCP2.6 und RCP8.5
 (Mittel aus Lauf 1,2,3)
 für 2021 – 2050 und
 1971 – 2000 gegenüber
 1971 – 2000 im Projekt-
 gebiet



2071–2100 vs. 1971–2000

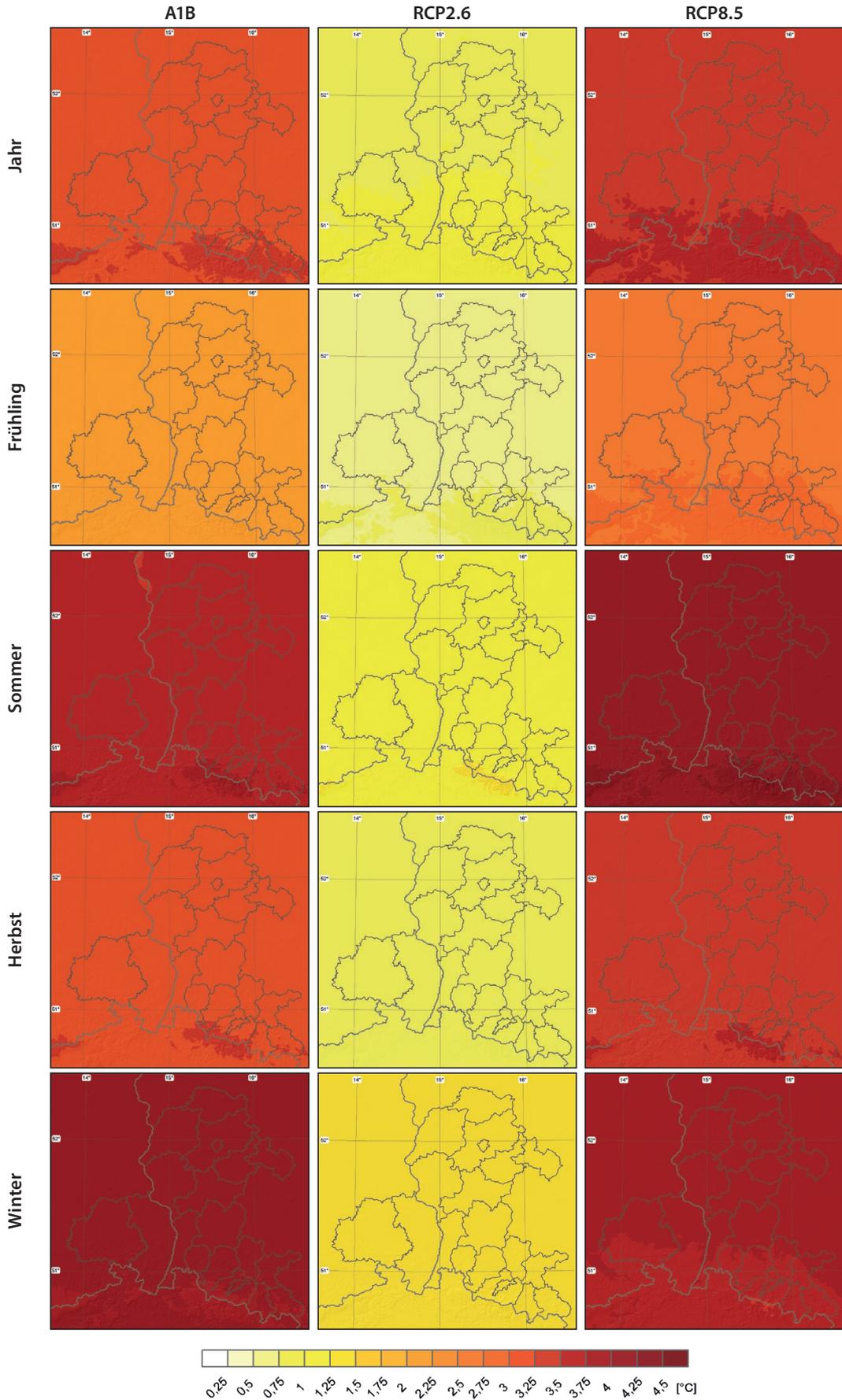


Tabelle 4
Mittlere Anzahl
klimatischer Kenntage
1971 – 2000 (Modell)
je Höhenstufe

	Höhenstufe	Sommertage [d]			Hitztage [d]			Tropennächte [d]			Frosttage [d]			Eistage [d]		
		A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5
1971 – 2000	Tiefland	45	43	45	10	10	10	0,6	0,6	0,6	84	84	84	22	21	22
	Hügelland	33	32	33	6	6	6	0,7	0,7	0,7	96	97	97	29	30	30
	Bergland	30	29	30	5	5	5	0,5	0,5	0,5	101	102	101	28	28	28
	Kammlagen	5	4	5	0	0	0	0,1	0,1	0,1	144	145	144	81	80	81

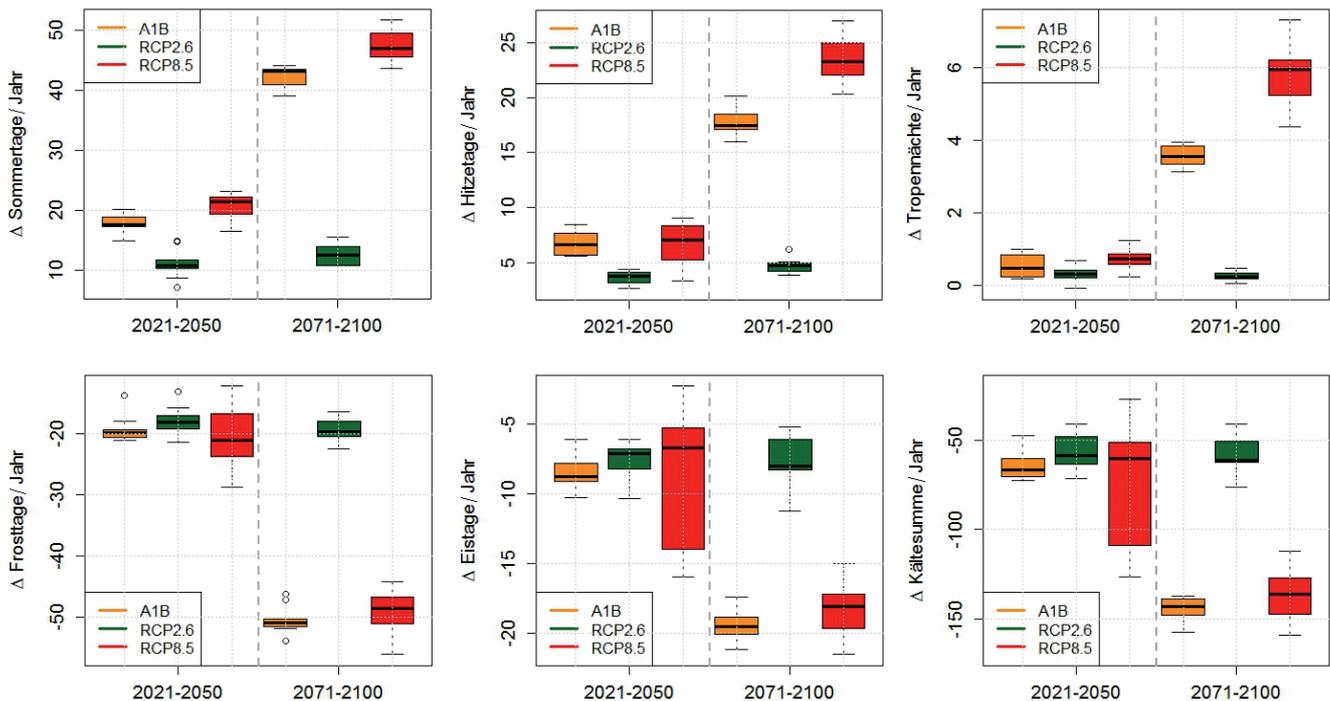
Temperaturabgeleitete Indizes

Eine Übersicht der mittleren Anzahl klimatischer Kenntage im Zeitraum 1971–2000 (Modell) ist in Tabelle 4 dargestellt. In den folgenden Abbildungen wird das jeweilige Änderungssignal in den Zeiträumen 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 dargestellt.

unter den projizierten WETTREG 2013-Realisierungen und damit die interne Modellvariabilität verdeutlicht werden. Aufgrund der Mittelung von 3 Modellläufen à 10 Realisierungen für RCP8.5 weist dieses Szenario die größte Spannweite auf, was bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Besonders im Zeitraum 2021–2050 weichen die einzelnen RCP8.5-Läufe teilweise stark voneinander ab, während zum Ende des 21. Jahrhunderts alle drei Modellläufe ähnliche Entwicklungen aufzeigen.

Abbildung 15
Bandbreite der projizierten Änderung von klimatischen Kenntagen und Kältesumme im Zeitraum 2021 – 2050 und 2071 – 2100 gegenüber 1971 – 2000 am Beispiel Görlitz für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3) (dicke schwarze Linie = Median, Box = 50% der Daten, Whisker = Minimum/Maximum der Werte im Datensatz oder 1,5-Fache des Interquartilabstands, Punkte = Ausreißer)

Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Änderung ausgewählter klimatischer Kenntage und der Kältesumme für Görlitz. Mittels Boxplot-Darstellung kann die Verteilung der Änderung der Kenntage



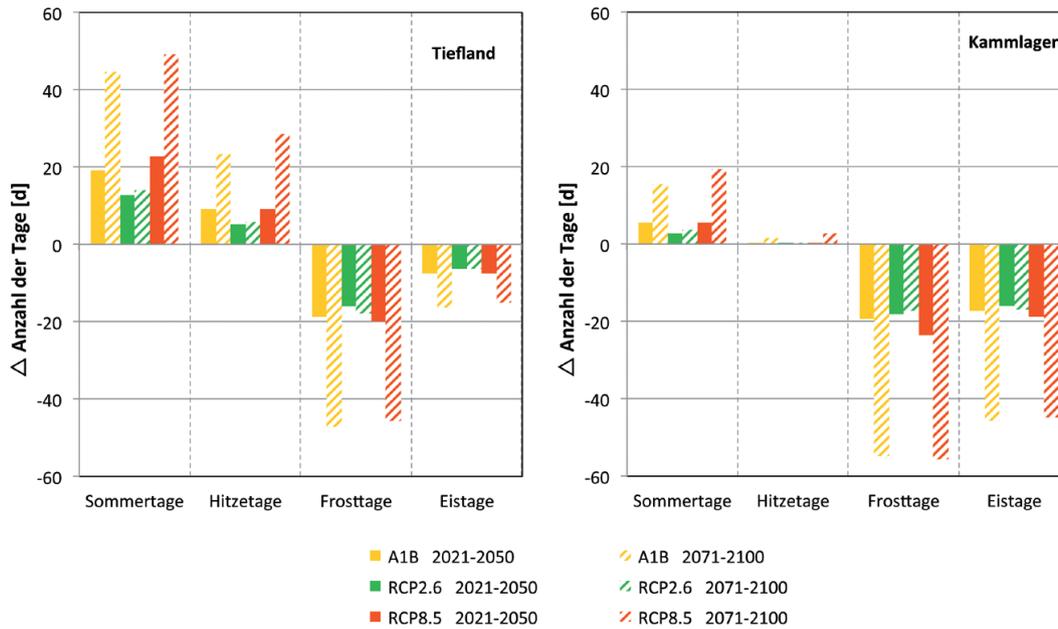


Abbildung 16
Änderungen von klimatischen Kenntagen 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 im Tiefland (links) und in den Kammlagen (rechts) für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)

Warme Kenntage zeigen in Görlitz bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts eine zunehmende Häufigkeit. In diesem Zeitraum liegt das Änderungssignal der einzelnen Modelle auf ähnlichem Niveau, während sich zum Ende des 21. Jahrhunderts die Bandbreite zwischen den Modellen stark erhöht. Unter A1B und RCP8.5 werden demnach deutlich mehr warme Tage erwartet, als unter der Annahme der Einhaltung des „2-Grad-Ziels“ (RCP2.6) modelliert wird. Demgegenüber weisen kalte Kenntage eine Abnahme der Häufigkeit auf, die sich im Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zu 2021–2050 noch einmal deutlich verstärkt.

Für das Projektgebiet erfolgt zudem eine höhen-spezifische Auswertung der Änderung des Auftretens klimatischer Kenntage. Im gesamten Untersuchungsgebiet zeigen warme Kenntage wie Sommer- und Hitzetage unter allen Szenarien im 21. Jahrhundert eine Zunahme, während für kalte Kenntage übereinstimmend deutliche Abnahmen modelliert werden. Im Zeitraum 2021–2050 werden im Tiefland 13 bis 23 Sommertage ($T_X > 25^\circ\text{C}$) mehr erwartet als im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000. Unter A1B und RCP8.5 könnte sich diese Anzahl zum Ende des 21. Jahrhunderts auf 45 bis 49 Tage verdoppeln. In den Kammlagen werden 3 bis 6 Tage im Zeitraum 2021–2050 und zum Ende des Jahrhunderts 4 bis 20 Tage mehr pro Jahr simuliert (Abbildung 16).

Hitzetage ($T_X > 30^\circ\text{C}$) könnten im Tiefland zur Mitte des Jahrhunderts 5 bis 9 Tage, langfristig (2071–2100) sogar 6 bis 29 Tage mehr pro Jahr auftreten. In den Kammlagen bleiben Hitzetage dagegen sehr seltene Ereignisse. Bis zum Ende des Jahrhunderts werden jedoch bis zu 3 Hitzetage pro Jahr erwartet. Ebenso kommen Tropennächte ($T_N > 20^\circ\text{C}$) sowohl im Tiefland als auch in den Kammlagen eher selten vor. Im Zeitraum 2071–2100 könnten Tropennächte allerdings auch im Tiefland eine Rolle spielen. Frosttage ($T_N < 0^\circ\text{C}$) zeigen im Tiefland als auch in den Kammlagen eine ähnliche Entwicklung. Im Zeitraum 2021–2050 werden 16 bis 20 Frosttage weniger gegenüber 1971–2000 erwartet. Im Zeitraum 2071–2100 nimmt die mittlere jährliche Anzahl der Frosttage um 17 bis 56 Tage ab. Bei den Eistagen ($T_X < 0^\circ\text{C}$) zeigt sich vor allem in den höheren Lagen eine starke Abnahme von 16 bis 19 Tagen (2021–2050) bzw. 17 bis 46 Tagen (2071–2100). Im Tiefland treten diese Tage seltener auf und weisen eine geringere Abnahme von 6 bis 8 Tagen (2021–2050) bzw. 6 bis 16 Tagen (2071–2100) auf.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die regionalen Unterschiede der zukünftig möglichen Änderung der Ereignistage im polnisch-sächsischen Grenzraum.

Tabelle 5
Höhenabhängige
Änderung klimatischer
Kenntage 2021–2050
und 2071–2100 gegenüber
1971–2000 für die
Szenarien A1B, RCP2.6
und RCP8.5
(Mittel aus Lauf 1,2,3)

	Höhenstufe	Sommertage [d]			Hitzetage [d]			Tropennächte [d]			Frosttage [d]			Eistage [d]		
		A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5
2021–2050	Tiefland	19	13	23	9	5	9	1	0	1	-19	-16	-20	-8	-6	-8
	Hügelland	19	12	21	7	4	7	1	1	1	-19	-18	-22	-9	-7	-9
	Bergland	18	12	21	7	3	6	1	1	1	-19	-18	-22	-9	-8	-9
	Kammlagen	5	3	6	0	0	0	0	0	0	-19	-18	-23	-17	-16	-19
2071–2100	Tiefland	45	14	49	23	6	29	3	0	5	-47	-18	-46	-16	-6	-15
	Hügelland	43	13	48	19	5	25	5	1	8	-49	-18	-47	-19	-8	-18
	Bergland	42	12	46	18	4	23	4	1	6	-53	-19	-51	-21	-8	-20
	Kammlagen	15	4	20	2	0	3	1	0	1	-55	-17	-56	-46	-17	-45

Tabelle 6
Klassifizierung zur
Beurteilung der Winter-
strenge (SMUL 2008)

Kältesumme	Beurteilung
< 100	sehr milder Winter
100 – 200	normaler Winter
201 – 300	mäßig strenger Winter
301 – 400	strenger Winter
> 400	sehr strenger Winter

Bedingt durch die projizierte Zunahme der Mitteltemperatur im Projektgebiet wird eine Abnahme der Kältesumme in allen Höhenstufen und unter allen Szenarien erwartet. Gemäß Klassifikation (Tabelle 6) und der projizierten Abnahme der Kältesumme (Tabelle 7) sind zukünftig deutlich veränderte Winterbedingungen im polnisch-sächsischen Grenzraum zu erwarten.

Tabelle 7
Mittlere Kältesumme
1971–2000 (Modell) und
höhenabhängige Ände-
rung der Kältesumme
2021–2050 und 2071–2100
gegenüber 1971–2000 für
die Szenarien A1B, RCP2.6
und RCP8.5 (Mittel aus
Lauf 1,2,3)

Höhenstufe	1971–2000			2021–2050			2071–2100		
	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5
Tiefland	19	13	23	9	5	9	1	0	1
Hügelland	19	12	21	7	4	7	1	1	1
Bergland	18	12	21	7	3	6	1	1	1
Kammlagen	5	3	6	0	0	0	0	0	0

Im Tiefland ist mittel- und langfristig mit „sehr milden“ Winterbedingungen zu rechnen (Abbildung 17). Auch im Hügelland könnten zukünftig nur noch bis Mitte des 21. Jahrhunderts „normale“ Winter auftreten, gegen Ende des Jahrhunderts nimmt die Winterstrenge nochmals stark ab. Im Bergland, wo gegenwärtig „mäßig strenge“ Winter herrschen, verschiebt sich die Einordnung hin zu „normalen“ (2021–2050) bis zu „sehr milden“ Wintern

(2071–2100). In den Kammlagen, wo aktuell noch Schneesicherheit während der Wintersportsaison gegeben ist, könnte diese deutlich abnehmen. Gegenwärtig sind hier „sehr strenge“ Winter zu beobachten. Zukünftig könnten die Winter in den höheren Lagen deutlich milder werden und langfristig sogar „mäßig strenge“ Bedingungen (A1B, RCP8.5) aufzeigen.

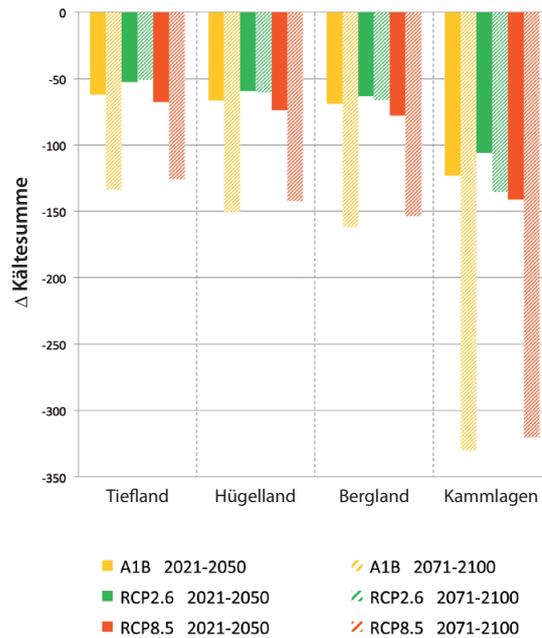


Abbildung 17
Höhenabhängige Änderung der Kältesumme 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)

Perioden

Die projizierten Änderungssignale der Häufigkeit von Hitzewellen (sechs aufeinanderfolgende Tage mit TX > 90%-Perzentil von TX im Zeitraum 1971–2000) sowie der Dauer von Frost- und frostfreien Perioden in den Zeiträumen 2021 – 2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 sind in [Tabelle 8](#) dargestellt.

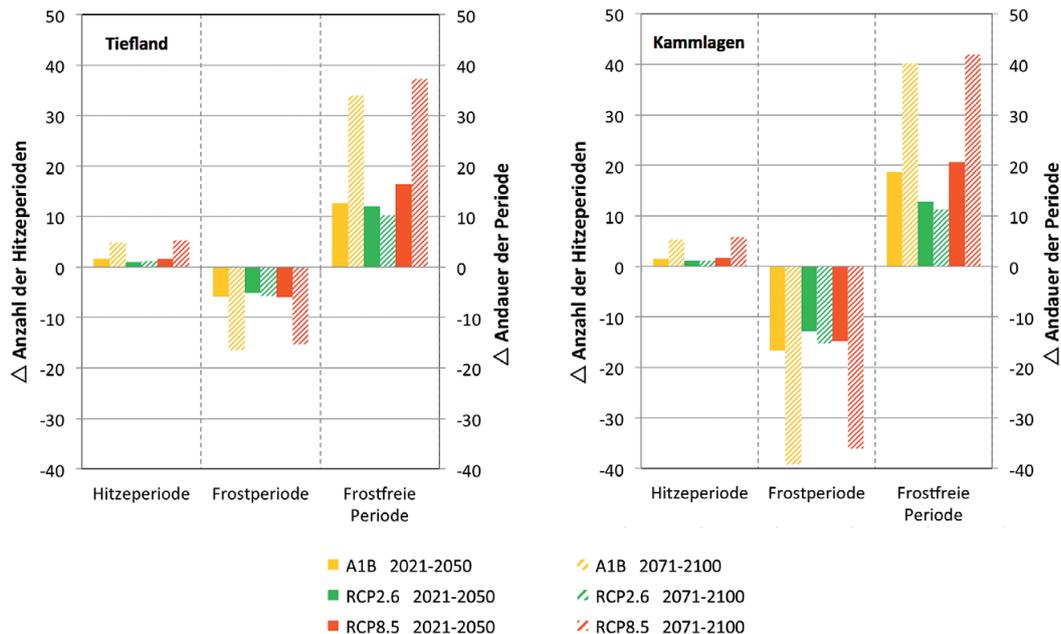
Hitzewellen, die gegenwärtig etwa einmal pro Jahr auftreten, zeigen eine Zunahme um 1 bis 2 Er-

eignisse zur Mitte des 21. Jahrhunderts. Während unter RCP2.6 keine weitere Zunahme zum Ende des 21. Jahrhundert zu erwarten ist, wird unter A1B und RCP8.5 eine weitere Zunahme um fünf bis sechs Hitzewellen jährlich modelliert. Die Dauer der Frostperioden weist dagegen, vor allem in den höheren Lagen, abnehmende Tendenzen auf ([Abbildung 18](#)). Im Zeitraum 2071–2100 verkürzt sich die Dauer der Frostperioden in den Kammlagen um 15 bis 39 Tage und um ein bis zwei Wochen im Tiefland. In Abhängigkeit des Erwärmungstrends verlängert

	Höhenstufe	Hitzeperiode [Ereignis]			Frostperiode [d]			Frostfreie Periode [d]		
		A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5
1971–2000	Tiefland	1	1	1	27	28	27	185	183	185
	Hügelland	1	1	1	35	37	35	182	180	182
	Bergland	1	1	1	36	37	36	180	178	180
	Kammlagen	1	1	1	59	60	59	149	148	149
2021–2050	Tiefland	2	1	2	-6	-5	-6	13	12	16
	Hügelland	2	1	2	-8	-7	-8	13	12	17
	Bergland	2	1	2	-8	-8	-8	12	12	16
	Kammlagen	2	1	2	-17	-13	-15	19	13	21
2071–2100	Tiefland	5	1	5	-16	-6	-15	34	10	37
	Hügelland	5	1	6	-21	-8	-19	36	9	39
	Bergland	5	1	6	-22	-9	-21	33	10	36
	Kammlagen	5	1	6	-39	-15	-36	40	11	42

Tabelle 8
Mittlere Häufigkeit der Hitzeperioden und Andauer von Frost- und frostfreien Perioden 1971–2000 (Modell) sowie höhenabhängige Änderung der Häufigkeit und Andauer in den Zeiträumen 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)

Abbildung 18
Höhenabhängige
Änderung der Häufigkeit
von Hitzeperioden und
Andauer Frost- und frost-
freier Perioden 2021 – 2050
und 2071 – 2100 gegen-
über 1971 – 2000 für die
Szenarien A1B, RCP2.6 und
RCP8.5 (Mittel aus Lauf
1, 2, 3)



sich die Dauer der frostfreien Periode um zwei bis drei Wochen im Zeitraum 2021–2050. Zum Ende des 21. Jahrhunderts werden sich die frostfreien Phasen um bis zu 42 Tage verlängern.

Agrarmeteorologische Indizes

Wachstumsgradtage (GDD)

Wachstumsgradtage (GDD) werden verwendet, um das Blüh- und Reifepotential von Pflanzen und Getreide in einer Region abschätzen zu können. Je nach Anwendungsfall werden verschiedene Zeiträume und Berechnungsmethoden benutzt. In der vorliegenden Studie werden Wachstumsgradtage in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (Durchschnitt der täglichen Minimum- und Maximumtemperatur) im Zeitraum vom 01.04. bis 31.10. errechnet und mit einem Schwellenwert von 10 °C verglichen.

$$GDD = \sum_{01.04.}^{31.10.} \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - 10^{\circ}C \text{ (wenn } GDD > 0)$$

In der KLAPS-Projektregion variieren die beobachteten mittleren Wachstumsgradtage im Zeitraum

1971 – 2000 von 98 °C an der Schneekoppe bis 1104 °C an der Station Cottbus.

Unter allen ausgewählten Klimaszenarien (A1B, RCP2.6 und RCP8.5) wird ein Anstieg der Wachstumsgradtage im gesamten Projektgebiet für das 21. Jahrhundert modelliert (Abbildung 19). Die größte Zunahme von +250 bis +270 °C (2021–2050) und +560 bis +580 °C (2071–2100) gegenüber den modellierten Werten im Zeitraum 1971 – 2000 wird unter dem Emissionsszenario A1B im Tiefland erwartet. In den Kammlagen der Mittelgebirge liegen die Zunahmen bei +40 bis +50 °C zur Mitte und +300 bis +320 °C zum Ende des 21. Jahrhunderts. Ähnliche Entwicklungstrends werden unter dem Szenario RCP8.5 für den Zeitraum 2021–2050 projiziert. Im Zeitraum 2071–2100 beträgt das Änderungssignal +520 bis +540 °C im Tiefland und +280 bis +300 °C im Bergland. Die geringsten Änderungen von +200 °C im Tiefland und +50 °C im Bergland (2021–2050) bzw. +380 bis +400 °C im Tiefland und +180 bis +200 °C im Bergland (2071–2100) werden unter dem Szenario RCP2.6 berechnet.

Tabelle 9
Klassifizierung der
Höhenstufen im Projekt-
gebiet und zugehörige
Klimastationen

Höhenstufe	Höhe [m ü. NN]	Klimastation
Tiefland	< 150	Legnica (122 m); Lindenberg (98 m)
Hügelland	150-350	Zielona Góra (192 m); Dresden (227 m)
Bergland	350-650	Szczawno Zdrój (430 m); Varnsdorf (365 m)
Kammlagen	>=650	Jakuszyce (860 m); Śnieżka (1602 m)

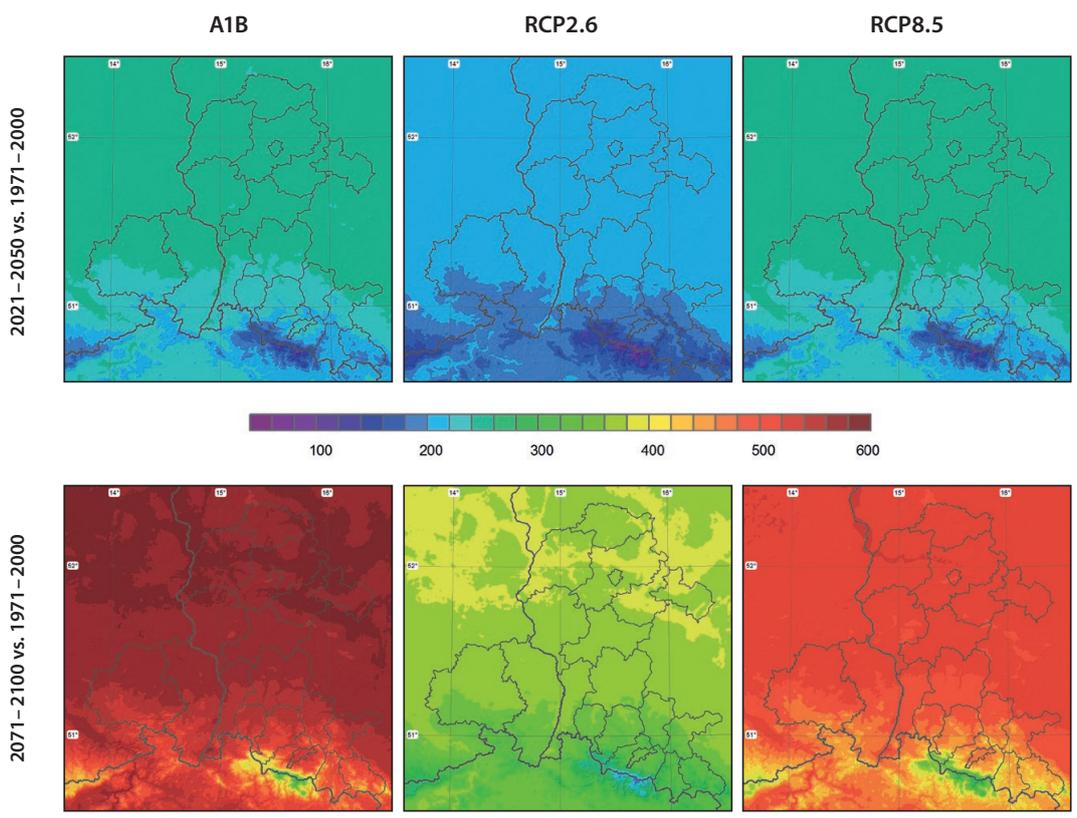


Abbildung 19
Änderungssignal der Wachstumsgradtage [°C] im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)

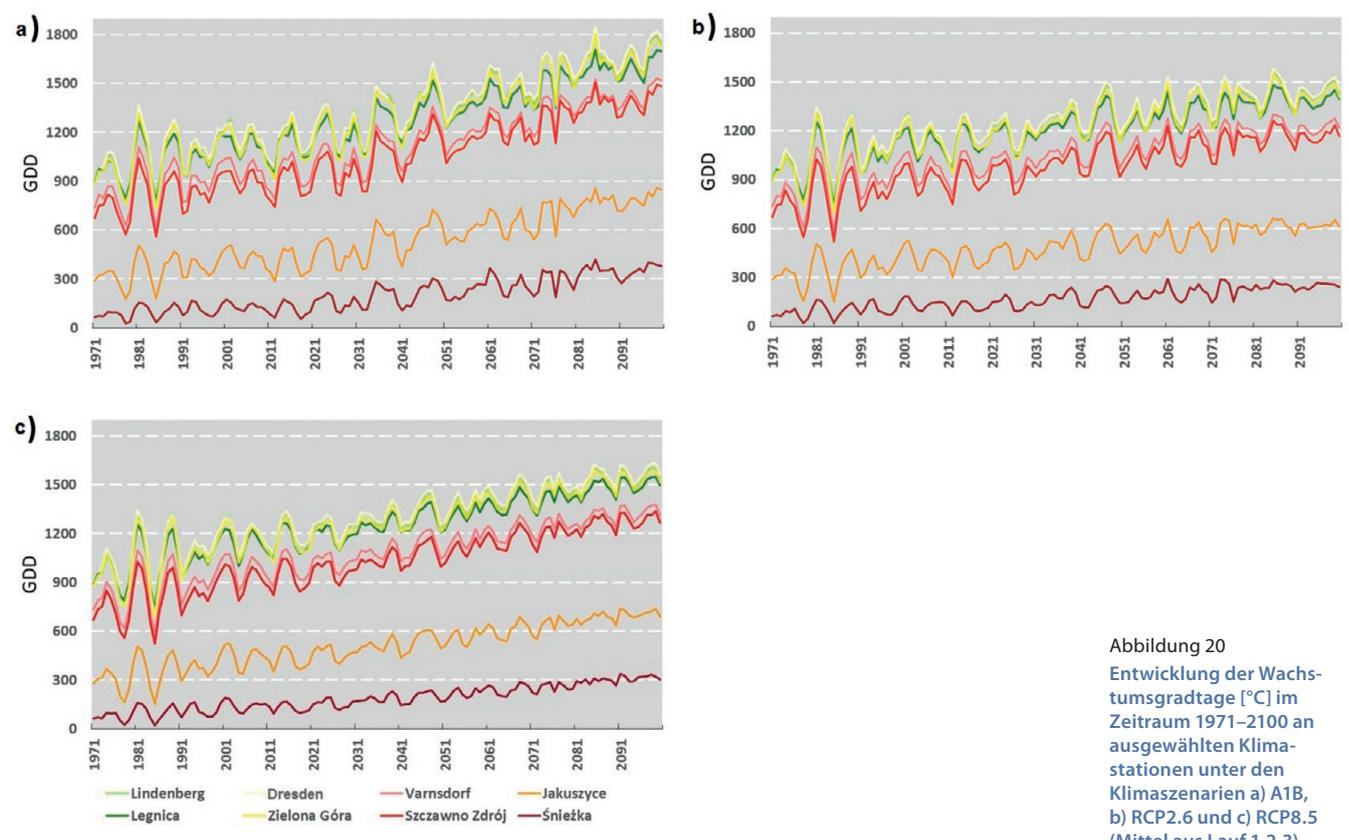


Abbildung 20
Entwicklung der Wachstumsgradtage [°C] im Zeitraum 1971–2100 an ausgewählten Klimastationen unter den Klimaszenarien a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)

Basierend auf den dargestellten Ergebnissen lassen sich die stärksten Zunahmen der GDD im Tiefland und die geringsten Änderungen im Bergland verorten (Tabelle 9, Abbildung 20). Während die Wachstumsgradtage unter A1B und RCP8.5 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts stetig zunehmen, stagniert die Zunahme unter RCP2.6 in den letzten drei Dekaden 2071–2100. Auffällig ist zudem eine Abnahme der Jahr-zu-Jahr-Variabilität der GDD-Werte, insbesondere in den höheren Lagen zum Ende des 21. Jahrhunderts.

Summe der aktiven Temperaturen (SAT)

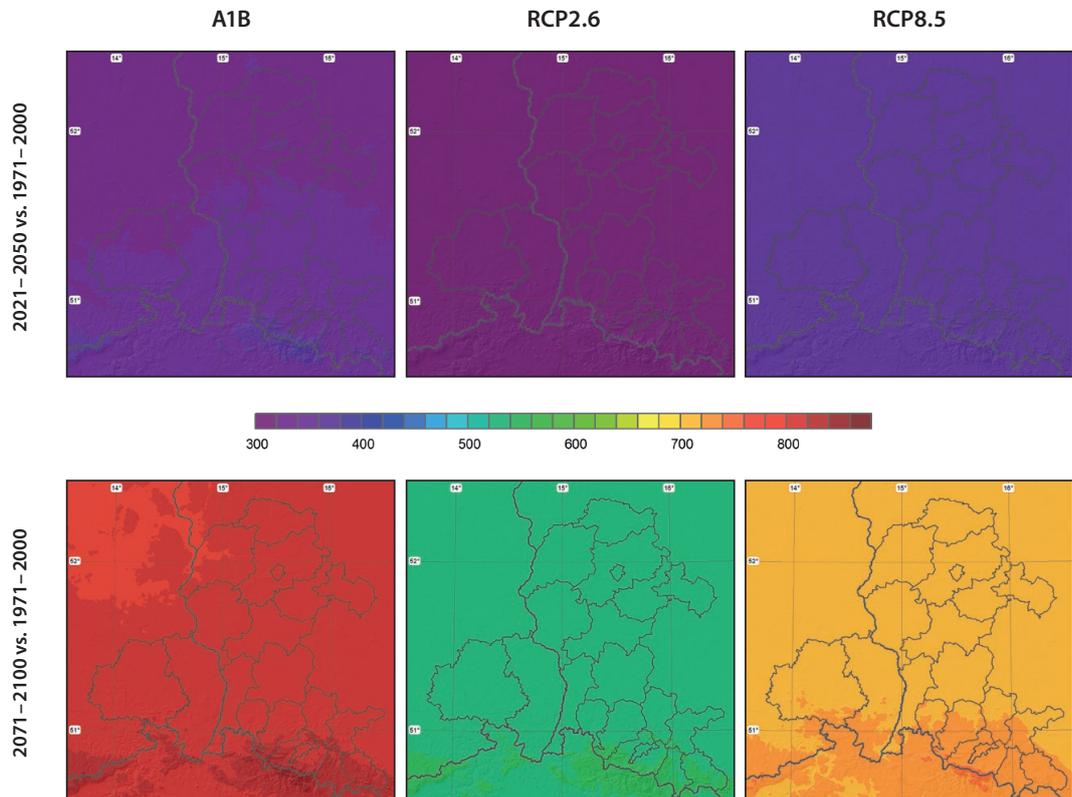
Die Summe der aktiven Temperaturen (SAT) errechnet sich aus der Summe der mittleren täglichen Lufttemperatur größer oder gleich 10 °C im Zeitraum zwischen April und Oktober.

$$SAT = \sum_{01.04.}^{31.10.} \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \text{ für } T_D = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \geq 10^{\circ}\text{C}$$

Im Zeitraum 1971–2000 variiert die SAT zwischen 500 °C auf der Schneekoppe und 2782 °C an der Station Cottbus. Ähnlich den GDD-Werten wird die räumliche Verteilung der SAT-Werte von der Geländehöhe beeinflusst.

Entsprechend der modellierten Temperaturerhöhung wird eine Zunahme der SAT im gesamten Projektgebiet und unter allen Klimaszenarien im 21. Jahrhundert projiziert (Abbildung 21). Allerdings zeigen sich Unterschiede in der räumlichen Entwicklung gegenüber den Wachstumsgradtagen. Während die Veränderungen der SAT zur Mitte des Jahrhunderts etwa auf gleichem Niveau liegen, werden zum Ende des 21. Jahrhunderts stärkere Zunahmen in den Bergregionen gegenüber dem Tiefland erwartet (80 °C unter A1B). Der Grund für die Abweichung zum GDD-Index basiert auf der differenzierten Berechnungsmethode beider Indikatoren. Eine Zunahme der Anzahl der Tage mit einer mittleren Lufttemperatur höher 10 °C hat in den Bergregionen einen größeren Einfluss als im Tiefland. Auch für die SAT zeigen sich in den Bergregionen die stärksten Zunahmen unter dem Szenario A1B mit +390 bis +400 °C im Zeitraum 2021–2050 und +860 bis +880 °C im Zeitraum 2071–2100. Unter RCP8.5 liegen die Zunahmen zur Mitte des Jahrhunderts auf gleichem Niveau, im Zeitraum 2071–2100 etwas geringer mit +710 bis +730 °C gegenüber 1971–2000. Deutlich niedriger fallen die Veränderungen unter RCP2.6 mit +300 bis +320 °C (2021–2050) bzw. +510 bis +540 °C (2071–2100), aus.

Abbildung 21
Änderungssignal der Summe der aktiven Temperaturen [°C] im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)



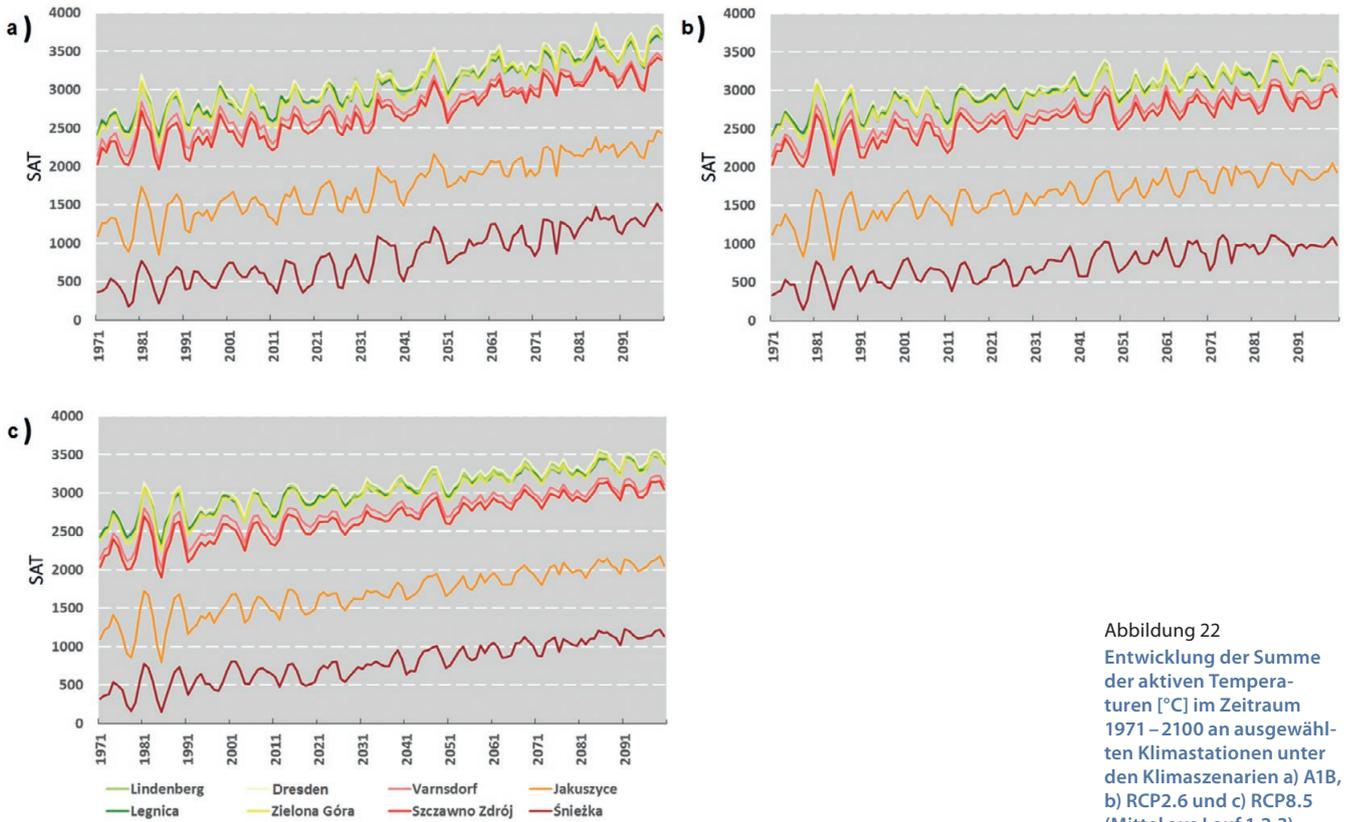


Abbildung 22
Entwicklung der Summe der aktiven Temperaturen [°C] im Zeitraum 1971–2100 an ausgewählten Klimastationen unter den Klimaszenarien a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)

Wie bereits für die GDD dargestellt, zeigt die SAT einen deutlich zunehmenden Trend im 21. Jahrhundert im gesamten Projektgebiet (Abbildung 22). Während die SAT unter A1B und RCP8.5 kontinuierlich zunimmt, stagniert der Anstieg unter RCP2.6 ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts. Ähnlich zu den GDD nimmt die Jahr-zu-Jahr-Variabilität an den Stationen im Bergland bis 2100 ab.

Hydrothermaler Koeffizient nach Selyaninov (HTC)

Der hydrothermale Koeffizient nach Selyaninov (HTC) berücksichtigt neben der mittleren täglichen Lufttemperatur T die Niederschlagssumme R und erlaubt Aussagen über die Wasserverfügbarkeit im Projektgebiet (SELYANINOV 1937).

$$HTC = R / 0,1 \Sigma T$$

Zunehmende Temperaturen oder abnehmende Niederschlagssummen führen zu einer Abnahme respektive Zunahme des HTC. Einen Überblick über die Klassifizierung des HTC liefert Tabelle 10.

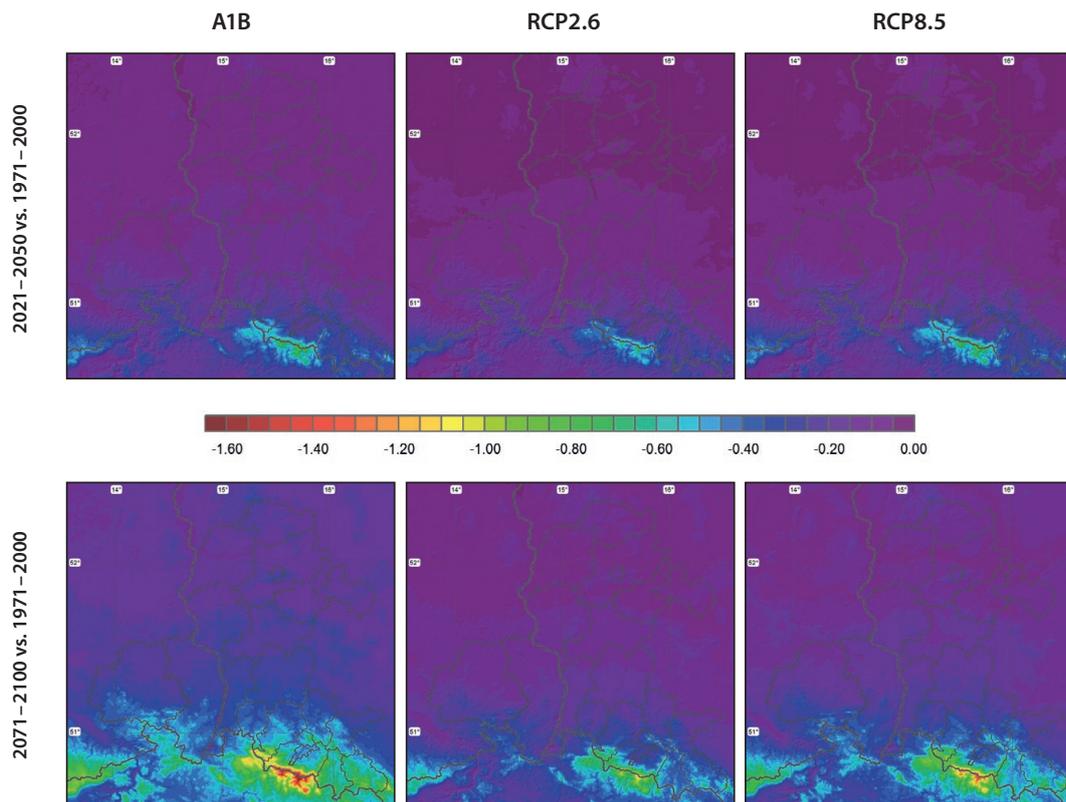
Beobachtungsdaten im Zeitraum 1971–2000 zeigen im Projektgebiet eine Zunahme des HTC mit zunehmender Höhe. Die niedrigsten HTC-Werte von 0,3

werden im Tiefland (bis 150 m ü. NN) erreicht, die höchsten mit einem Wert von 3,0 in den höheren Lagen (über 650 m ü. NN). Zu beachten ist hierbei allerdings die hohe Jahr-zu-Jahr-Variabilität des Indikators. Dürrebeschreibende HTC-Werte von <0,5 werden an einer Station im Projektgebiet für die Hälfte des betrachteten Zeitraums beobachtet. Klimaprojektionen für den Zeitraum 2021–2050 zeigen im Projektgebiet einen leicht abnehmenden Trend des HTC unter allen verwendeten Klimaszenarien (Abbildung 23). Während die Abnahme im Tiefland zwischen -0,05 und -0,1 liegt, werden im Bergland etwas höhere Veränderungen von -0,2 bis -0,4 projiziert. Die extremsten Werte von -0,95 werden für die Kammlagen des Riesengebirges modelliert. Unter dem Szenario A1B bedeutet dies,

HTC	Beschreibung
0,4 bis 0,7	sehr trocken
0,7 bis 1,0	trocken
1,0 bis 1,3	mäßig trocken
über 1,3	feucht

Tabelle 10
Wasserverfügbarkeit für die Vegetation in Abhängigkeit vom HTC-Wert

Abbildung 23
 Änderungssignal
 des Hydrothermalen
 Koeffizienten nach
 Selyaninov im Zeitraum
 2021–2050 und 2071–2100
 gegenüber 1971–2000
 unter den Klimaszenarien
 A1B, RCP2.6 und RCP8.5
 (Mittel aus Lauf 1,2,3)



dass sich Regionen, die durch Wasserdefizit charakterisiert werden ($HTC < 1$), ausdehnen und Gebiete im Hügel- und Bergland umfassen. Dürrebedingungen ($HTC < 0,5$) werden nur unter A1B und in Teilen entlang der Oder im Norden des Projektgebiets erwartet.

Im Zeitraum 2071–2100 wird ein weiterer deutlicher Rückgang der HTC Werte, vor allem unter A1B und RCP8.5, projiziert. Unter Szenario A1B zeigen sich Abnahmen von -0,1 bis -0,2 im Tiefland und -0,3 bis -0,8 im Bergland. In den Kammlagen des Riesengebirges werden sogar Abnahmen um -1,6 modelliert. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts würde demnach fast das gesamte Projektgebiet im Jahresmittel unter Wasserdefizit leiden. Nur in den höchsten Lagen der Mittelgebirge werden HTC-Werte über 1 erreicht. Unter RCP8.5 verläuft die kritische Grenze ($HTC < 1$) im Bereich von 550 m ü. NN. Unter RCP2.6 liegt der Grenzwert 100 m niedriger bei etwa 450 m ü. NN. Zudem nimmt der Anteil der Gebiete mit Trockenstress und Dürrebedingungen ($HTC < 0,5$) unter dem Szenario A1B deutlich zu und umfasst im Zeitraum 2071–2100 fast den gesamten Tieflandbereich im polnisch-sächsischen Grenzraum. Auch unter RCP8.5 werden zunehmende Dürrebedingun-

gen erwartet, während bei Einhaltung des „2-Grad-Ziels“ nur in vereinzelten Regionen entlang der Lausitzer Neiße im Norden der Projektregion Dürrebedingungen auftreten könnten.

Bioklimatische Indikatoren

Die klimatischen Bedingungen an einem Ort wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Bewölkung, Niederschlag und Schneebedeckung gehören zu den wichtigsten natürlichen Einflussfaktoren auf den Tourismus. Im KLAPS-Projektgebiet gilt dies vor allem für die Bergregionen, die durch ein hohes Touristenaufkommen und besondere klimatische Bedingungen geprägt sind. Aber auch in Kurorten (Klimatherapie) sind die klimatischen Bedingungen entscheidend für die Erholung des Menschen.

Um den Einfluss veränderter bioklimatischer Bedingungen auf Tourismus und Klimatherapie bewerten zu können, werden Änderungssignale für die Zeiträume 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter Verwendung der Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 analysiert.

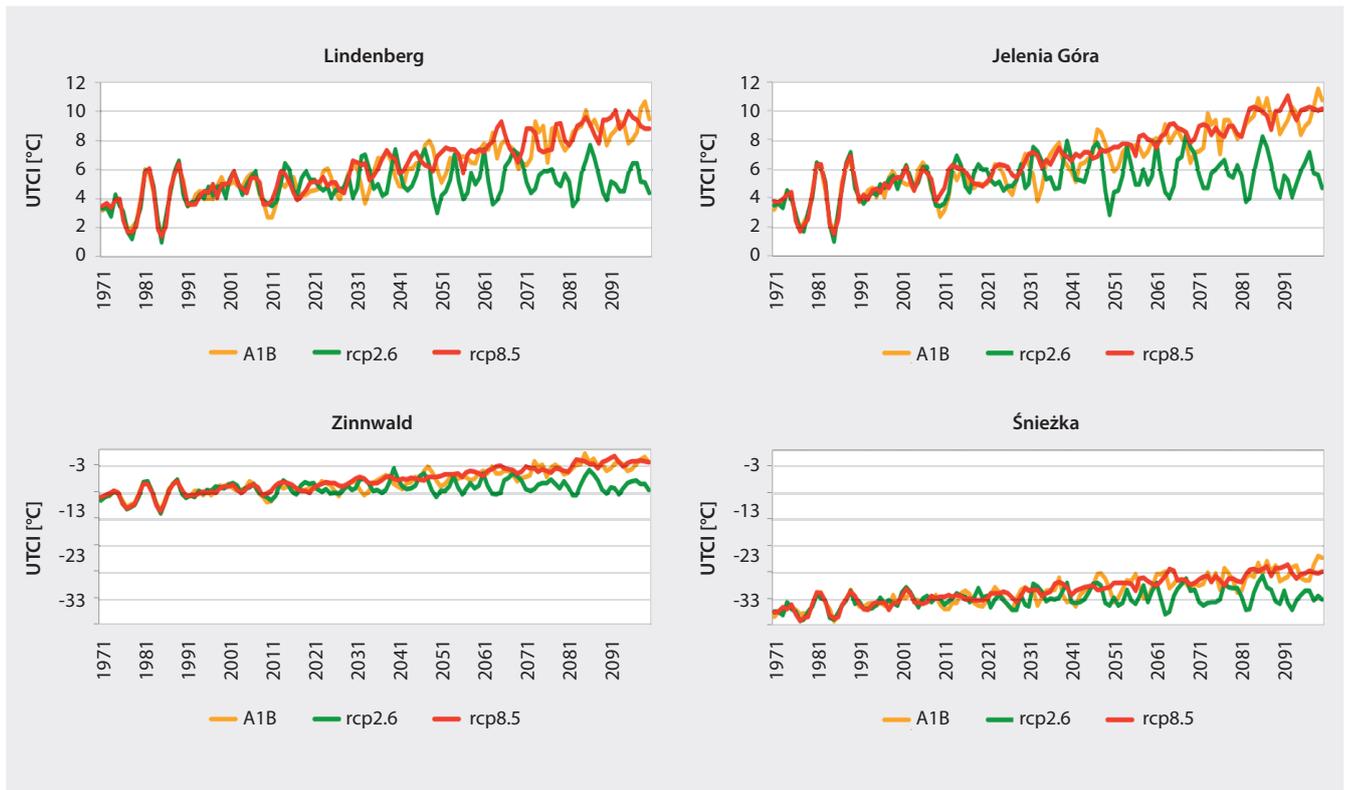


Abbildung 24
 UTCI-Werte an
 ausgewählten Klima-
 stationen im Zeitraum
 1971–2100
 (bitte unterschiedliche
 Skalierung beachten)

Die Grundlage für die Bewertung der zukünftigen bioklimatischen Bedingungen im polnisch-sächsischen Grenzraum bilden Klimaprojektionen für den Zeitraum 1971–2100. Neben täglichen Temperatur- und Niederschlagsdaten werden 12 UTC-Terminwerte der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte, von Dampfdruck, Bewölkung und Windgeschwindigkeit betrachtet. Des Weiteren werden Informationen über den Sonnenstand zur Bewertung der Strahlungsbedingungen berücksichtigt.

Auf Basis von verschiedenen biothermischen und Tourismusindikatoren können die bioklimatischen Bedingungen im Projektgebiet bewertet werden. Eine detaillierte Erläuterung aller ausgewählten Indizes ist in der Broschüre „Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum“ (MEHLER et al. 2014) dargestellt. Die thermischen Bedingungen werden mittels UTCI (Universaler thermischer Klimaindex) analysiert, welcher in zehn Klassen von „extremer Kältstress“ bis „extremer Hitzestress“ klassifiziert wird. Der Einfluss von klimatischen Bedingungen auf Tourismus und Klimatherapie kann auf Basis des WSI (Wettereignungsindex) und CTIS (Klima-Tourismus-Informationen-Schema) bewertet werden (BŁAŻEJCZYK 2004, MATZARAKIS 2007).

Die Darstellung der Ergebnisse des UTCI erfolgt anhand vier repräsentativer Stationen für das Tiefland (Lindenberg, 98 m) und Hügelland (Jelenia Góra, 342 m) sowie für die Bergstationen Zinnwald (877 m) und Śnieżka (1603 m). Der WSI wird anhand der beiden Stationen Görlitz und Śnieżka visualisiert, während die CTIS-Kalender für die Stationen Lindenberg und Śnieżka erstellt werden.

Biothermische Bedingungen

Die Ergebnisse des UTCI zeigen für den Zeitraum 1971–2100 einen zunehmenden Trend, wobei dieser in Abhängigkeit der verwendeten Klimaszenarien unterschiedlich stark ausfällt (Abbildung 24). Die höchsten Zunahmen werden unter den Szenarien A1B und RCP8.5 projiziert, während unter RCP 2.6 ab Mitte des 21. Jahrhunderts kein weiterer Anstieg modelliert wird.

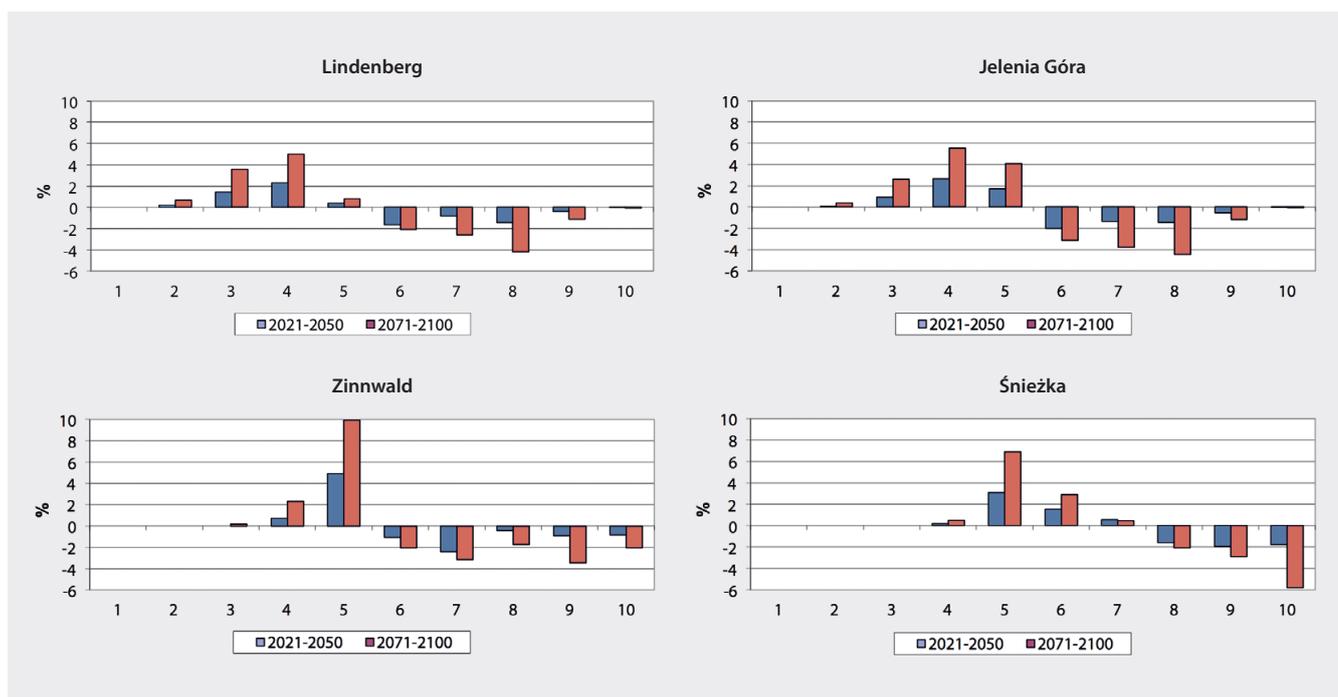
Abbildung 25

Änderung der Häufigkeit der thermischen Belastung im Zeitraum 2021 – 2050 und 2071 – 2100 gegenüber 1971 – 2000 unter A1B
 (1 = extremer Hitzestress, 2 = sehr starker Hitzestress, 3 = starker Hitzestress, 4 = moderater Hitzestress, 5 = thermische Behaglichkeit, 6 = leichter Kältestress, 7 = moderater Kältestress, 8 = starker Kältestress, 9 = sehr starker Kältestress, 10 = extremer Kältestress)

Die Änderungen der thermischen Belastung sind abhängig vom betrachteten Klimaszenario. Unter A1B wird vor allem zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Abnahme von Kältestress und gleichzeitig Zunahme von Hitzestress in den niederen Lagen (Lindenberg, Jelenia Góra) erwartet (Abbildung 25). Ebenso wird für die Mittelgebirgsregionen eine Abnahme von Kältestress zugunsten thermischer Behaglichkeit simuliert. An der Station Śnieżka zeigt sich besonders für die Klasse „extremer Kältestress“ zum Ende des Jahrhunderts eine deutliche Abnahme, woraus in den Klassen „leichter“ und „mäßiger Kältestress“ eine leichte Zunahme resultiert.

Unter RCP2.6 werden die gleichen Tendenzen hinsichtlich Zu- und Abnahme von Hitze und Kältestress projiziert wie unter A1B (Abbildung 26). Allerdings ist die Stärke des Signals wesentlich geringer ausgeprägt. Insgesamt wird eine Abnahme von Kältestress in der gesamten Projektregion und eine Zunahme „thermischer Behaglichkeit“ erwartet.

Die Änderung der Häufigkeit der thermischen Belastung unter dem Szenario RCP8.5 verhält sich hinsichtlich Richtung und Intensität des Trends nahezu identisch zu A1B (Abbildung 27). Am stärksten sind die Änderungssignale zum Ende des 21. Jahrhunderts ausgeprägt, für das der höchste Erwärmungstrend projiziert wird.



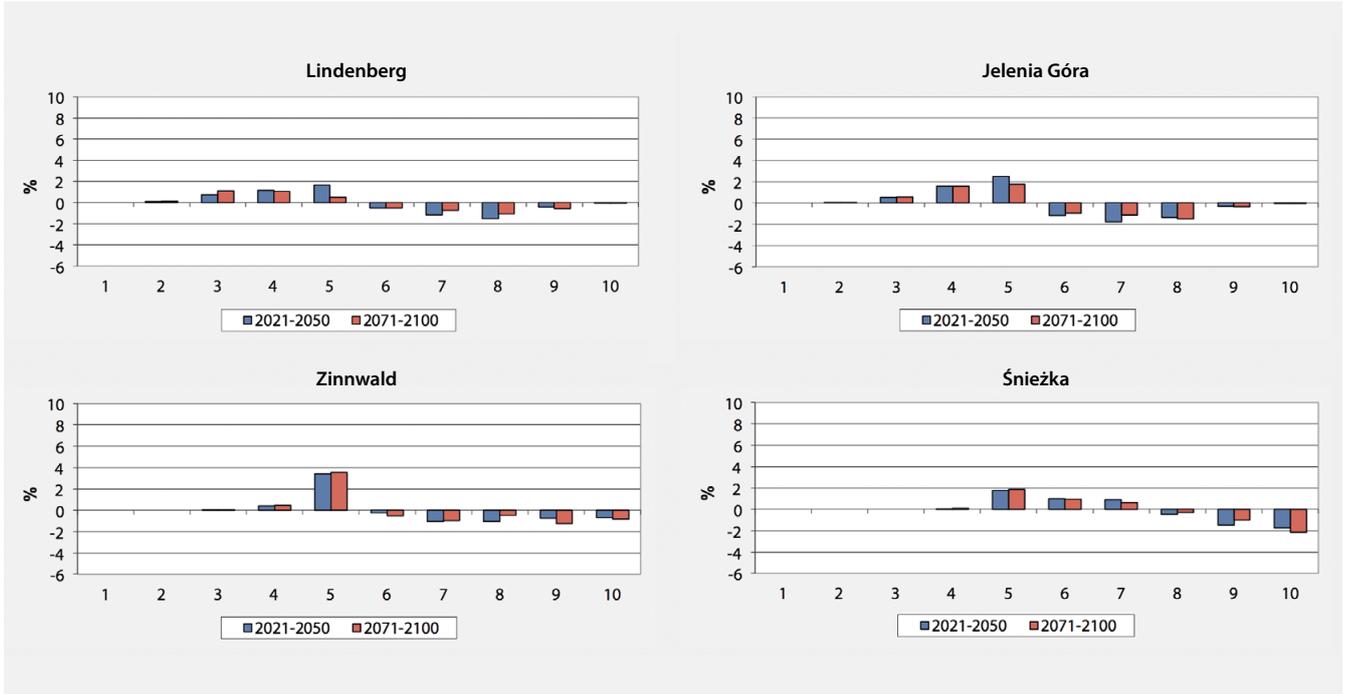
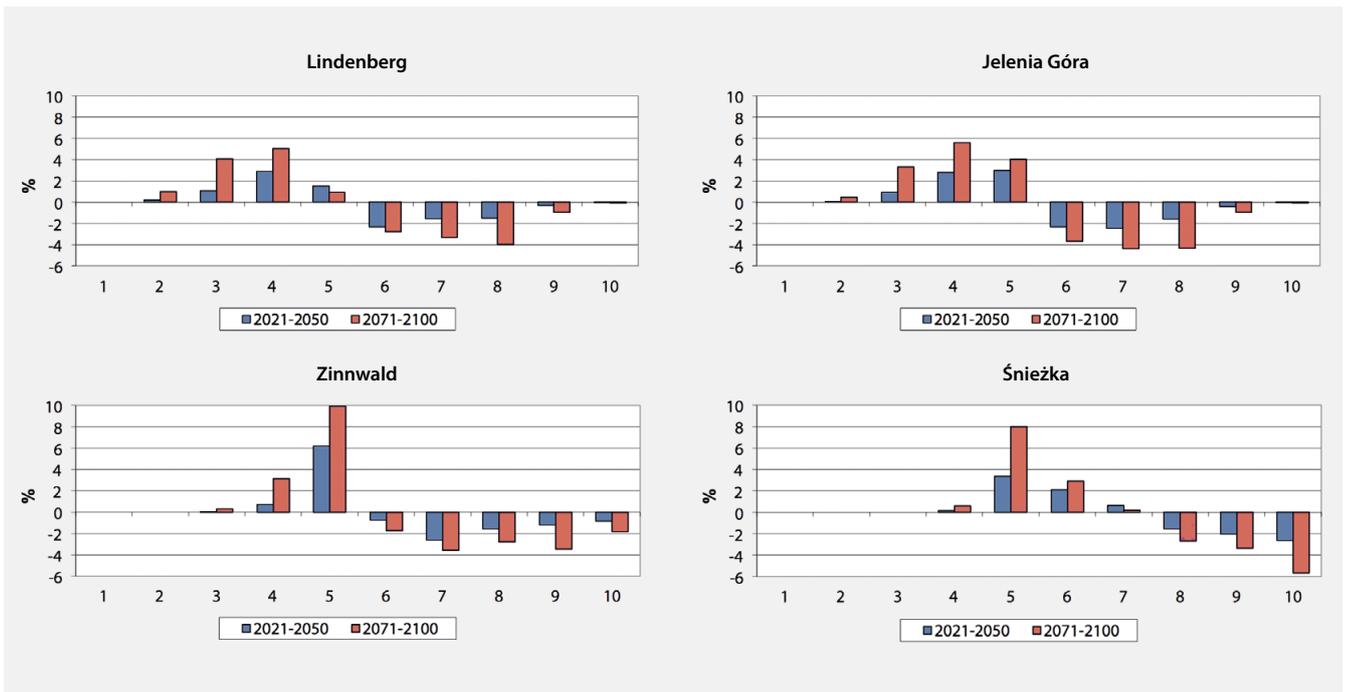


Abbildung 26
 Änderung der Häufigkeit der thermischen Belastung im Zeitraum 2021 – 2050 und 2071 – 2100 gegenüber 1971–2000 unter RCP2.6

Abbildung 27
 Änderung der Häufigkeit der thermischen Belastung im Zeitraum 2021 – 2050 und 2071 – 2100 gegenüber 1971 – 2000 unter RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)



Tourismusindizes

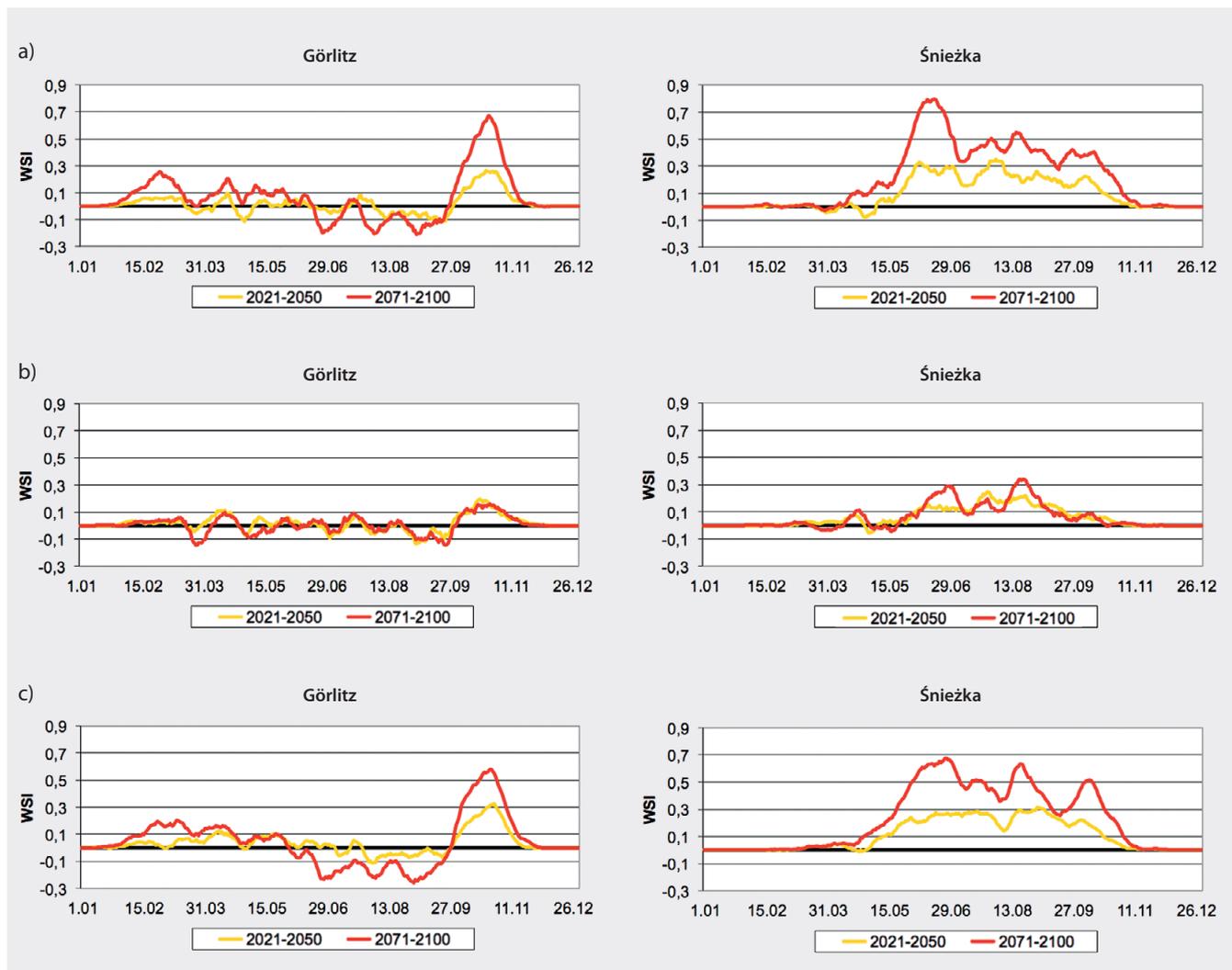
Im vorliegenden Bericht wurde ein besonderes Augenmerk auf die Bewertung der Eignung zukünftiger Wetterbedingungen für verschiedene Arten von Freizeitaktivitäten auf Basis des Wettereignungsindex (WSI) gelegt. Die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden erläutert und anhand ausgewählter Stationen visualisiert.

Sonnenbäder

Die wichtigsten Faktoren für Sonnenbäder sind die Strahlung, der Bedeckungsgrad, die Lufttemperatur sowie die Windgeschwindigkeit. Hinsichtlich der Eignung der Wetterbedingungen im Projektgebiet gibt es deutliche Unterschiede zwischen den niederen und höheren Lagen. Im Zeitraum 1971–2000 werden die besten Bedingungen für Sonnenbäder von Mai bis September simuliert.

Unter Berücksichtigung der ausgewählten Klimaszenarien werden vor allem für A1B und RCP8.5 deutliche Änderungen für die Zeiträume 2021–2050 und 2071–2100 modelliert, während für RCP2.6 konstante Bedingungen bestehen bleiben (Abbildung 28). Unter A1B wird an der Station Görlitz eine Verlängerung der Periode für Sonnenbäder und eine Verschiebung der günstigsten Bedingungen in die Monate September und Oktober (2071–2100) aufgrund von zunehmendem Hitzestress in den Sommermonaten erwartet. Ebenso nimmt der WSI im Frühjahr in Folge der erwarteten Erwärmung zu. In den höheren Lagen (Śnieżka) wird ebenfalls eine Zunahme der Dauer geeigneter Wetterbedingungen bis Ende September (2021–2050) bzw. Mitte Oktober (2071–2100) projiziert. Auch im Sommer kommt es zu einer deutlichen Zunahme geeigneter

Abbildung 28
Änderung des mittleren täglichen WSI für Sonnenbäder an den Stationen Görlitz und Śnieżka 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)



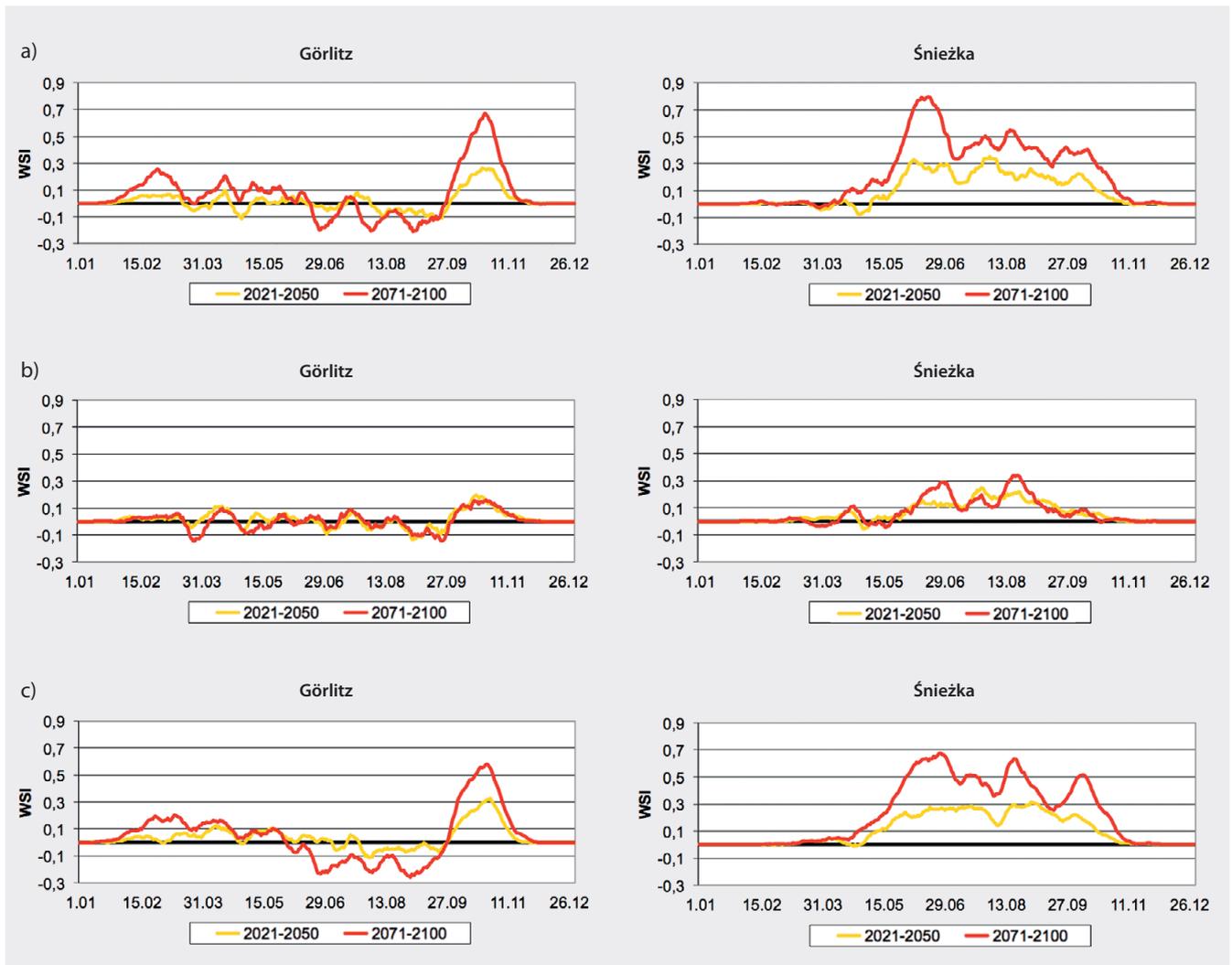


Abbildung 29
 Änderung des mittleren täglichen WSI für Luftbäder an den Stationen Görlitz und Śnieżka 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)

Bedingungen für Sonnenbäder aufgrund des projizierten Temperaturanstiegs. Unter RCP2.6 werden für Görlitz nur geringfügige Änderungen hin zu einer leichten Zunahme der Eignung der Wetterbedingungen für Sonnenbäder im Oktober modelliert. An der Station Śnieżka werden im Sommer günstigere Bedingungen erwartet, jedoch weniger stark ausgeprägt als unter A1B. Die Veränderung des WSI unter RCP8.5 entspricht denen unter A1B.

Luftbäder

Luftbäder beschreiben sämtliche Erholungsaktivitäten im Freien an vorwiegend schattigen Plätzen. Im Zeitraum 1971–2000 herrschen die geeignetsten Bedingungen für Luftbäder im Tiefland von Mai bis September.

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen für A1B und RCP8.5 zeigen eine Zunahme der Eignung der Wet-

terbedingungen in den Monaten März und Oktober bis Anfang November zum Ende des 21. Jahrhunderts (Abbildung 29). Im Sommer nimmt der WSI für Luftbäder in Folge des zunehmenden Hitzestresses ab. An der Station Śnieżka zeigt sich ein stark differenzierter Verlauf des WSI gegenüber der Station Görlitz. Gegenwärtig lassen sich in den Kammlagen nur im August, wenn geringere Niederschlagssummen und höhere Temperaturen vorherrschen, gute Bedingungen für Luftbäder beobachten. Unter den Klimaprojektionen A1B und RCP8.5 nimmt die Eignung vor allen in den Sommermonaten deutlich zu, wodurch sich die Dauer geeigneter Wetterbedingungen für Luftbäder im Bergland zukünftig um etwa einen Monat verlängern könnte.

Unter RCP2.6 werden ähnlich wie für Sonnenbäder keine relevanten Veränderungen im WSI projiziert. Lediglich in den Bergregionen findet eine leichte

Verschiebung der „mäßig geeigneten Bedingungen“ bis Mitte September statt.

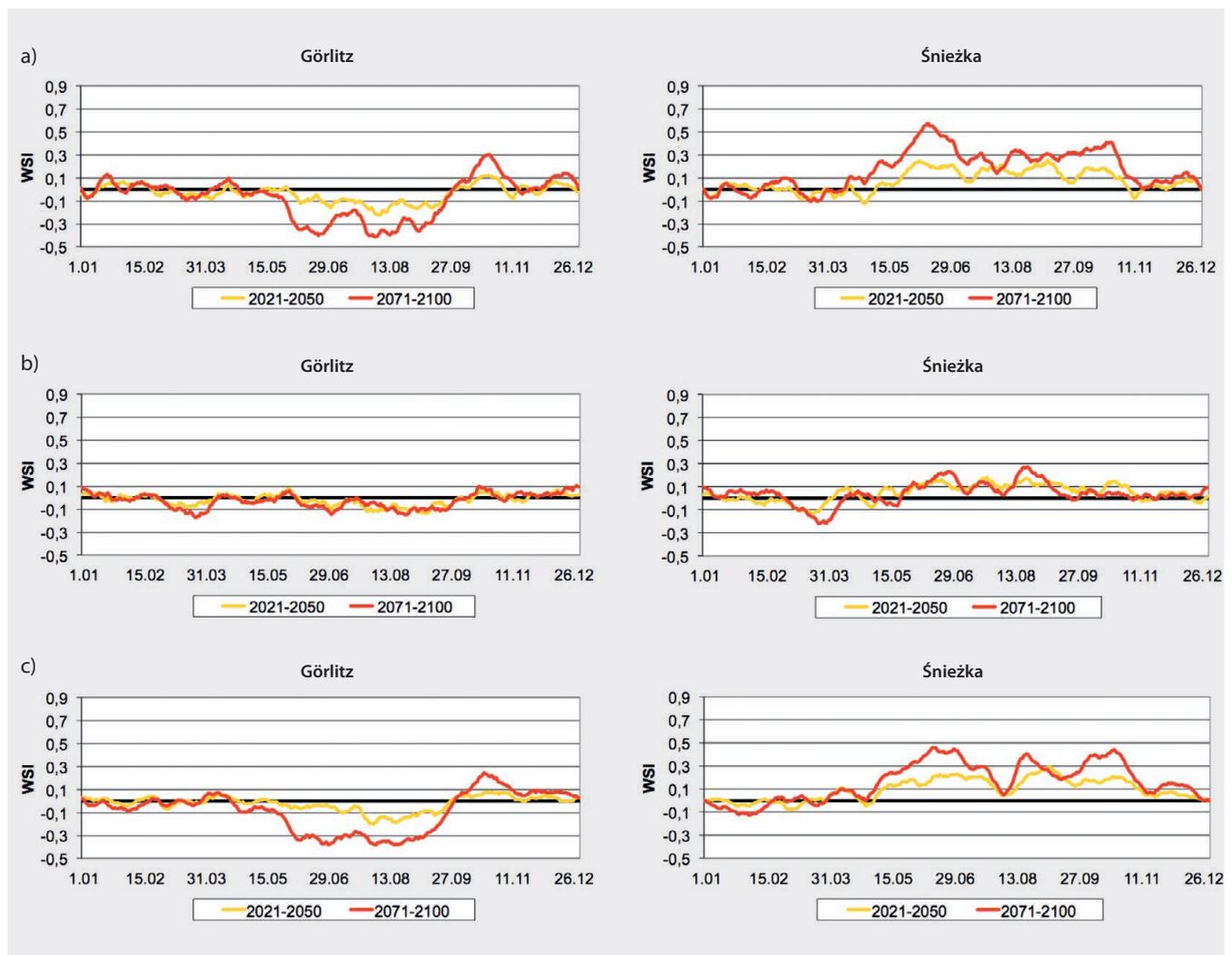
Leichte Freizeitaktivitäten

Die verschiedenen Arten von Freizeit- und Erholungsaktivitäten werden in Abhängigkeit der Stoffwechselrate in leichte und intensive Formen unterschieden. Zu den leichten Freizeitaktivitäten zählt beispielsweise das Spaziergehen.

Generell herrschen im Tiefland des Projektgebietes ganzjährig überwiegend geeignete Wetterbedingungen für leichte Freizeitaktivitäten. Die höchsten WSI Werte werden 1971–2000 ab Mitte April bis September beobachtet. Im Sommer ist der WSI aufgrund von hohen Temperaturen geringer, im Winter sind es niedrige Temperaturen, eine hohe Anzahl an Regentagen, hohe Windgeschwindigkeiten und zunehmende Bewölkung, die zu eingeschränkten Bedingungen für leichte Freizeitaktivitäten beitragen.

Basierend auf den Ergebnissen der Klimaprojektionen zeigt sich keine relevante Änderung des WSI für die kalte Jahreszeit in den Zeiträumen 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber der Referenzperiode 1971–2000 (Abbildung 30). Dagegen wird eine deutliche Abnahme des WSI im Sommer, mit Maximum im August, unter A1B und RCP8.5 projiziert. Zum Ende des 21. Jahrhunderts lassen sich die Wetterbedingungen gerade noch als „mäßig geeignet“ klassifizieren. Die Periode mit „sehr geeigneten Bedingungen“ verschiebt sich ähnlich wie für Sonnen- und Luftbäder von September in die zweite Hälfte des Monats Oktober. An der Station Śnieżka werden für die Referenzperiode 1971–2000 von Mai bis Ende September „geeignete Wetterbedingungen“ für leichte Freizeitaktivitäten modelliert, wobei die günstigsten klimatischen Bedingungen im August vorherrschen. Auch im Bergland nimmt der WSI unter Annahme der Klimaszenarien A1B und RCP8.5 vor allem in den Sommer- und Herbst-

Abbildung 30
Änderung des mittleren täglichen WSI für leichte Freizeitaktivitäten an den Stationen Görlitz und Śnieżka 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)



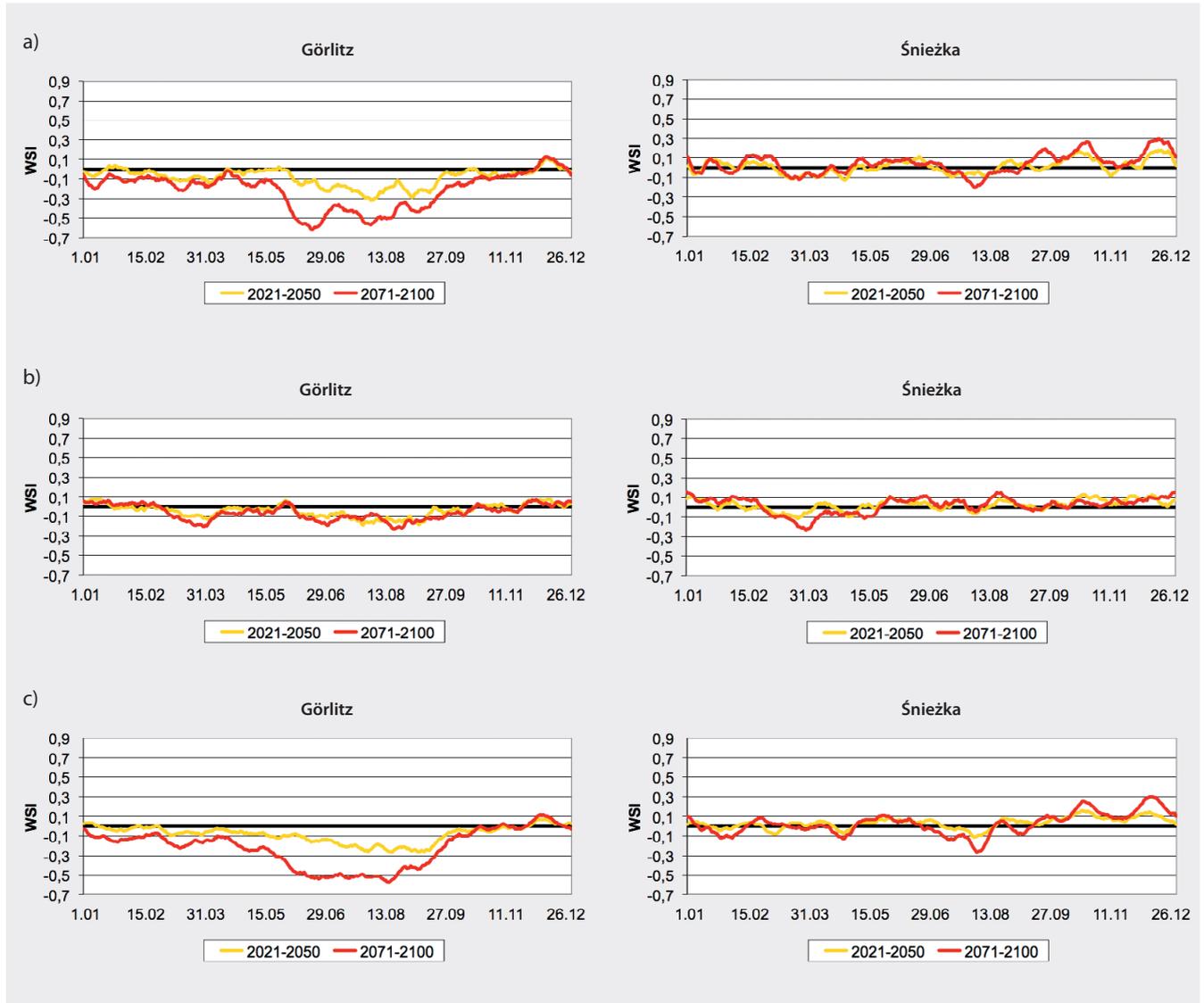


Abbildung 31
 Änderung des mittleren täglichen WSI für intensive Freizeitaktivitäten an den Stationen Görlitz und Śnieżka 2021–2050 und 2021–2100 gegenüber 1971–2000 unter a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5 (Mittel aus Lauf 1,2,3)

monaten zu. Bis 2100 verlängert sich die Periode für leichte Freizeitaktivitäten bis Mitte November. Unter RCP2.6 werden lediglich im Sommer leichte Zunahmen im WSI erwartet.

Intensive Freizeitaktivitäten

Zu den intensiven Freizeitaktivitäten zählen beispielsweise Joggen, Radfahren oder Wandern. Da diese Aktivitäten zu einer Steigerung der Stoffwechselrate führen, ist der Mensch weniger anfällig gegenüber Kältestress als im Vergleich zu leichten Aktivitäten. Im Sommer dagegen wirken sich hohe Temperaturen einschränkend auf die Ausübung intensiver Freizeitaktivitäten aus.

An der Station Görlitz herrschen im Referenzzeitraum 1971–2000 von Mitte September bis Ende Februar „sehr geeignete Bedingungen“ für diese Form der Freizeitgestaltung. Im August ist der WSI geringer, dennoch sind die Bedingungen für intensive Freizeitaktivitäten in diesem Zeitraum immer noch als „geeignet“ zu klassifizieren. Mit zunehmenden Temperaturen, wie sie vor allem unter den Szenarien A1B und RCP8.5 angenommen werden, nimmt der WSI im Sommer (August) deutlich ab (Abbildungen 31). Laut Klassifikation herrschen zum Ende des 21. Jahrhunderts von Anfang Juni bis Ende August nur noch „mäßig geeignete Bedingungen“ vor. Im Winter haben die zunehmenden Temperaturen keinen großen Einfluss auf den WSI.

An der Station Śnieżka zeigt sich ein differenziertes Bild. Im Referenzzeitraum 1971–2000 werden „sehr geeignete Bedingungen“ von Ende April bis Anfang Juni und von Ende August bis Mitte November beobachtet. In der übrigen Zeit des Jahres herrschen „geeignete Bedingungen“ für intensive Freizeitaktivitäten. Unter den verwendeten Klimaszenarien werden keine bedeutenden Veränderungen des WSI gegenüber 1971–2000 modelliert. Allerdings dehnt sich die Periode mit „sehr geeigneten Bedingungen“ unter A1B und RCP8.5 in den Februar aus, während im Sommer teilweise „mäßig geeignete Bedingungen“ zu erwarten sind. Unter RCP2.6 sind die Veränderungen gegenüber 1971–2000 vernachlässigbar.

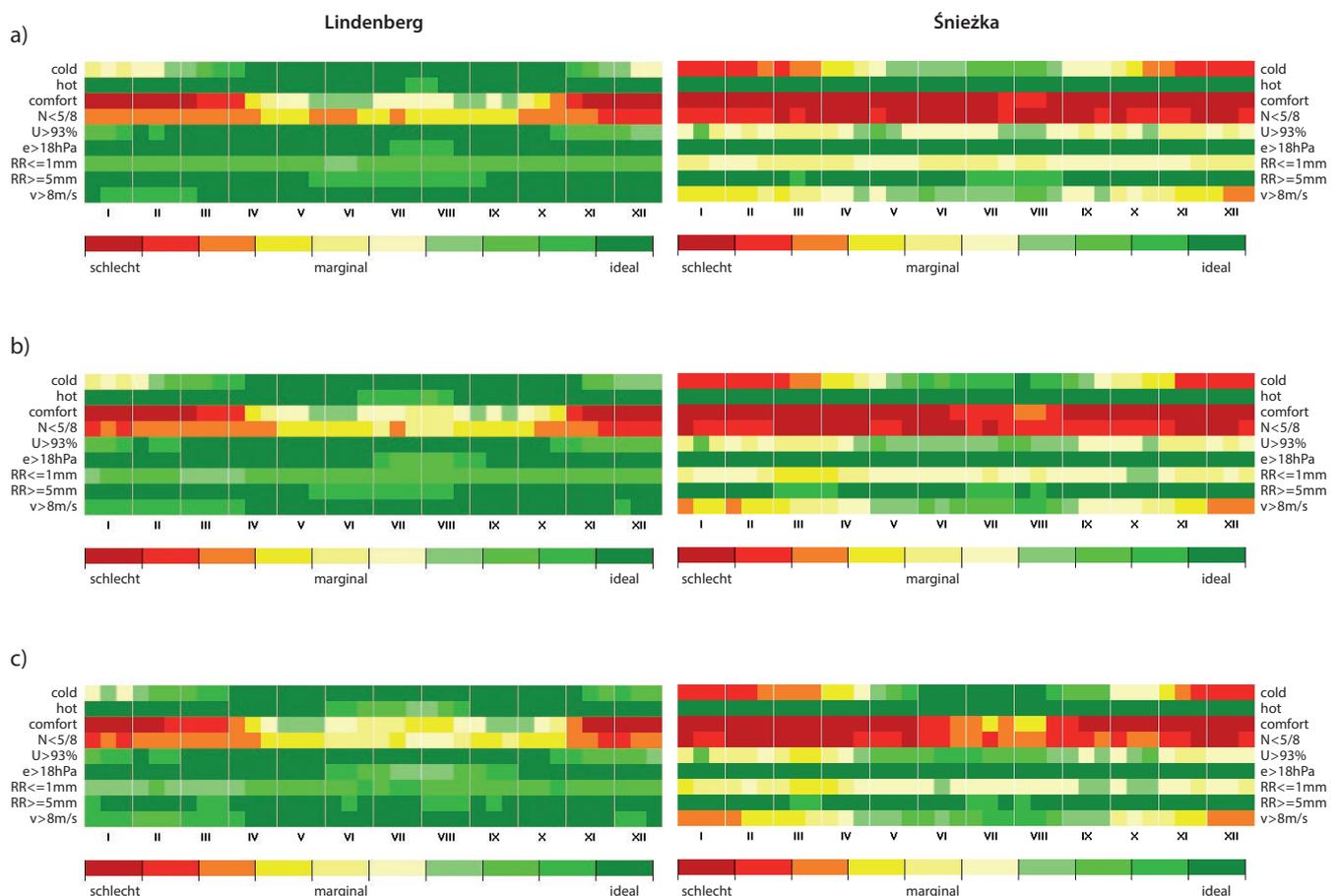
CTIS

Die CTIS-Kalender wurden exemplarisch für die Stationen Lindenberg im Tiefland und Śnieżka in den Kammlagen des Riesengebirges erstellt.

Unter A1B zeigen sich hinsichtlich Hitzestress (hot = PET > 35 °C) vor allem in den höheren Lagen zukünftig optimale Bedingungen (Abbildung 32). Dagegen ist im Tiefland zum Ende des 21. Jahrhunderts im Juli und August mit zunehmendem Hitzestress zu rechnen. Kältestress (cold = PET < 0 °C), welcher gegenwärtig (1971–2000) vor allem im Winter in den Berglagen auftritt, nimmt im Laufe des Jahrhunderts deutlich ab. Insgesamt wird projiziert, dass sich der Zeitraum, in dem komfortable thermische Bedingungen (comfort = 18 < PET < 29 °C) herrschen, sowohl in den höheren Lagen als auch im Tiefland leicht ausdehnt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass aufgrund des projizierten abnehmenden Bedeckungsgrades sonnige Tage (Bedeckung N < 5/8) in Zukunft häufiger auftreten. Im Sommer und Herbst liegt die modellierte Häufigkeit sonniger Tage im Zeitraum 2071–2100 für Śnieżka bei 30% und für Lindenberg bei 50%. Eine Abnahme der Tage mit Nebel (relative Feuchte U > 93%) im Sommer wird an der Station Śnieżka

Abbildung 32

CTIS für Lindenberg (links) und Śnieżka (rechts) in den Zeiträumen a) 1971–2000, b) 2021–2050 und c) 2071–2100 unter A1B



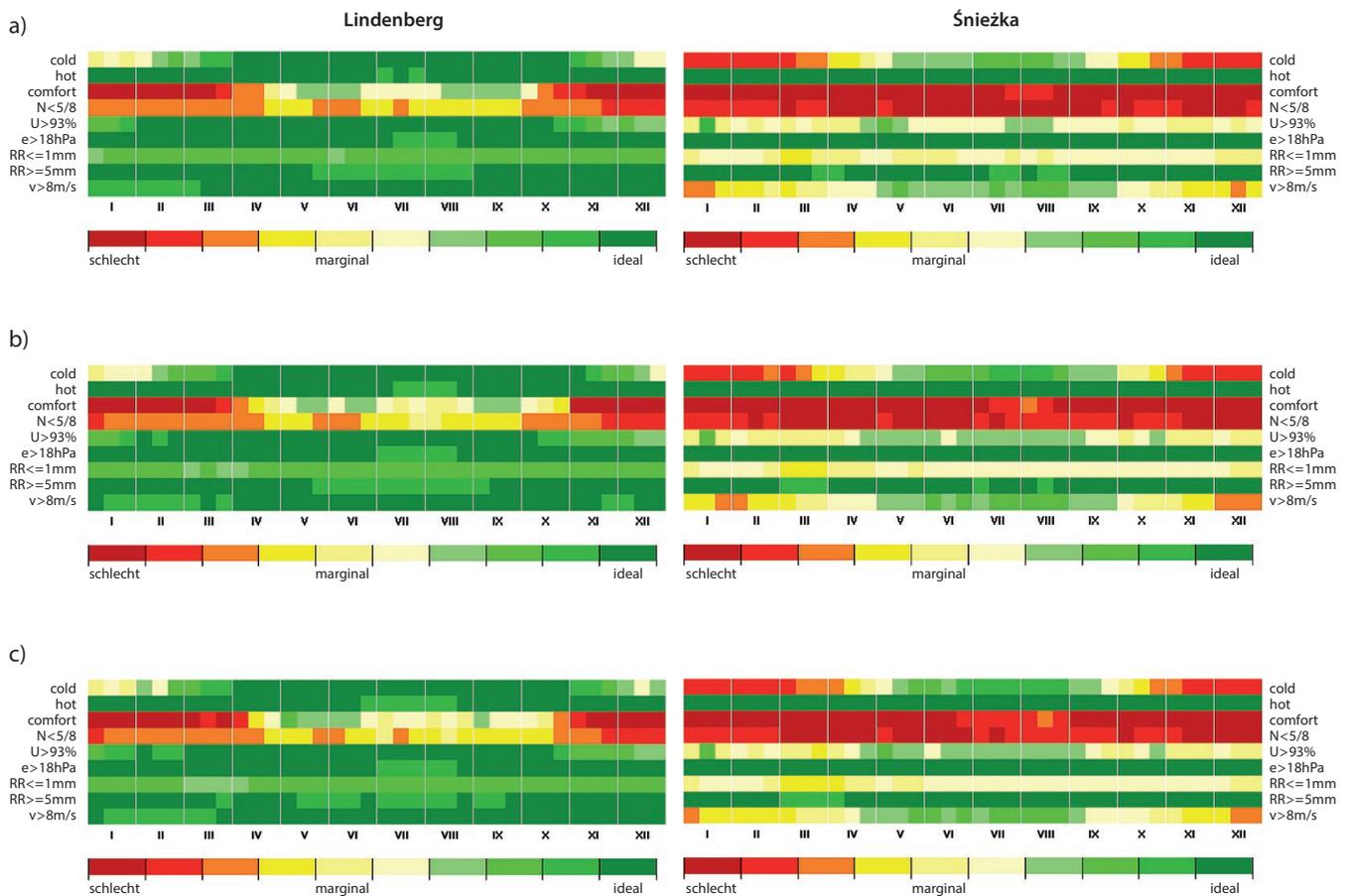


Abbildung 33
CTIS für Lindenberg (links)
und Śnieżka (rechts) in den
Zeiträumen a) 1971–2000,
b) 2021–2050 und c)
2071–2100 unter RCP2.6

zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert. Schwüle Tage (Dampfdruck $e > 18$ hPa), die im Projektgebiet lediglich im Tiefland auftreten, zeigen an der Station Lindenberg eine leichte Zunahme in den Sommermonaten. Für trockene Tage (Niederschlag $R \leq 1$ mm) wird an beiden Stationen eine leichte Abnahme zum Ende des Jahrhunderts modelliert. In den Bergregionen wird diese vor allen in den Monaten März/April und September/Oktober erwartet, während im Tiefland im Juli eine Zunahme der Tage ohne Regen modelliert wird. Hinsichtlich der Häufigkeit von Tagen mit Regen (Niederschlag $RR \geq 5$ mm) herrschen bereits gegenwärtig nahezu ideale Bedingungen. Zukünftig werden vor allem im Juni und Juli allerdings weniger Regentage zum Ende des Jahrhunderts modelliert. Neben optimalen Windbedingungen (geringer Anteil an Windgeschwindigkeit $v > 8$ m/s) an der Station Lindenberg wird für Śnieżka eine Zunahme von Starkwind im Winter modelliert. Im Sommer ist mit abnehmenden Windgeschwindigkeiten 2071–2100 gegenüber 1971–2000 zu rechnen.

Gleiche Trendrichtungen werden unter dem Klimaszenario RCP2.6 projiziert, wobei die Intensität der Zu- bzw. Abnahmen besonders an der Station Śnieżka geringer ausfällt (Abbildung 33).

Die in Abbildung 34 dargestellten CTIS-Ergebnisse unter dem Szenario RCP8.5 entsprechen denen unter A1B, wobei teilweise etwas stärkere Änderungssignale zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert werden.

Die dargestellten Veränderungen der bioklimatischen Bedingungen anhand CTIS verweisen auf die deutlichen Unterschiede zwischen Tiefland und den Bergregionen. Vor allem in den höheren Lagen werden zukünftig günstigere biothermische Bedingungen aufgrund des fehlenden Hitzestress erwartet, während Hitzestress im Tiefland touristische Aktivitäten zunehmend negativ beeinflussen könnte.

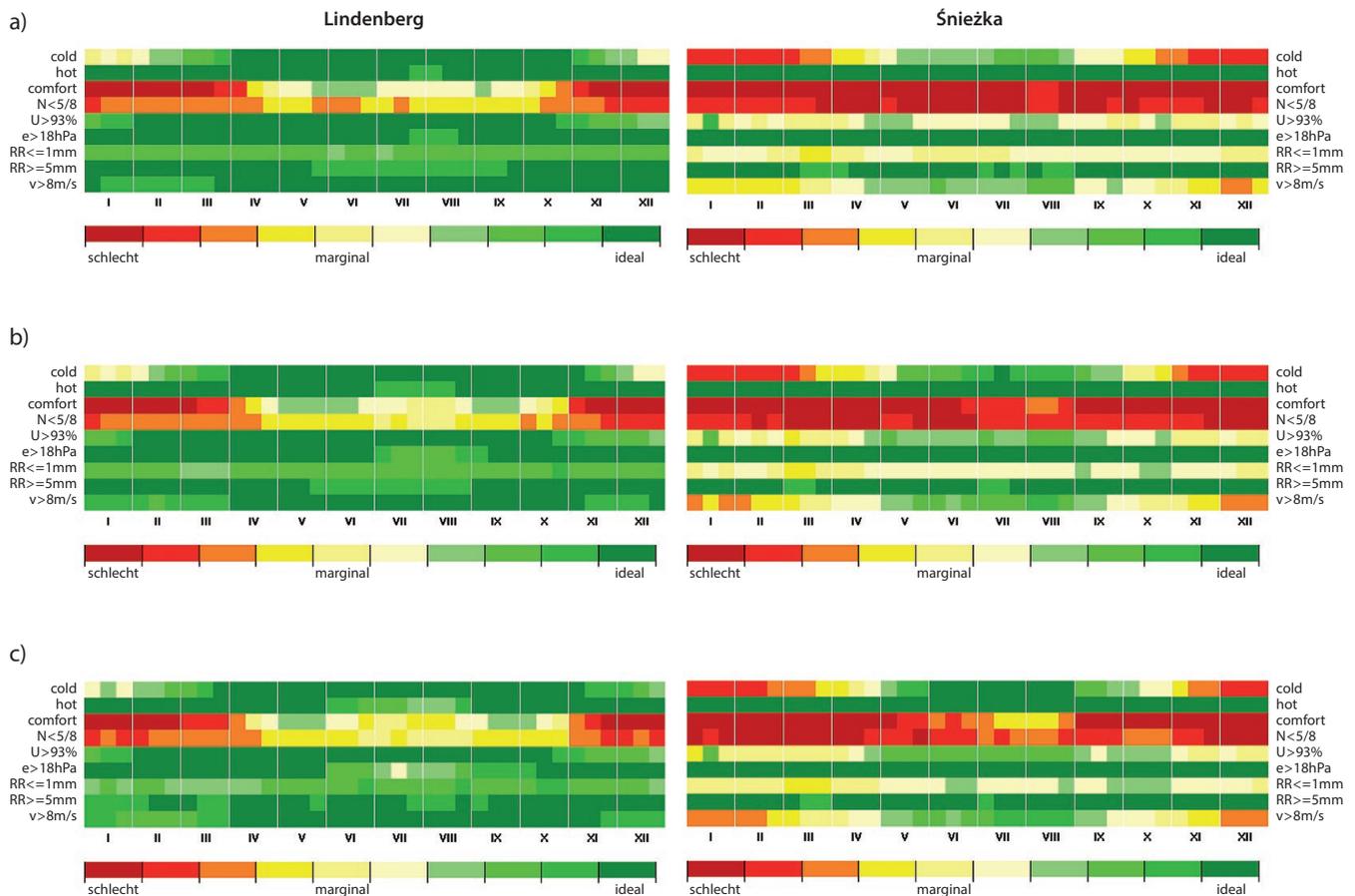


Abbildung 34
 CTIS für Lindenberg (links)
 und Śnieżka (rechts) in den
 Zeiträumen a) 1971–2000,
 b) 2021–2050 und c)
 2071–2100 unter RCP8.5
 (Mittel aus Lauf 1,2,3)

Zusammenfassung

Klimatische Entwicklung

Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen der Klimaprojektionen wird sich der bereits gegenwärtig beobachtete Erwärmungstrend im polnisch-sächsischen Grenzraum zukünftig weiter fortsetzen. Während die Bandbreite zwischen den betrachteten Szenarien zur Mitte des 21. Jahrhunderts gering ist, variiert der Temperaturanstieg zum Ende des 21. Jahrhunderts zwischen +1 und +4 °C gegenüber 1971–2000.

Jahreszeitlich betrachtet, konzentriert sich die Erwärmung auf Sommer, Herbst und Winter. Im Gegensatz zu den Beobachtungen wird im Frühjahr ein moderaterer Erwärmungstrend projiziert. Räumliche Analysen zeigen zudem einen leicht stärkeren Temperaturanstieg zum Ende des Jahrhunderts für die Berg- und Kammlagen gegenüber dem Tiefland.

Temperaturabgeleitete warme Kenntage wie Hitze- und Sommertage zeigen ebenfalls eine deutliche Zunahme der Häufigkeit. Im Tiefland werden beispielsweise jährlich 13 bis 23 Sommertage mehr projiziert. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verdoppelt sich sogar das Änderungssignal gegenüber 2021–2050 unter A1B und RCP8.5. Werden Maßnahmen zur Einhaltung des „2-Grad-Ziels“ erfolgreich umgesetzt, ist mit einem geringen Anstieg, wie unter RCP2.6 beschrieben, zu rechnen. Dem gegenüber wird für kalte Ereignistage eine deutliche Abnahme der Häufigkeit simuliert. In den Kammlagen werden im Zeitraum 2071–2100 17 bis 56 Frosttage weniger erwartet. Vor allem im Bereich des Wintersporttourismus kann diese Entwicklung weitreichende Folgen haben.

Agrarmeteorologische Entwicklung

Unter allen ausgewählten Klimaszenarien wird eine Zunahme der Wachstumsgradtage und der Summe der aktiven Temperaturen bis zum Ende des 21. Jahr-



hundreds modelliert. Die stärksten Änderungssignale werden unter dem Szenario A1B und RCP8.5 erwartet, während Zunahmen unter RCP2.6 moderater ausfallen. Auffällig sind die gegensätzlichen räumlichen Trends im Projektgebiet. Für die Summe der aktiven Temperaturen werden die größten Veränderungen im Bergland erwartet, für Wachstumsgradtage sind die Zunahmen im Tiefland höher. Im Zusammenhang mit veränderten agrarmeteorologischen Bedingungen wird gegenwärtig die Verkürzung des Winters zu Gunsten eines längeren Frühjahrs und Herbstes diskutiert (DEMIDOWICZ et al. 1999, EEA 2012, MICHALSKA 2011, KĘDZIORA 2008, ŻMUDZKA 2012). Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse des Hydrothermalen Koeffizienten nach Selyaninov, dass zukünftig mit zunehmend trockeneren Bedingungen im Jahresmittel bis hin zu Dürre, besonders zum Ende des 21. Jahrhunderts, zu rechnen ist.

Die dargestellten Veränderungen der agrarmeteorologischen Bedingungen können direkte und indirekte Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft im polnisch-sächsischen Grenzraum haben (NIERÓBCA 2009, ŻMUDZKA 2012):

- Einführung neuer Pflanzenarten und Erhöhung der Anzahl der Sorten
- Einführung von wärme- und trockenresistenten Sorten (z. B. Wein) oder Erhöhung der Anbauflächen für Pflanzenarten mit veränderten thermischen Anforderungen
- früherer Beginn der landwirtschaftlichen Prozesse (z. B. Aussaat, Ernte)
- Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten
- Rückgang von bestimmten Pflanzenarten aufgrund von Hitzestress oder Wasserdefizit während der Vegetationsperiode 1
- Zunahme thermophiler Unkräuter und Krankheiten
- Verschiebung der Waldbauregionen (zunehmend trockenere Bedingungen)
- Auftreten neuer Waldstrukturen
- Erhöhtes Waldbrandrisiko
- Windwurf
- Zunahme des Schädlingsbefalls (Borkenkäfer) und auftretende Krankheiten

Bioklimatische Entwicklung

Die Ergebnisse ausgewählter Indikatoren zur Bewertung der biothermischen Bedingungen und des Tourismuspotentials im Zeitraum 1971–2100 zeigen, dass sich die Bedingungen zukünftig deutlich verändern könnten. Dabei zeigt sich im KLAPS-Projektgebiet eine deutliche räumliche und zeitliche Variabilität. Wie bereits gegenwärtig feststellbar, werden auch zukünftig große Unterschiede der biothermischen und touristischen Bedingungen zwischen den niederen und höheren Lagen erwartet. Die größten Veränderungen und Auswirkungen auf touristische Aktivitäten werden unter den Klimaszenarien A1B und RCP8.5 für den Zeitraum 2071–2100 modelliert. Aufgrund steigender Temperaturen, häufigeren Sonnentagen und geringeren Windgeschwindigkeiten im Sommer wird eine Zunahme der Häufigkeit von Hitzestress in den Tieflandregionen angenommen. Demgegenüber kann der Erwärmungstrend zu geeigneteren Wetterbedingungen für verschiedene Freizeit- und touristische Aktivitäten im Sommer in der Mittelgebirgsregion führen. Die Häufigkeit von Kältestress nimmt im Winter deutlich ab, wodurch jedoch auch weitreichende negative Folgen für den Wintersporttourismus möglich sind. Es ist anzunehmen, dass durch zunehmende Temperaturen im Winter die Häufigkeit und Höhe der Schneebedeckung ebenfalls deutlich abnehmen wird. Investitionen zur Sicherung der Schneebedeckung oder die frühzeitige Entwicklung von alternativen Wintersportaktivitäten könnte dazu beitragen wirtschaftliche Einbußen zu kompensieren.

Im Gegensatz dazu werden unter RCP2.6 geringere Veränderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber 1971–2000 projiziert. Eine Einhaltung des „2-Grad-Ziels“, welches durch Umsetzung verschiedener Klimaziele (z. B. Emissionsminderung) erreicht werden kann, würde dazu beitragen, dass biothermische und touristische Aktivitäten vor allem im Tiefland im polnisch-sächsischen Grenzraum weniger stark negativ beeinträchtigt wären.



B

Modellierung der Luft- verschmutzung



Einleitung

Atmosphärische Ausbreitungsmodelle sind geeignete Werkzeuge, um den Zustand der Luftqualität einer Region beurteilen zu können. Sie werden sowohl in der Forschung als auch in der Umweltberatung eingesetzt. Die Modelle liefern grundlegende Informationen über den Zustand der Atmosphärenchemie, wie z. B. die Höhe der Konzentration der atmosphärischen Luftschadstoffe oder die Menge an atmosphärischen Schadstoffen, die den Ökosystemen zugeführt wird. Eine der wichtigsten Größen ist die atmosphärische Deposition, die als trockene Deposition oder mit dem Niederschlag als nasse Deposition abgelagert werden kann.

Um den Belastungszustand verschiedener Ökosysteme beurteilen zu können, werden zunächst räumliche Informationen über die Konzentration und Deposition von Luftschadstoffen benötigt. Im Rahmen des Projekts KLAPS stehen insbesondere Schwefel (S) und Stickstoffverbindungen (N) im Fokus der Analyse, da diese beträchtliche negative Auswirkungen auf die Umwelt haben können. So führen zum Beispiel hohe Depositionen von Schwefel und Stickstoff zu einer Versauerung der Ökosysteme und Waldsterben, wie es z. B. im Riesengebirge heute noch beobachtet werden kann (Abbildung 35).

Infolge intensiver Braunkohleverbrennung sowie chemischer Industrie in den 70er und 80er Jahren erhielt das Grenzgebiet zwischen Südsachsen, Niederschlesien und Nordböhmen zweifelhafte Berühmtheit und war lange Zeit unter dem Namen „Schwarzes Dreieck“ bekannt. Seit 1990 sind die Emissionen durch Kohleverbrennung deutlich zurückgegangen. Gründe hierfür sind die Zunahme eines ökologischen Bewusstseins, aber auch politische und wirtschaftliche Veränderungen in Mitteleuropa. Die größten Emissionsabnahmen wurden für Schwefel (–80%) beobachtet, der Rückgang von Stickstoffemissionen liegt bei etwa –40%.

Neben der Versauerung können hohe Depositionen von Stickstoff zu Eutrophierung und wesentlichen Veränderungen der Ökosysteme führen. Die wichtigsten Schadstoffe, die zur Stickstoffdeposition beitragen, sind Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH_3). Beide Schadstoffe werden in verschiedene Sekundärschadstoffe umgewandelt und können den Ökosystemen durch trockene oder nasse Deposition aus der Atmosphäre zugeführt werden. NO_x -Emissionen entstammen im Wesentlichen der Kraftstoffverbrennung, sowohl aus Industrie als

auch Haushalt und Verkehr. Für die Emission von Ammoniak (NH_3) bildet die Landwirtschaft die Hauptquelle. Während in den letzten Jahrzehnten Abnahmen der NO_x -Emissionen beobachtet werden konnten, liegen die NH_3 -Emissionen seit Jahren auf einem unverändert hohem Niveau und bilden damit die wichtigste Ursache für Eutrophierung in verschiedenen Regionen Europas, wie auch Untersuchungen in Großbritannien und in den Niederlanden zeigen (ASMAN et al. 1998, FLETCHARD et al. 2011).



Abbildung 35
Waldsterben infolge von
Versauerung im Riesengebirge (Bild: MAREK BLAS,
2.10.2013)

Hauptziel der Modellierung der Luftverschmutzung ist es, die räumliche und zeitliche Entwicklung von Schwefel- und Stickstoffdepositionen im polnisch-sächsischen Grenzraum aufzuzeigen. Für die Modellierung wurde das Ausbreitungsmodell *Fine Resolution Atmospheric Multi-pollutant Exchange*, kurz FRAME verwendet. Das Modell ist so konfiguriert, dass Informationen über vergangene, aktuelle und zukünftige Depositionen von Schwefel- und Stickstoffverbindungen in einer hohen räumlichen Auflösung von 1×1 km modelliert werden können. Die Ergebnisse aus FRAME wurden darüber hinaus weiter genutzt, um die Überschreitungen der ökologischen Belastungsgrenzen (Critical Load) für Versauerung und Eutrophierung im Projektgebiet zu berechnen (vgl. Teil C).

Datengrundlage und Methode

Das FRAME-Modell

Das regionale atmosphärische Ausbreitungsmodell FRAME liefert Informationen über die mittlere jährliche Konzentration und Deposition von oxidiertem Schwefel sowie oxidiertem und reduziertem Stickstoff. Eine detaillierte Beschreibung des FRAME-Modells ist in SINGLES et al. (1998), FOURNIER et al. (2004) und DORE et al. (2006) dargestellt. Details zur Modellkonfiguration für das Gebiet Polens werden in KRYZA et al. (2010, 2012) näher erläutert.

Ein wesentlicher Vorteil des FRAME-Modells gegenüber anderen Ausbreitungsmodellen ist die hohe räumliche (1 x 1 km) und vertikale Auflösung, die gute Übereinstimmung der Ergebnisse für Schwefel- und Stickstoffkonzentrationen und Depositionen mit Beobachtungsdaten sowie der geringe Rechen- und Zeitaufwand bei der Modellierung. Als sogenanntes Lagrange-Modell berechnet FRAME die Schadstoffausbreitung über geradlinige Trajektorien (Bahnen) einer Vielzahl von Teilchen in einem dreidimensionalen Windfeld. Das Modell besteht aus 33 vertikalen Schichten unterschiedlicher Dicke, die sich im Bereich zwischen 1 m über der Erdoberfläche und 100 m über der höchsten Erhebung (Schneekoppe, 1603 m) im Projektgebiet erstrecken. Die Trajektorien starten bei unterschiedlichen Ausgangswinkeln mit 1° Auflösung in Abhängigkeit einer Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsrose für das Projektgebiet³. Die chemischen Randbedingungen in FRAME entsprechen denen im Lagrange-Modell EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme, BARRET & SELAND 1995). Dabei werden Reaktionen von oxidiertem Schwefel und oxidiertem Stickstoff in der flüssigen als auch in der gasförmigen Phase sowie die Umwandlung von Ammoniak zu Ammoniumsulfat- und Ammoniumnitrat-aerosolen berücksichtigt.

Die trockene Deposition wird in Abhängigkeit der vegetationsbedingten Depositionsgeschwindigkeit (V_d) für jeden Schadstoff einzeln bestimmt. Für die Berechnung der nassen Deposition wird ein sogenannter Auswaschkoeffizient λ_i und der Drizzle-Effekt (Nieselregen) berücksichtigt, welche

³ Die vertikale Diffusion von gasförmigen und festen Stoffen wird mittels K-Theorie der Eddy Diffusion beschrieben und über das Finite-Volumen-Verfahren gelöst. Die vertikale Leitfähigkeit (K_z) hat einen linear ansteigenden Wert bis zu einer bestimmten Höhe (H_z) und bleibt anschließend konstant (K_{max}) bis an den oberen Rand der Grenzschicht. Tagsüber wird für H_z 200 m angenommen und K_{max} wird als eine Funktion der Grenzschicht und in Abhängigkeit des geostrophischen Windes bestimmt. Nachts hängen beide Faktoren von den Stabilitätsklassen nach PASQUILL ab.

aus mittleren jährlichen Niederschlagsmengen abgeleitet werden. Die auf der Erdoberfläche abgelagerte nasse Deposition ergibt sich damit aus der Summe aller Stoffe der Atmosphäre, die mit dem Niederschlag ausgewaschen werden. Da in FRAME nicht zwischen Prozessen in bzw. unterhalb der Wolke unterschieden wird, wird ein mittlerer Wert für das Auswaschungsverhältnis (Δ_i) angenommen. Um den Auswaschkoeffizienten λ_i bestimmen zu können, wird Δ_i mit der Niederschlagsmenge und der Tiefe der Austauschschicht ΔH_{mix} kombiniert. DORE et al. (1992) nehmen an, dass die Auswaschrates in orographisch geprägtem Gelände aufgrund des sogenannten „Seeder-Feeder-Effekts“ (Niederschlagsverstärkung in Folge von zwei unterschiedlichen Wolkenschichten) bis zu doppelt so hoch sein kann, als über ebenem Gelände.

Die Aerosol-Konzentrationen an der Grenze des Modellgebiets wurden mit einem auf Europa angepassten Modell, dem sogenannten FRAME-Europa berechnet, welches das EMEP Raster mit 50 km x 50 km Auflösung nutzt. Die für die KLAPS-Region verwendete FRAME-Modellversion 9.9 hat dagegen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine Ausdehnung von 215 x 210 Gitterpunkten, was einer Gesamtanzahl von 45.150 Gitterpunkten entspricht. Für FRAME wurde das UTM-Koordinatensystem, Zone 33 sowie die CORINE Land Cover 2006 Datenbank mit einer räumlichen Auflösung von 250 m x 250 m verwendet. Durch die Verwendung von CORINE Land Cover 2006 konnte gewährleistet werden, dass das gesamte Projektgebiet durch eine einheitliche Landnutzung abgedeckt wird. Das Modellgebiet mit den verwendeten Landnutzungs-klassen ist in **Abbildung 36** dargestellt.

Die Ergebnisse aller gerechneten Modellläufe werden in den nächsten Abschnitten dargestellt. Für das Bezugsjahr 2010 wurden die relevanten Emissions- und Klimadaten ebenfalls in das Modellgitter überführt und eine Modellvalidierung basierend auf Beobachtungsdaten und weiteren Daten (EMEP, IMGW-PIB) durchgeführt.

Datengrundlage

Emissionsdaten

Die Schaffung einer homogenen Datenbasis ist eines der Hauptschwierigkeiten grenzüberschreitender Projekte. Neben den Klimadaten wurde im Rahmen des KLAPS-Projekts auch eine gemeinsame Datenbank aus deutschen, polnischen und tschechischen Emissionsdaten erstellt. Die verwendeten Emissionsdaten stammen zum einen aus dem Emissionskataster Sachsens und Brandenburgs und wurden zum anderen für Polen nach einem so-

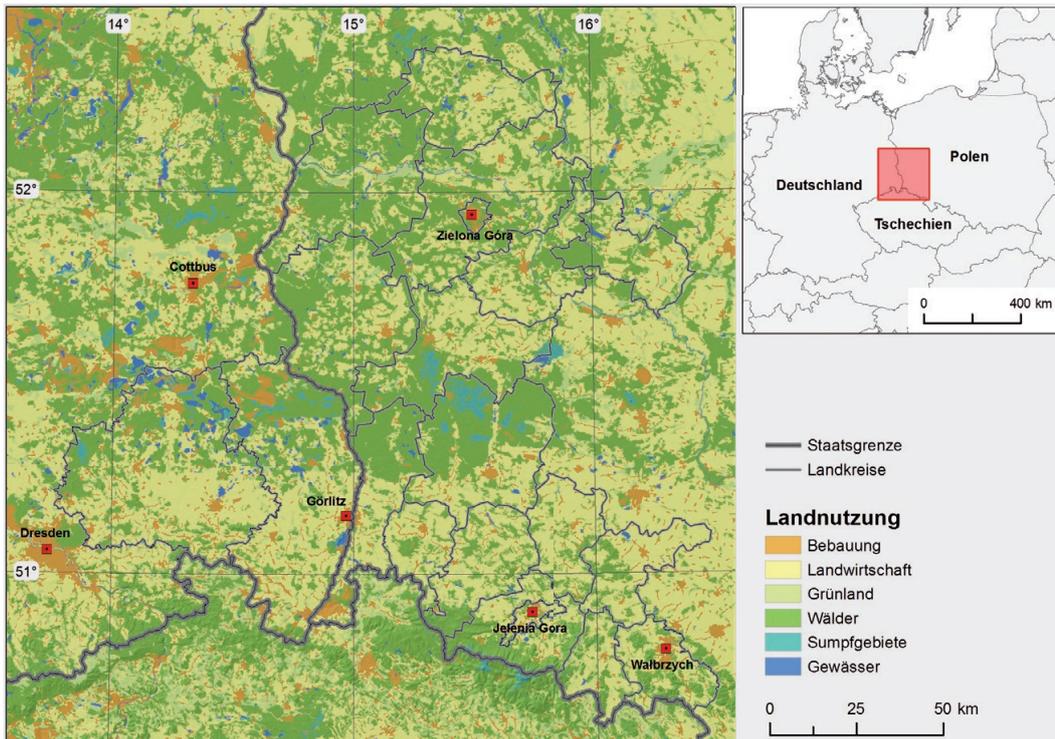


Abbildung 36
FRAME-Modellgebiet
und verwendete
Landnutzungsklassen
(CORINE 2006)

nannten Top-Down-Ansatz von KRYZA et al. (2010) berechnet. Daraus resultierende Inhomogenitäten der Eingangsdaten haben einen sichtbaren Einfluss auf die vorgestellten Ergebnisse und müssen daher kritisch betrachtet werden.

Zur Klassifizierung der Daten wurden die sogenannten SNAP-Klassen (**S**tandardized **N**omenclature for **A**ir **P**ollutants) verwendet (EEA 2013). Alle Emissionsdaten liegen mit 1 x 1 km Auflösung für die SNAP-Klassen 2 (Hausbrand), 7 (Straßenverkehr), 8 (sonstiger Verkehr) und 10 (Landwirtschaft) als Flächendaten vor. Für alle verbleibenden SNAP-Klassen wurden die Emissionsdaten als punktuelle Daten in FRAME berücksichtigt. Im Fall von Brandenburg wurden lediglich punktuelle Daten einbezogen. Für die Mehrheit der Punktquellen standen zusätzlich Informationen über Schornsteinhöhe und -durchmesser sowie die Temperatur und Geschwindigkeit der ausströmenden Gase zur Verfügung. Darüber hinaus konnten mit der in FRAME integrierten Abgasfahnenüberhöhung alle Punktquellen gesondert berücksichtigt werden.

Nach dem bereits erwähnten Ansatz von KRYZA et al. (2010) wurden die amtlichen Emissionsdaten Polens verwendet, um mittels vorhandener Proxy-Daten in kleinere Verwaltungseinheiten unterteilt zu wer-

den. In **Tabelle 11** erfolgt eine Auflistung des Emissionsinventars für Polen sowie der prozentuale Anteil der in FRAME eingehenden Emissionen je SNAP-Kategorie im KLAPS-Projektgebiet.

Die verwendeten Proxy-Daten sind von den genannten SNAP-Klassen abhängig. Im Fall von Hausbrand (SNAP 2) wurden zum Beispiel Daten über den Kohleverbrauch der Gemeinden, die Fläche der bewohnten Häuser, die Bevölkerungsdichte sowie Landnutzungsdaten zur Ableitung der Emissionen verwendet. Für den Straßenverkehr (SNAP 7) konnten Informationen zur Verkehrsdichte auf den Hauptverkehrsstraßen und für die Landwirtschaft (SNAP 10) die Anzahl der Tiere, der Düngemittelverbrauch sowie die Landnutzung herangezogen werden. Basierend auf diesem vereinfachten Ansatz war es möglich, Emissionsdaten für Polen mit einer relativ hohen räumlichen Auflösung abzuleiten. Dabei entspricht die abgeleitete Emissionsmenge der amtlich gemeldeten Gesamtemission im Projektgebiet. Die auf dieser Grundlage für ganz Polen berechneten Daten zeigen außerdem eine gute Übereinstimmung mit den tatsächlich gemessenen Daten an den vorhandenen Messstationen.

Für Sachsen und Brandenburg werden gemeldete Emissionen von Punkt- (anlagenbezogene Emis-

Tabelle 11

Übersicht der Emissionen [Gg*] für Polen (KOBIZE 2012) und Anteil [%] der in FRAME eingehenden Emissionen je SNAP-Kategorie im KLAPS-Projektgebiet (*Gg = 1.000 t)

SNAP	SO ₂			NO _x			NH ₃		
	Gg	% total	% FRAME	Gg	% total	% FRAME	Gg	% total	% FRAME
01 Feuerungen in Energie- und Transformationsindustrien	509,9	52,4	86	287,3	33,1	86	-	-	-
02 Nichtindustrielle Feuerungsanlagen	269,0	27,6	100	100,3	11,6	100	0,5	0,2	100
03 Feuerungen in der verarbeitenden Industrie	188,5	19,4	86	97,1	11,2	86	-	-	-
04 Produktionsprozesse	4,3	0,4	86	6,9	0,8	86	0,9	0,3	0
05 Verteilung fossiler Brennstoffe/geothermischer Energie	-	-	-	-	-	-	-	-	-
06 Verwendung von Lösemitteln und anderen Produkten	-	-	-	-	-	-	0,0	0,0	0
07 Straßenverkehr	1,3	0,1	100	272,7	31,5	100	0,8	0,3	100
08 Andere mobile Quellen und Maschinen	0,6	0,1	100	100,3	11,6	63	0,0	0,0	0
09 Abfallbehandlung und -beseitigung	0,07	0,0	0	2,1	0,2	0	3,2	1,2	0
10 Landwirtschaft	-	-	-	-	-	-	265,5	98,0	100
11 Andere Quellen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Summe	973,67	100		866,7	100		270,9	100	

Tabelle 12

Übersicht der Emissionen [Gg*] für Sachsen im Jahr 2010 und Anteil [%] der in FRAME eingehenden Emissionen je SNAP-Kategorie im KLAPS-Projektgebiet (*Gg = 1.000 t)

SNAP	SO ₂			NO _x			NH ₃		
	Gg	% total	% FRAME	Gg	% total	% FRAME	Gg	% total	% FRAME
01 Feuerungen in Energie- und Transformationsindustrien	9,50	79,4	100	11,18	35,4	100	0,00	0,0	100
02 Nichtindustrielle Feuerungsanlagen	1,49	12,4	100	2,58	8,2	100	-	-	0
03 Feuerungen in der verarbeitenden Industrie	0,25	2,1	100	0,26	0,8	100	-	-	0
04 Produktionsprozesse	0,43	3,6	100	0,93	3,0	100	0,00	0,0	100
05 Verteilung fossiler Brennstoffe/geothermischer Energie	-	-	0	-	-	0	-	-	0
06 Verwendung von Lösemitteln und anderen Produkten	0,03	0,2	100	0,09	0,3	100	0,00	0,0	100
07 Straßenverkehr	0,02	0,2	100	13,51	42,7	100	-	-	0
08 Andere mobile Quellen und Maschinen	0,05	0,4	100	2,76	8,7	100	-	-	0,00
09 Abfallbehandlung und -beseitigung	0,01	0,1	100	0,20	0,6	100	0,00	0,0	100
10 Landwirtschaft	0,19	1,6	100	0,11	0,4	100	7,05	99,9	100
11 Andere Quellen	-	-	0	-	-	0	-	-	0
Summe	11,96	100,0		31,62	100,0		7,06	100,0	

sionen) und Linienquellen (SNAP 7) als auch nach einem top-down-Ansatz abgeleitete Emissionen verwendet. Ähnlich wie in Polen werden Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen (SNAP 2) mittels Informationen zum Energieverbrauch, Wohnbebauung und Landnutzung abgeschätzt. Landwirt-

schaftliche Emissionen (SNAP 10) werden über die Tierhaltung, den Pflanzenbau und die Landnutzung bestimmt. Die für den sächsischen Teil des Projektgebiets eingehenden Emissionen und deren Anteil in FRAME sind in [Tabelle 12](#) dargestellt.



Für alle übrigen Regionen Deutschlands und Tschechiens, für die keine Emissionsdaten bezogen werden konnten, wurden TNO-Daten mit einer Auflösung von $1/16 \times 1/8^\circ$ verwendet (KUEENEN et al. 2011). Aufgrund der relativ groben räumlichen Auflösung

der TNO-Daten und der Tatsache, dass diese Informationen nur als Hintergrundinformationen in die Modellierung eingehen, wurden diese Regionen, wie in **Abbildung 37**, in den Ergebniskarten nicht dargestellt (graue Flächen).

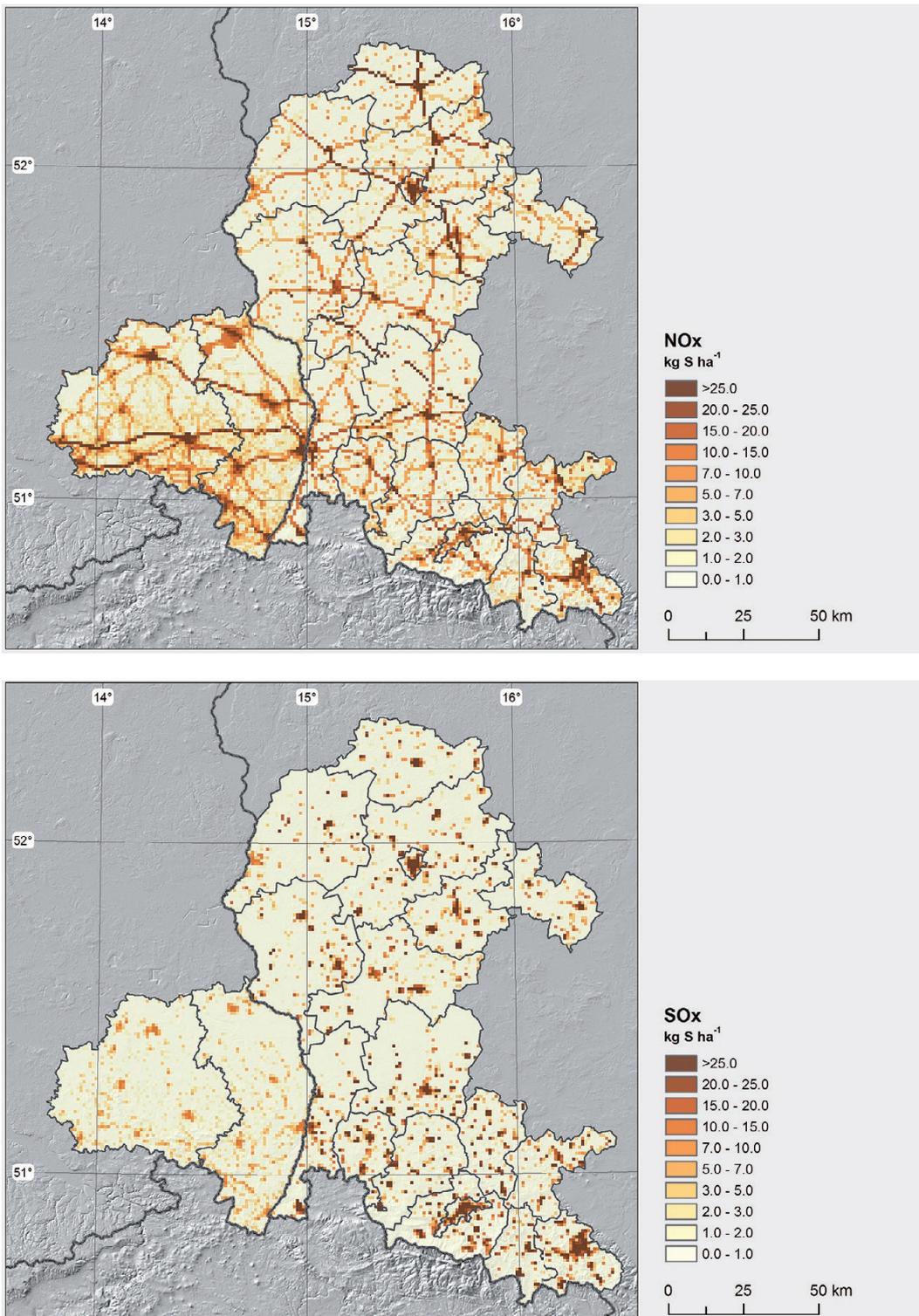


Abbildung 37
Mittlere jährliche NO_x- und SO_x-Emissionen im KLAPS-Projektgebiet im Jahr 2010 (maskiertes Teilgebiet)

Tabelle 13

Gesamtmenge der SO₂-, NO_x- und NH₃-Emissionen im KLAPS-Projektgebiet im Jahr 2010 [Gg]

	SO ₂ - S	NO _x - N	NH ₃ - N
Deutschland	22.83	50.89	12.26
Polen	28.09	13.19	13.45
Tschechische Republik	46.69	26.27	3.64
Gesamtmenge	97.61	90.34	29.35

Die dargestellten Emissionen von NO_x und SO_x repräsentieren die Summe der Emissionen aus den verwendeten SNAP-Klassen Hausbrand, Verkehr und Landwirtschaft für das gesamte Projektgebiet. Für die übrigen Klassen wurden Punktdaten verwendet. Die vor allem im Grenzraum auffallenden Inkonsistenzen lassen sich auf zwei Hauptfaktoren zurückzuführen. Zunächst gibt es einige regionale Unterschiede, was die Emissionsquellen betrifft. So beträgt beispielsweise der prozentuale Anteil der Schwefelemissionen aus dem Hausbrand in Polen (Kohleverbrennung) mehr als 52 % der gesamten nationalen Schwefelemissionen, während es in Deutschland nur 15 % sind (KOBIZE 2012). Der zweite Grund besteht in den oben beschriebenen Unterschieden der Eingangsdaten, welche zu regionalen Differenzen der Modellergebnisse beitragen. Für die Berechnung jedes Modellauflaufs in FRAME wurden Angaben zu den Emissionen von Schwefel- und Stickoxiden sowie Ammoniak benötigt. Die für das Jahr 2010 angenommenen Emissionen werden in [Tabelle 13](#) zusammengefasst dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass der Hauptanteil der Schwefelemissionen aus dem tschechischen Gebietsanteil stammt und damit fast die Hälfte der gesamten Schwefelemission im Projektgebiet umfasst. Der größte Anteil der NO_x-Emission wird auf deutscher Seite gemessen, wobei zu beachten ist, dass für das polnische Projektgebiet nicht alle NO_x-Emissionen

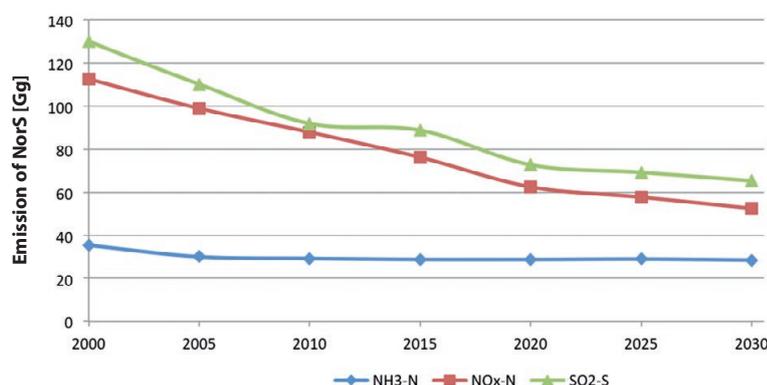
in FRAME eingehen (vgl. [Tabelle 13](#)). Für Ammoniak liegen die Emissionen für Deutschland und Polen auf annähernd gleichem Niveau.

Neben der Betrachtung der gegenwärtigen Entwicklung von Schwefel- und Stickstoffdepositionen, wurden vergangene und zukünftige Entwicklungstrends modelliert. Basierend auf einem länderspezifischen Skalierungsfaktor konnten ausgehend vom Jahr 2010 Emissionen differenziert nach SNAP-Klassen für die Jahre 2000 und 2005 sowie in 5-Jahresschritten für die Jahre 2015 bis 2030 abgeleitet werden (EMEP/CEIP 2014). Die länderspezifischen Skalierungsfaktoren für die Vergangenheit wurden aus dem europäischen Emissionskataster (EMEP WebDab) entwickelt, während für die Zukunft GAINS PRIMES Emissionsszenarien herangezogen wurden (AMANN et al. 2011). Die Veränderung der Schwefel- und Stickstoffemissionen zwischen 2000 und 2030 im Projektgebiet ist in [Abbildung 38](#) dargestellt.

Seit dem Jahr 2000 zeigt sich ein deutlicher Rückgang der Emissionen von SO₂ und NO_x im polnisch-sächsischen Grenzraum. Basierend auf den verwendeten Skalierungsfaktoren wird sich dieser Trend bis zum Jahr 2030 sehr wahrscheinlich weiter fortsetzen. Die Emissionen von Ammoniak verbleiben dagegen nach einem geringfügigen Rückgang

Abbildung 38

Veränderung der SO₂-, NO_x- und NH₃-Emissionen im KLAPS-Projektgebiet im Zeitraum 2000–2030





bis 2005 auf ähnlich hohem Niveau von etwa 30 Gg bis zum Jahr 2030. Die dargestellten Veränderungen der Emissionen werden bei der Modellierung der Schwefel- und Stickstoffdeposition im FRAME-Modell berücksichtigt.

Meteorologische Daten

Aufgrund seines einfachen Charakters benötigt das FRAME-Modell relativ wenige meteorologische Eingangsparameter. Obligatorisch gehen Windrosen der Windgeschwindigkeit und Häufigkeit der Windrichtung sowie die mittlere jährliche Niederschlagssumme in die Modellierung ein. Für die Jahre 2000, 2005 und 2010 werden jahresabhängige meteorologische Daten ermittelt. Die verwendeten Windrosen wurden aus Radiosondenmessungen an den Stationen Lindenberg (DE), Wrocław (PL) und Prag (CZ) nach der Methode von DORE et al. (2006) abgeleitet. **Abbildung 39** zeigt die berechneten Windrosen für das Jahr 2010 und aus Radiosonden abgeleitete Daten für den Zeitraum 1996–2009. Die Windrose der Häufigkeit der Windrichtung im Zeitraum 1996–2009 zeigt einen Peak im westlichen Sektor (270 bis 300°) gegenüber der mittleren Häufigkeit im Jahr 2010 (**Abbildung 39, a**). Für das sekundäre Maximum im südwestlichen Sektor (240 bis 270°) ist die mittlere Häufigkeit geringer als 2010. Das harmonische Mittel der Windgeschwindigkeit im Jahr 2010 verhält sich ähnlich den mittleren Werten im Zeitraum 1996–2009. Die höchsten Windgeschwindigkeiten werden der SW-W-NW Richtung zugeordnet (**Abbildung 39, b**).

Für die Modellierung der zukünftigen Entwicklung der Luftverschmutzung im Projektgebiet wurde eine konstante mittlere Windrose für den Zeitraum 2001–2100 auf Basis des regionalen Klimamodells CLM berechnet. Dieser vereinfachte Ansatz wurde aufgrund des einfachen Modellcharakters verfolgt. Die modellierten Ergebnisse zur Entwicklung der zukünftigen Windrichtung und Windgeschwindigkeit im Projektgebiet zeigen keine signifikanten Veränderungen im Projektgebiet im 21. Jahrhundert (SURKE et al. 2013).

Eine weitere wichtige Eingangsgröße ist die räumliche Verteilung des Niederschlags im Projektgebiet, da dieser im Wesentlichen verantwortlich ist für die nasse Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen. Die Verteilung der Niederschlagssumme wurde für jedes Jahr individuell berechnet und räumlich auf Basis der vorhandenen 210 Niederschlagsmessstationen interpoliert. Zur Regionalisierung wurde der GWRK-Ansatz (geographisch gewichtete Regression mit Residual-Kriging-Ansatz) nach SZYMANOWSKI et al. (2013) angewandt. Die räumliche Verteilung der mittleren jährlichen Niederschlagssumme im Jahr 2010 wird in **Abbildung 40** illustriert.

Um den Einfluss sich ändernder klimatischer Bedingungen unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 berücksichtigen zu können, wurde die Niederschlagsverteilung für die beiden Zeiträume 2021–2050 und 2071–2100 ebenfalls räumlich interpoliert.

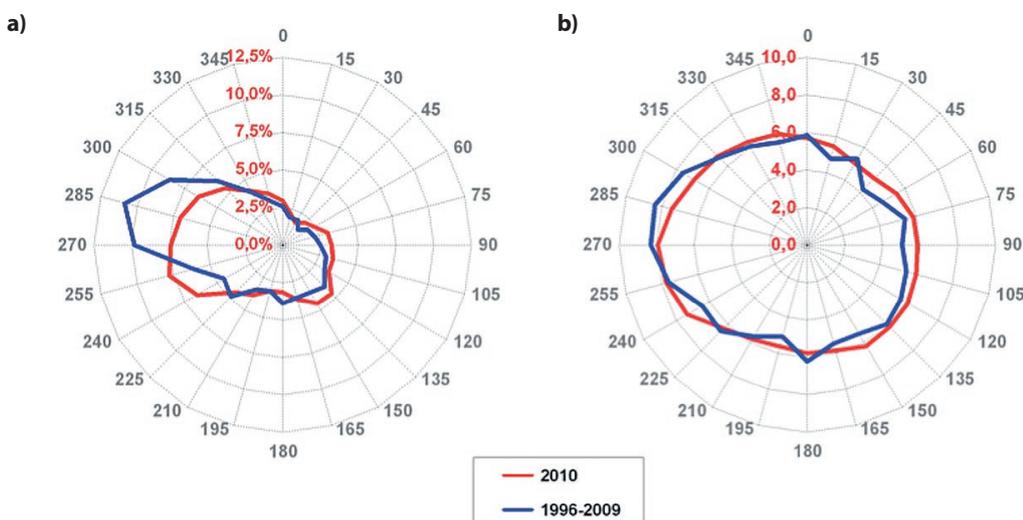
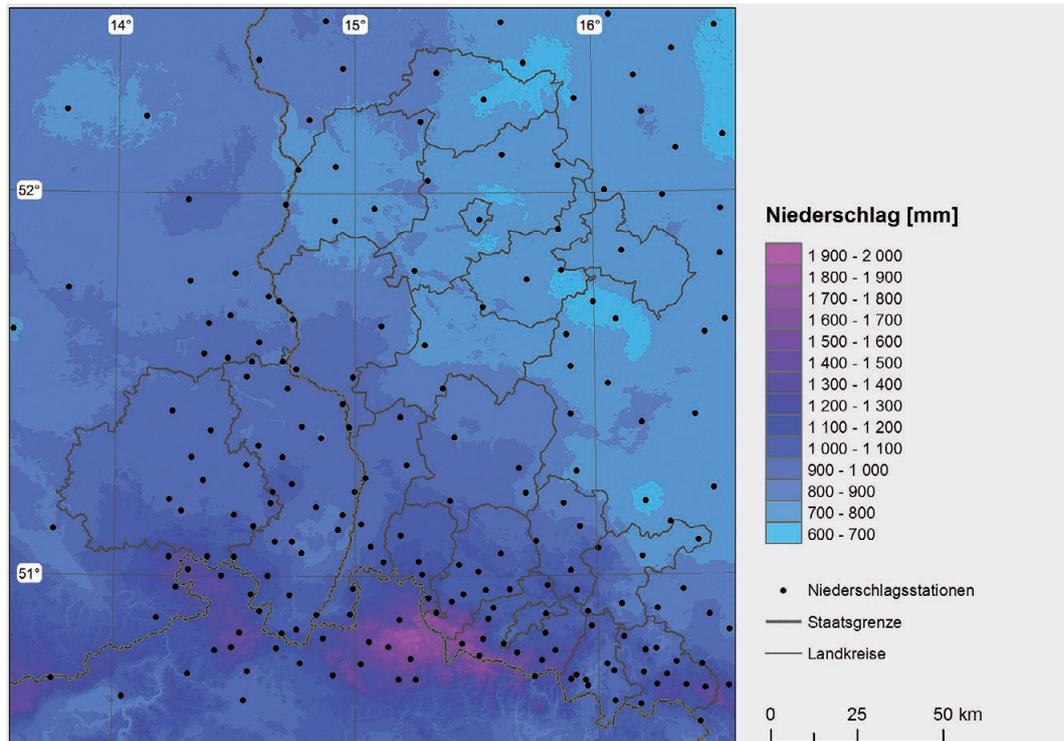


Abbildung 39
Windrose der mittleren Häufigkeit der Windrichtung a) und harmonisches Mittel der Windgeschwindigkeit b) im Projektgebiet im Jahr 2010 und im Zeitraum 1996–2009 (abgeleitet aus Radiosondenmessungen im Bereich zwischen 850–950 hPa)

Abbildung 40
Mittlere jährliche
Niederschlagsverteilung
im KLAPS-Projektgebiet
im Jahr 2010



Validierung der FRAME-Modellergebnisse

Da das FRAME-Modell zum ersten Mal für den polnisch-sächsischen Grenzraum angewendet worden ist, musste es einer umfangreichen Prüfung unterzogen werden. Die sogenannte Modellvalidierung wurde einerseits auf Basis von realen Messwerten und andererseits mittels modellierter Werte anderer Modelle (EMEP und interpolierte Werte des Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft – IMGW-PIB) durchgeführt. Die Modellvalidierung wurde für das Basisjahr 2010 durchgeführt.

Vergleich mit nassen Depositionsmessungen des IMGW-PIB

Grundlage für die Analyse der nassen Deposition bilden Jahresniederschlagssummen meteorologischer Stationen aus Deutschland (DWD), Tschechien (CHMI) und Polen (IMGW-PIB) (Abbildung 41). Zusätzlich wurde die mittlere Konzentration bzw. Höhe des pH-Wertes, des Sulfatgehalts, der Nitratverbindungen und von Chlorid berücksichtigt.

Die genannten Daten wurden wie folgt bereitgestellt:

- 10 Monitoringstationen in Deutschland (DWD): bereitgestellt durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Referat 51: Klima, Luftqualität, Dresden;
- 7 Monitoringstationen der Tschechischen Republik (ČHMÚ), bereitgestellt durch Český Hydrometeorologický ÚSTAV;
- 9 Monitoringstationen in Polen (GIOŚ – Hauptinspektorat für Umweltschutz): bereitgestellt durch IMGW-PIB, Wrocław.

Eine Übersicht der verwendeten Stationen erfolgt in **Abbildung 41** und **Tabelle 14**.

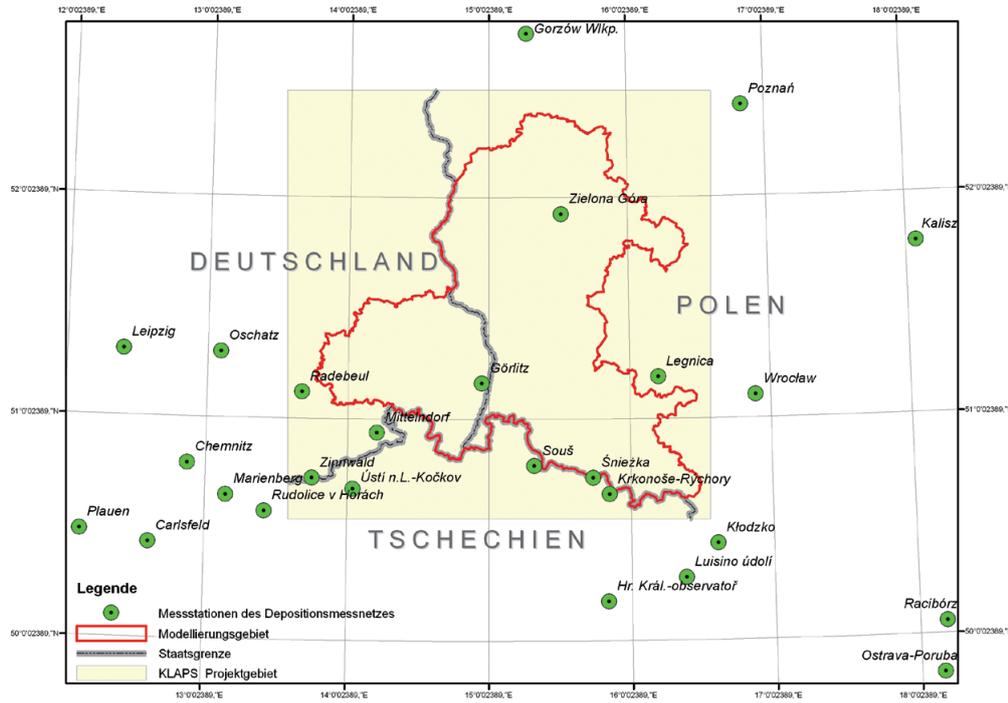


Abbildung 41
Räumliche Verteilung
der verwendeten
Messstationen

Station	Altitude [m ü. NN]	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Carlsfeld	896	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Chemnitz	418	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Görlitz ¹	237	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Leipzig	110	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Marienberg	639	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Mittelndorf ¹	323	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Oschatz	150	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Plauen	385	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Radebeul ¹	246	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zinnwald ¹	877	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ostrava-Poruba	242	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Luisino údolí	875					+	+	+	+	+	+	+	+	+
Hr. Král. -observatoř	276	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Krkonoše-Rýchory ¹	1001				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Souš ¹	771	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ústí n.L. -Kočkov ¹	367	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rudolice v Horách	840	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Gorzów Wlkp.	473	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zielona Góra ¹	192	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Poznań	83	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kalisz	138	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Legnica ¹	122	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wrocław	120	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
Śnieżka ¹	1603	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kłodzko	356	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
Racibórz	205	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabelle 14
Datenverfügbarkeit
der verwendeten
Messstationen der
Depositionsmessnetze
(¹ = Messstationen im
und in direkter Nähe des
Projektgebiets)

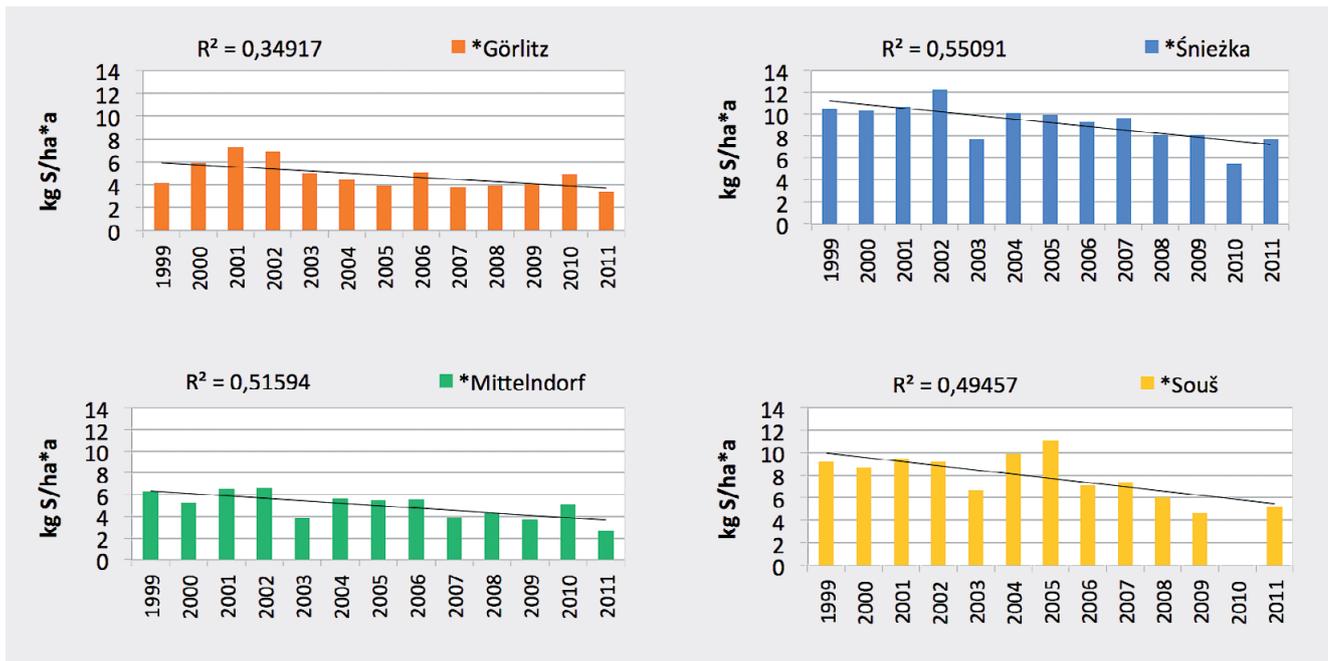
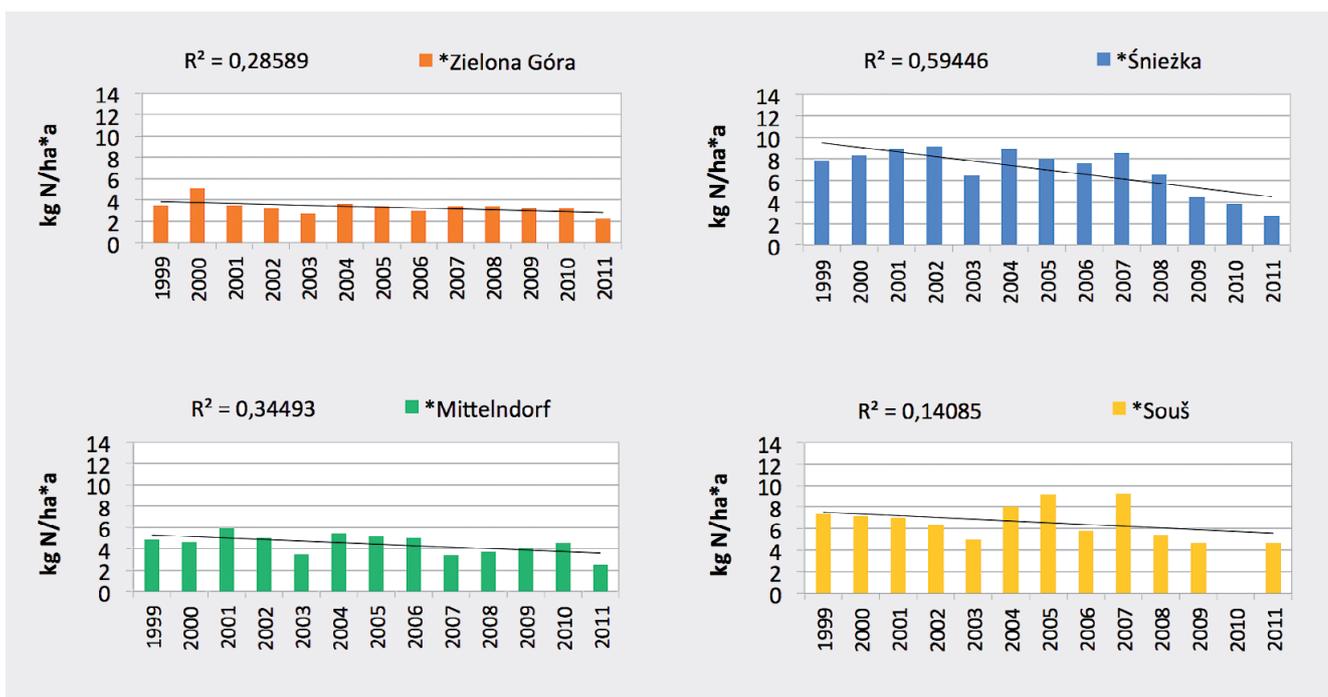


Abbildung 42
Mittlere jährliche Deposition von Sulfat durch Niederschlag für ausgewählte Stationen im Zeitraum 1999–2011 an ausgewählten chemischen Messstationen in Deutschland, Tschechien und Polen

Abbildung 43
Mittlere jährliche Deposition von Nitratstickstoff durch Niederschlag für ausgewählte Stationen im Zeitraum 1999–2011 an ausgewählten chemischen Messstationen in Deutschland, Tschechien und Polen





Um die Entwicklung der Deposition und Konzentration verschiedener Verbindungen im Projektgebiet aufzeigen zu können, wurden Daten im Zeitraum von 1999 bis 2011 betrachtet und Trendanalysen durchgeführt. Depositionen, die durch den Niederschlag abgelagert werden, wurden auf Basis der jeweiligen Konzentration des Stoffes im Niederschlag und der Niederschlagssumme berechnet. Für ausgewählte Indikatoren wurden gewichtete Konzentrationsmittelwerte berechnet, wobei die monatliche Niederschlagssumme in einer bestimmten Periode den Wichtungsfaktor bestimmt.

Der negative Einfluss auf die Umwelt durch gebundene Verbindungen im Niederschlag im Zeitraum 1999–2011 zeigt sich vor allem in der Bildung von Säure und Stickstoffverbindungen, welche zur Eutrophierung der Ökosysteme beitragen. Insgesamt zeichnet sich der Niederschlag durch eine hohe Versauerung aus. So genannter „Saurer Regen“ ist die Folge einer verschmutzten Atmosphäre, insbesondere durch sauerwirkende Schwefel- und Stickstoffverbindungen. Emissionierte Gase wie z. B. Schwefeldioxid, Stickoxide und Ammoniak reagieren in der Atmosphäre mit dem vorhandenen Wasser und werden in Mineralsäuren umgewandelt. „Saurer Regen“ wirkt sich besonders

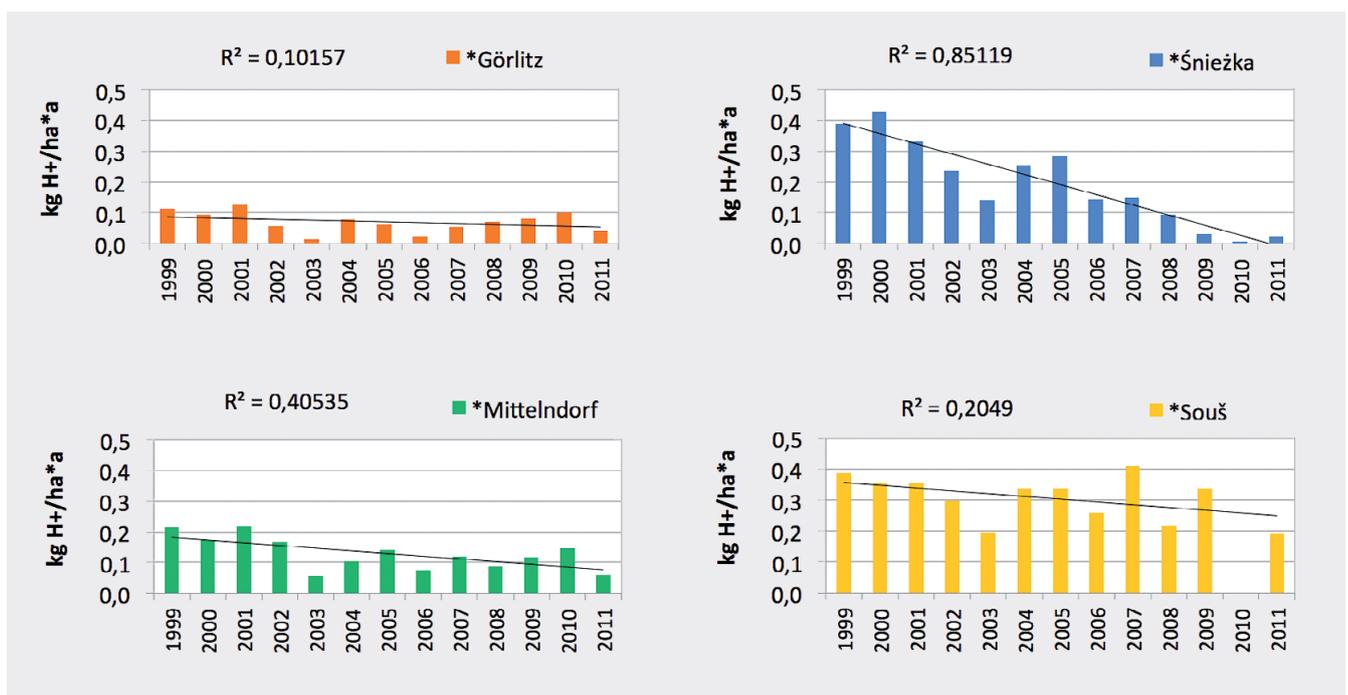
gefährlich auf die Umwelt aus, da er Struktur und Funktionalität der Ökosysteme, der Pedosphäre und Hydrosphäre, aber auch der technischen Infrastruktur (z. B. Stromleitungen) negativ verändern kann. Den höchsten Anteil sauerwirkender Stoffe im Niederschlag haben Sulfate, wobei ihr Anteil im Zeitraum 1999 bis 2011 einen rückgängigen Trend zeigt (Abbildung 42).

Auch abnehmende Stickstoffemissionen spiegeln sich in rückgängigen Nitratstickstoffdepositionen durch den Niederschlag im Projektgebiet wider (Abbildung 43).

Insgesamt wird eine Reduzierung der säurebildenden Verbindungen aus lokalen Quellen sowie durch nasse Deposition im Projektgebiet beobachtet.

Um die Versauerung im Niederschlag bewerten zu können, muss der pH-Wert im Niederschlag bestimmt werden. Basierend auf dem pH-Wert kann ferner der Wasserstoffionengehalt bewertet werden. Trends der mittleren jährlichen Wasserstoffionenkonzentration im Niederschlag deuten ebenfalls auf einen Rückgang der Versauerung im Projektgebiet hin (Abbildung 44).

Abbildung 44
Mittlere jährliche Deposition der Wasserstoffionenkonzentration im Niederschlag für ausgewählte Stationen im Zeitraum 1999–2011 an ausgewählten chemischen Messstationen in Deutschland, Tschechien und Polen



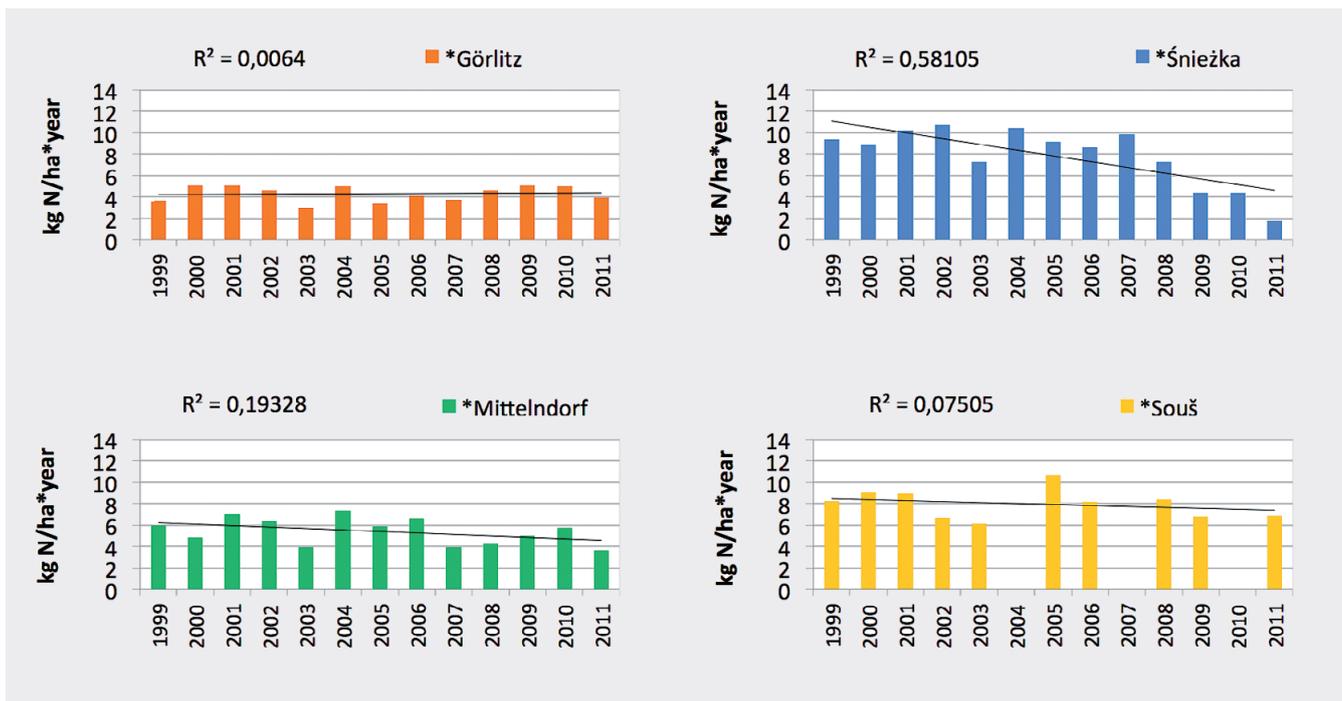


Abbildung 45
 Mittlere jährliche
 Deposition von Am-
 moniumnitrat durch
 Niederschlag im Zeitraum
 1999–2011 an ausgewähl-
 ten chemischen Mess-
 stationen in Deutschland,
 Tschechien und Polen

Stickstoffverbindungen beeinflussen im besonderen Maße die Umwelt. Diese Auswirkungen können unter Umständen positiv (zusätzliche Nährstoffe für die Landwirtschaft), aber auch negativ (verstärkte Eutrophierung von Oberflächengewässern) sein. Beispielsweise beträgt der zulässige jährliche Grenzwert der Flächenbelastung in Trinkwasserspeichern und Seen an Stickstoff laut Vollenweider (1976) $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Hohe Depositionsmengen von Stickstoffverbindungen wirken sich besonders negativ in Regionen aus, die empfindlich gegenüber Eutrophierung reagieren (z. B. aquatische Ökosysteme, Moore). Dieser Effekt wird zusätzlich durch die Tatsache verstärkt, dass die Verbindungen meistens in den warmen Jahreszeiten abgelagert werden. Unter Berücksichtigung erhöhter Sonneneinstrahlung kann es beispielsweise zu einer Verstärkung der Algenblüte kommen.

Quantitativ betrachtet, besitzt Ammoniumnitrat den größten Anteil an allen abgelagerten Stickstoffverbindungen im Niederschlag. An den meisten Messstationen kann im Zeitraum 1999 bis 2011 ein abnehmender Depositionstrend von Ammoniumnitrat beobachtet werden (Abbildung 45). Dieser aktuell gemessene rückläufige Trend wird vor allem mit Veränderungen in der Kohleindustrie, Emissionsbegrenzungen, gestiegenem ökologischen Bewusstsein und mit Änderungen der Nie-

derschlagssummen im Projektgebiet in Verbindung gebracht.

Die wichtigsten Ergebnisse des FRAME-Modells, welche z. B. zur Bewertung der ökologischen Belastungsgrenzen (vgl. Teil C) genutzt werden, sind die nassen Depositionen von Schwefel- und Stickstoffverbindungen im Projektgebiet.

Für das Bezugsjahr 2010 stehen insgesamt zehn Messstationen zur Verfügung, die Daten zur nassen Deposition von oxidiertem Schwefel und Stickstoff sowie reduziertem Stickstoff bereitstellen. Somit konnten die modellierten Ergebnisse des FRAME-Modells (Rasterdaten) mit den verfügbaren Messdaten verglichen und mittels Streudiagrammen dargestellt werden (Abbildung 46). Aus der Differenz zwischen den modellierten und beobachteten Werten der nassen Deposition an einer Station wird der Modellfehler jeder Messstation ermittelt.

Die Fehler werden durch drei Fehlerstatistiken zusammengefasst:

- BIAS – kalkulierter Mittelwert der Differenz zwischen Modell und Messung für alle Stationen. Die Streubreite dieser Statistik beträgt $\pm \infty$, mit einem Erwartungswert um Null. Ein BIAS > 0 bedeutet, dass das Modell tendenziell höhere Werte für die

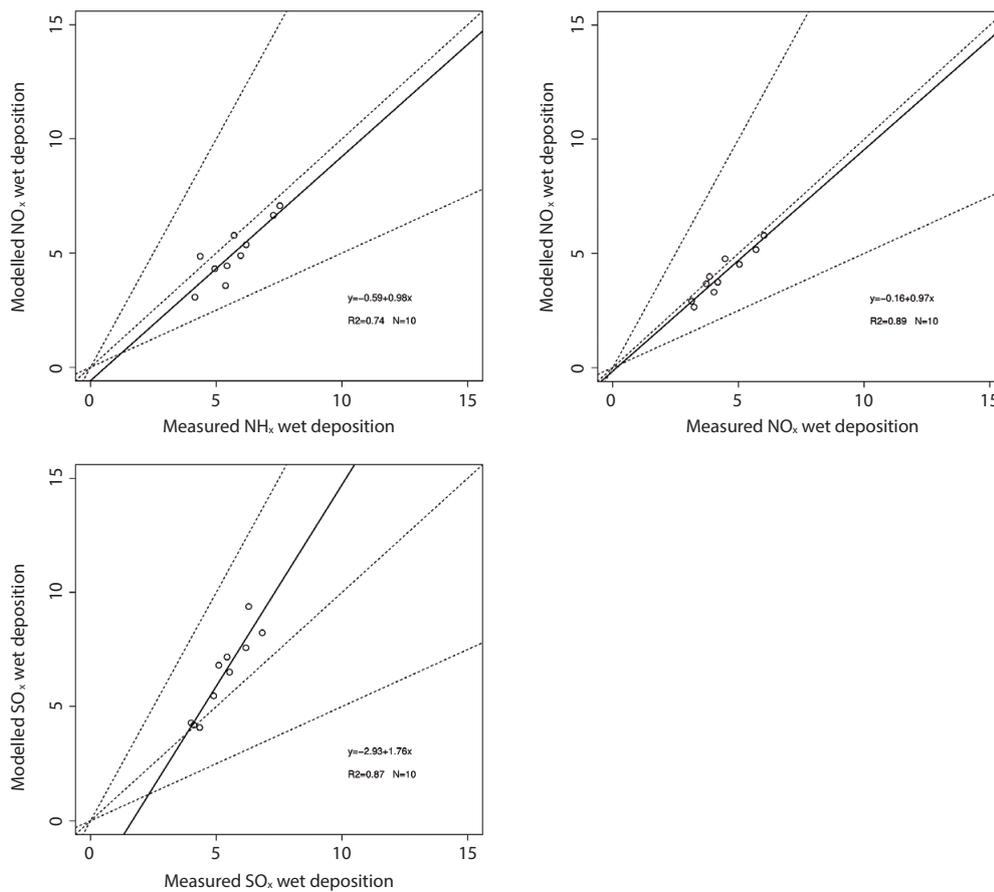


Abbildung 46
Vergleich der FRAME-Modellergebnisse (y-Achse) mit den Messungen (x-Achse) der Deposition von reduziertem Stickstoff, oxidiertem Stickstoff und Schwefel [kg N/S ha^{-1}]; R^2 – Bestimmtheitsmaß, N – Anzahl der Messstellen

Luftkonzentration/nasse Deposition ausgibt, als die tatsächlich beobachteten Werte. Ein $\text{BIAS} < 0$ bedeutet, dass das Modell tendenziell niedrigere Werte ausgibt, als die tatsächlich beobachteten Werte.

- Fraction of 2 (FAC2) – diese Statistik ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl der Werte innerhalb der 2:1 und 1:2 Geraden zur Gesamtanzahl der Standorte, welche zur Modellevaluation verwendet werden. Der Erwartungswert ist 1 und wird erreicht, wenn alle Werte innerhalb der 2:1 und 1:2 Geraden liegen.
- Mittlerer absoluter Fehler (MAE) – berechneter Mittelwert des absoluten Modellfehlers. Der MAE kann zwischen 0 und ∞ liegen. Der Erwartungswert des MAE liegt um Null.

Die modellierten Ergebnisse des FRAME-Modells der nassen Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen zeigen generell eine hohe Übereinstimmung mit den verfügbaren Messdaten (Abbil-

dung 46). Das Bestimmtheitsmaß (R^2) ist sehr hoch und erreicht 0,87 bzw. 0,89 für oxidierten Schwefel und Stickstoff. Für Ammonium ist die Streuung größer und weist ein Bestimmtheitsmaß von 0,74 auf.

Eine Unterschätzung der beobachteten Werte durch das Modell zeigt sich für die nasse Deposition von Stickstoffverbindungen (Tabelle 15). Bei der nassen Deposition von Schwefel weist das Modell im Vergleich zu den Messungen dagegen höhere Werte auf. Insgesamt zeigen die nassen Depositionen der chemischen Verbindungen jedoch an allen Messstationen einen $\text{FAC2} = 1$ auf, was darauf hindeutet, dass das FRAME-Modell in der Lage ist, verlässliche Schätzungen der nassen Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen für das Jahr 2010 zu liefern. Unter dieser Voraussetzung können die Modellergebnisse für die Analyse der ökologischen Belastungsgrenzen (Critical Load) weiter verwendet werden (vgl. Teil C).

Tabelle 15

Zusammenfassung der Fehlerstatistiken der FRAME-Modellergebnisse (nasse Deposition) für das Jahr 2010

	Nasse Deposition NH _x -N	Nasse Deposition NO _x -N	Nasse Deposition SO _x -S
BIAS [kg N oder S]	-0,69	-0,29	1,10
FAC2 [dimensionslos]	1,00	1,00	1,00
MAE [kg N oder S]	0,81	0,37	1,15

Vergleich mit interpolierten nassen Depositionsdaten

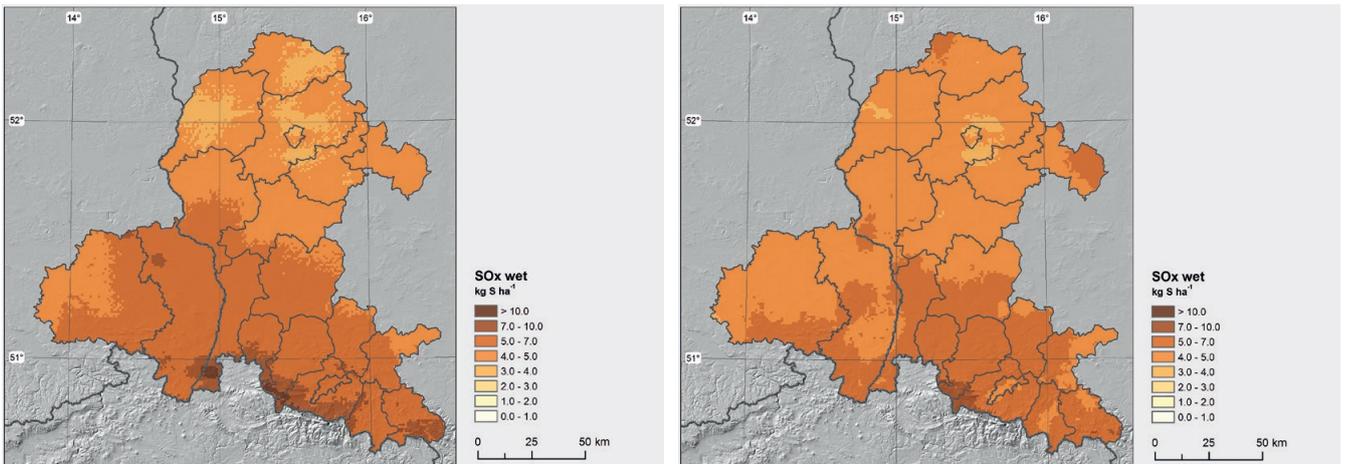
Die räumliche Verteilung der Deposition der Luftschadstoffe wurde durch das IMGW-PIB bereitgestellt und basiert auf gemessenen Niederschlagsdaten sowie physikalisch-chemischen Analysen des Regenwassers. Die Analysen wurden im Rahmen des Umweltmonitorings in Deutschland, Polen und Tschechien durchgeführt. Wie im FRAME-Modell wurde die räumliche Verteilung der nassen Deposition für die Jahre 2000, 2005 und 2010 ermittelt. Um die räumliche Verteilung der chemischen Verbindungen darstellen zu können, wurden die mittleren jährlichen Niederschlagssummen auf 1 x 1 km Auflösung regionalisiert. Die gerasterten Niederschlagsdaten stellte der Lehrstuhl für Klimatologie und Umweltschutz der Universität Wrocław bereit. Der Vergleich der modellierten nassen Depositionen in den Jahren 2000, 2005 und 2010 aus FRAME und vom IMGW-PIB wird in [Abbildung 47](#) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine enge Übereinstimmung zwischen den Rastern der beiden Datensätze, mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,7 für alle chemischen Verbindungen. Sowohl mit FRAME als auch mit den interpolierten Daten werden die höchsten nassen Depositionen für die Mittelgebirgsregionen modelliert. Im Vergleich zu den interpolierten Daten des IMGW-PIB werden mit FRAME höhere Depositionen von Schwefel modelliert. Im Gegensatz dazu ist im Tiefland die nasse Deposition von reduziertem Stickstoff höher unter Berücksichtigung der mittels inverser Distanzwichtung (IDW) interpolierten Daten des IMGW-PIB. Bei dem Vergleich der FRAME-Ergebnisse mit Messdaten an den Stationen Zielona Góra und Legnica werden ebenfalls Differenzen bis zu 30% berechnet. In den höheren Lagen liegen die Abweichungen dagegen unter 10%.

Vergleich mit dem EMEP-Modell

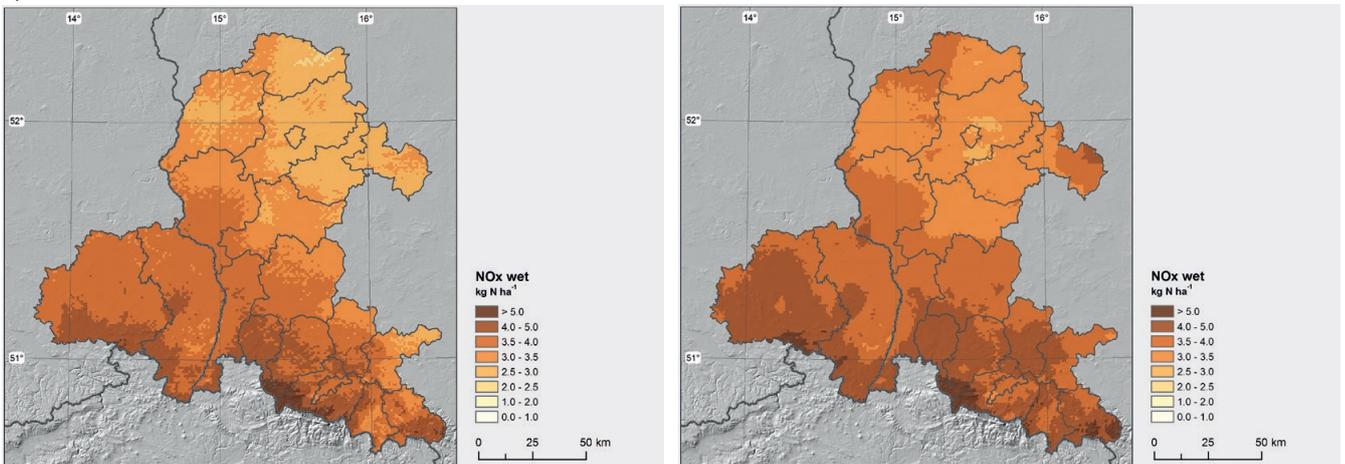
Die Ergebnisse des FRAME-Modells wurden zudem mit der eulerschen Version des EMEP-Modells verglichen. EMEP wird zur Unterstützung von Umweltpolitikzielen in ganz Europa umfassend eingesetzt und ist in der Wissenschaftsgemeinschaft weit verbreitet (SIMPSON et al. 2012). Hinsichtlich des theoretischen Ansatzes unterscheiden sich beide Modelle allerdings stark voneinander. Bei FRAME handelt es sich um ein statistisches Trajektorienmodell, welches auf relativ einfachen meteorologischen Annahmen basiert. EMEP ist dagegen ein komplexes eulersches Modell, welches auf detaillierten meteorologischen Informationen mesoskaliger meteorologischer Modelle beruht. Die Modelle unterscheiden sich zudem in ihrer räumlichen (1 km [FRAME] vs. 50 km [EMEP]) und vertikalen Auflösung (33 Schichten [FRAME] vs. 26 Schichten [EMEP]).



a)



b)



c)

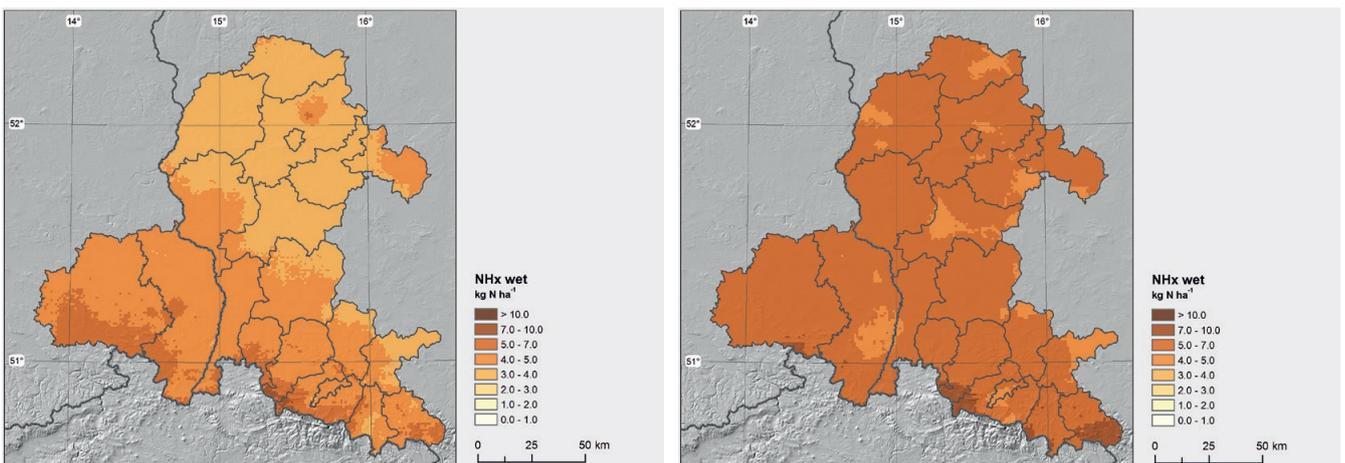
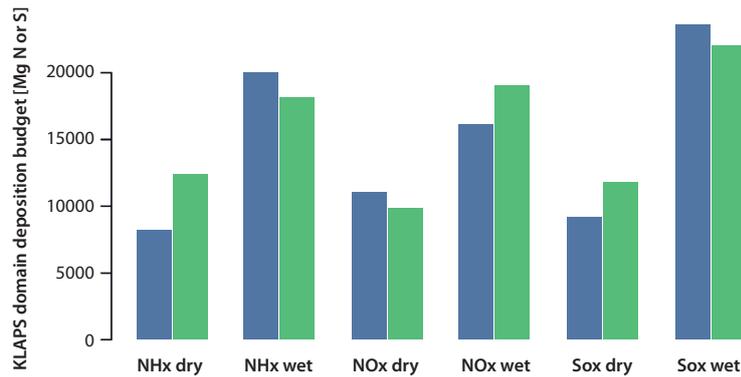


Abbildung 47
Vergleich der FRAME-
Modelldaten (linke
Spalte) mit den IMGW-
Daten (rechts) der
nassen Deposition von a)
Schwefel, b) oxidiertem
Stickstoff und c)
reduziertem Stickstoff

Abbildung 48

Menge der trockenen (dry) und nassen (wet) Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen im KLAPS-Projektgebiet, berechnet mit FRAME (blau) und EMEP (grün) für das Jahr 2010



Die Ergebnisse des Modellvergleichs sind in **Abbildung 48** für das gesamte Depositionsbudget (trockene und nasse Schwefel- und Stickstoffdeposition) für das Jahr 2010 dargestellt.

Bei beiden Modellen stellt die nasse Deposition den größten Anteil der Gesamtmasse von S und N im Projektgebiet dar. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass mittels FRAME niedrigere trockene Depositionen für reduzierten Stickstoff und Schwefel berechnet werden als im Vergleich zu EMEP. Für dieselben chemischen Komponenten weist FRAME, verglichen mit EMEP, ein höheres Budget der nassen Deposition auf. Dagegen ist die von FRAME errechnete trockene Deposition für oxidierten Stickstoff höher und die nasse Deposition niedriger als bei EMEP. Berücksichtigt man die Unterschiede in den

Modellstrukturen und den Eingangsdaten (sowohl Emissionen als auch Meteorologie), sind die vorliegenden Differenzen als gering einzuschätzen.

Zusammenfassung der FRAME-Modellläufe

Im Rahmen von KLAPS wurden insgesamt 25 Modellläufe mit FRAME durchgeführt. Die Modellläufe unterscheiden sich hinsichtlich der eingehenden Emissions- und meteorologischen Daten. Ziel dieser Differenzierung war es, die Depositionsänderung im Projektgebiet in Folge von Emissionsänderungen (einzeln), Veränderung der Meteorologie (einzeln) und gemeinsamer Änderung von Emission und Meteorologie, zu quantifizieren. In **Tabelle 16** wird eine kurze Zusammenfassung der Emissions- und meteorologischen Daten für jeden Modelllauf vorgestellt.

Tabelle 16

Zusammenfassung aller Modellläufe und der genutzten Eingangsdaten

Name	Emissionsjahr	Meteorologie	Anmerkungen
Basislauf	2010	2010	
P1	2005	2005	
P2	2000	2000	
FE1	2015	2010	
FE2	2020	2010	
FE3	2025	2010	
FE4	2030	2010	
FC_A1B	2010, 2020, 2030	2021–2050, 2071–2100	Niederschlag des A1B Szenarios, jährliche Mittelwerte für die Perioden 2021–2050 und 2071–2100. Für jede Periode wurde das Modell dreimal mit den Emissionsdaten für die Jahre 2010, 2020 und 2030 durchlaufen
FC_RCP2.6	2010, 2020, 2030	2021–2050, 2071–2100	Niederschlag des RCP2.6 Szenarios, jährliche Mittelwerte für die Perioden 2021–2050 und 2071–2100. Für jede Periode wurde das Modell dreimal mit den Emissionsdaten für die Jahre 2010, 2020 und 2030 durchlaufen
FC_RCP8.5	2010, 2020, 2030	2021–2050, 2071–2100	Niederschlag des RCP8.5 Szenarios, jährliche Mittelwerte für die Perioden 2021–2050 und 2071–2100. Für jede Periode wurde das Modell dreimal mit den Emissionsdaten für die Jahre 2010, 2020 und 2030 durchlaufen



Ergebnisse

Gegenwärtige Depositionen

In **Abbildung 49** wird die räumliche Verteilung für Schwefel- und Stickstoffverbindungen im Basisjahr 2010 dargestellt. Es zeigt sich, dass die trockene Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen in der Nähe der Emissionsquellen am höchsten ist. Die Verteilung der nassen Deposition wird im Wesentlichen durch die Niederschlagsverteilung bedingt. Diese ist demzufolge am höchsten in Gebieten mit hohem jährlichem Niederschlag, insbesondere in den Mittelgebirgsregionen. Zusätzlich werden die nassen Depositionen in diesen Gebieten durch den „Seeder-Feeder Effekt“ verstärkt, welcher im FRAME-Modell berücksichtigt wird. Im Vergleich zur trockenen Deposition ist die nasse Deposition deutlich höher, insbesondere in den Bergregionen. Die Maximalwerte der nassen Deposition betragen bis zu 8 kg ha^{-1} für Schwefel und für oxidierten und reduzierten Stickstoff 5 bzw. 7 kg ha^{-1} . Die Gesamtmenge an abgelagertem Schwefel in der Projektregion beträgt 33 Gg . Für oxidierten Stickstoff sind es 27 Gg und 29 Gg für reduzierten Stickstoff.

In **Abbildung 50** wird die Gesamtdeposition von Schwefel und reduziertem Stickstoff für die Jahre 2000 und 2010 miteinander verglichen. Die räumliche Verteilung der Schadstoffverbindungen ist im Allgemeinen in beiden Jahren ähnlich. Im Jahr 2010 zeigt sich eine klare Abnahme der Schwefeldeposition gegenüber 2000. Die Entwicklung der Deposition von oxidiertem Stickstoff verhält sich ähnlich, weshalb diese Karten im Folgenden nicht dargestellt werden. Grund für den hier dargestellten rückgängigen Trend der Depositionen sind Emissionsminderungen, sowohl im KLAPS-Projektgebiet als auch in ganz Europa (Ferntransport). Bei reduziertem Stickstoff sind kaum Veränderungen der Emissionen beobachtbar, sodass sich die Depositionsmenge im Jahr 2010 auf einem ähnlichen Niveau wie im Jahr 2000 bewegt.



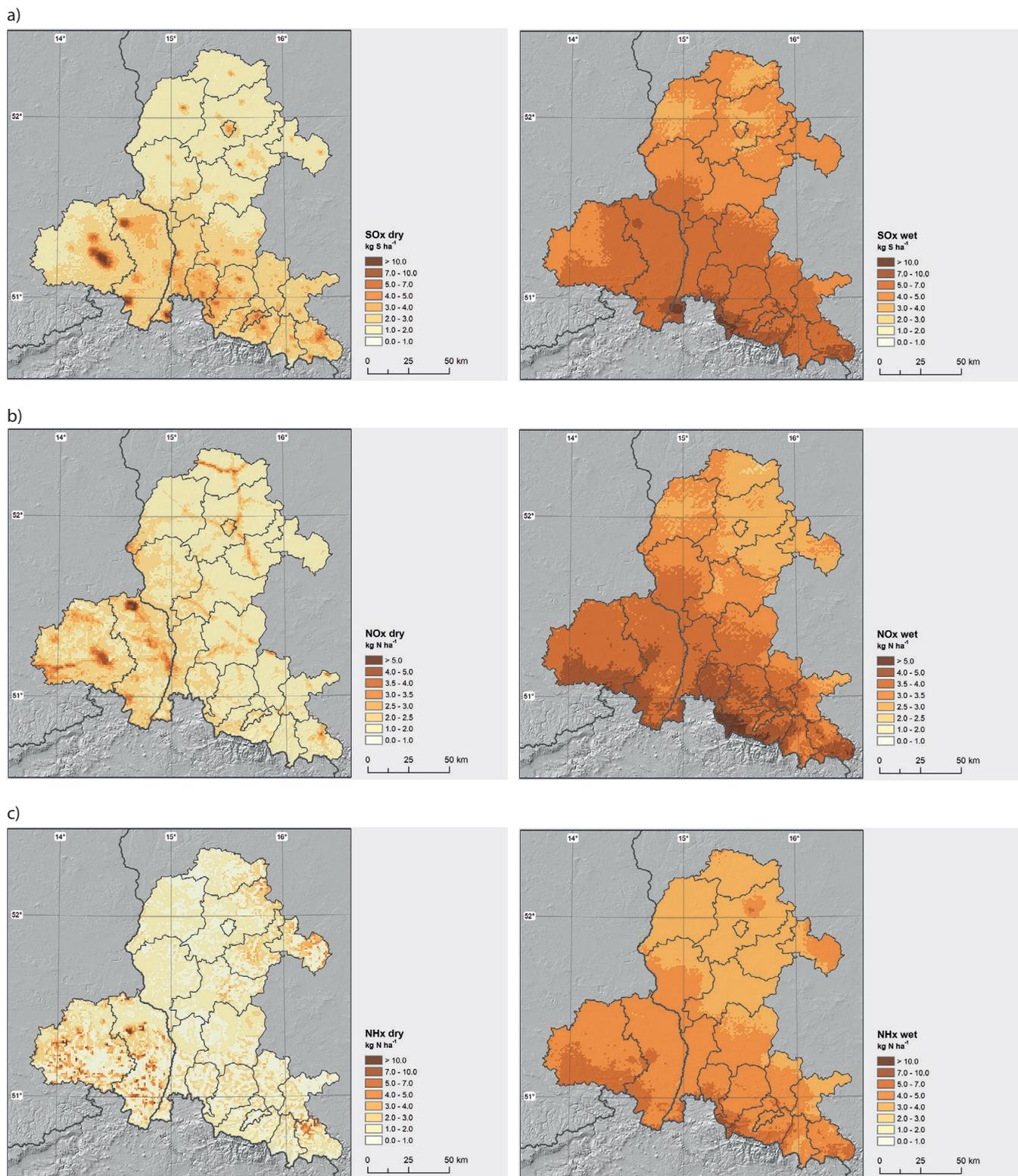


Abbildung 49
 Trockene (linke Spalte)
 und nasse (rechts) Depo-
 sition von a) Schwefel, b)
 oxidiertem Stickstoff und
 c) reduziertem Stickstoff
 für das Basisjahr 2010

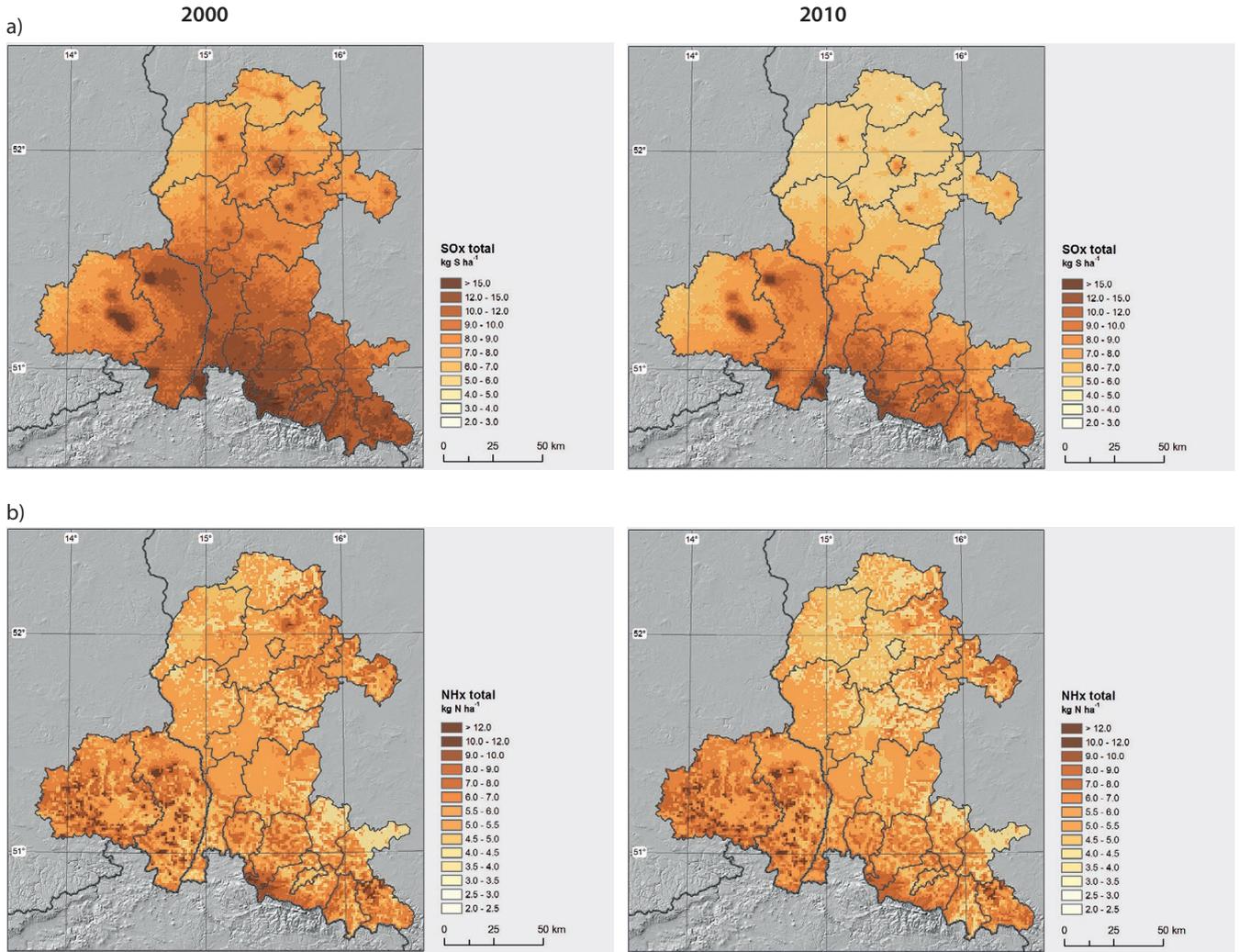


Abbildung 50
Gesamtdeposition
von a) Schwefel und b)
reduziertem Stickstoff
im Jahr 2000 (links)
und 2010 (rechts)



Zukünftige Deposition

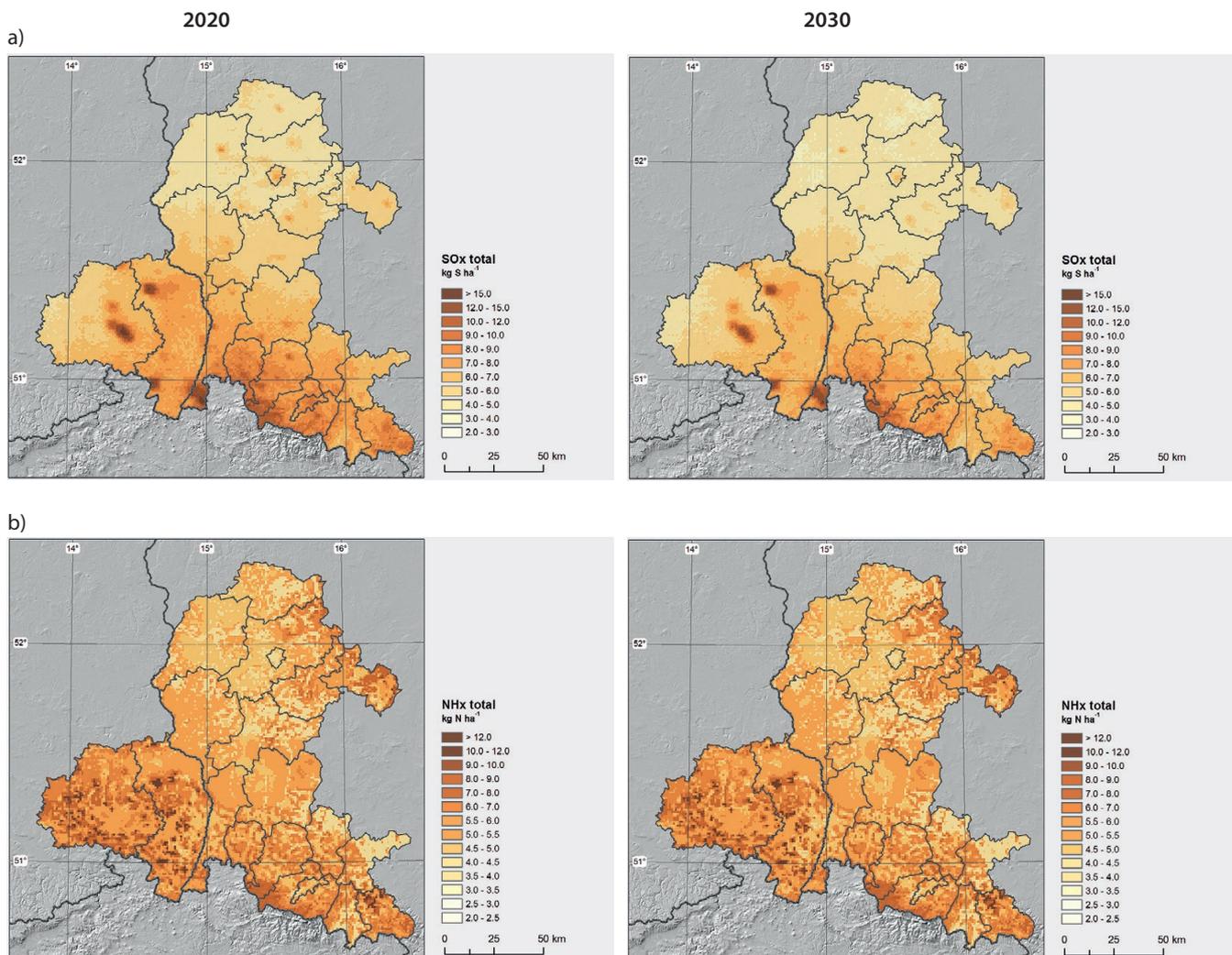
In **Abbildung 51** wird die Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen unter verschiedenen Emissionsszenarien in den Jahren 2020 und 2030 (bei konstanten meteorologischen Verhältnissen seit dem Jahr 2010) dargestellt. Dem allgemeinen Emissionstrend folgend, kommt es zu einer weiteren Verringerung der Deposition von Schwefel und oxidiertem Stickstoff (nicht dargestellt). Die räumliche Verteilung entspricht der im Jahr 2010. Ähnlich wie in den Jahren 2000 und 2010 zeigt sich keine signifikante Veränderung in der Deposition von reduziertem Stickstoff, welcher auf einem ähnlichen Niveau wie im Jahr 2010 verharrt.

Das gesamte Depositionsbudget im Projektgebiet für die Periode 2010–2030 (unter der Annahme konstanter meteorologischer Bedingungen) wird in **Abbildung 52** zusammenfassend dargestellt.

Entsprechend den Emissionsminderungen im Projektgebiet und in Europa ist davon auszugehen, dass die Deposition von Schwefel und oxidiertem Stickstoff zukünftig weiter abnimmt. Dagegen bleibt die Deposition von reduziertem Stickstoff auf ähnlichem Niveau. Auffällig ist, dass die Depositionsmenge von reduziertem Stickstoff im Jahr 2010 höher ist als im Vergleich zur Deposition von oxidiertem Stickstoff.

Das Depositionsbudget im Projektgebiet zeigt deutliche Veränderungen für Schwefel und Stickstoff unter den Klimaszenarien A1B und RCP8.5 (**Abbildung 53**). Vor allem zum Ende des 21. Jahrhunderts werden abnehmende Depositionsmengen bis zu 0,5 Gg im Projektgebiet modelliert. Geringe Veränderungen zeigen sich dagegen unter RCP2.6 aufgrund der geringen Änderung der mittleren jährlichen Niederschlagssummen.

Abbildung 51
Gesamtdeposition von a) Schwefel und b) reduziertem Stickstoff im Jahr 2020 (links) und 2030 (rechts)



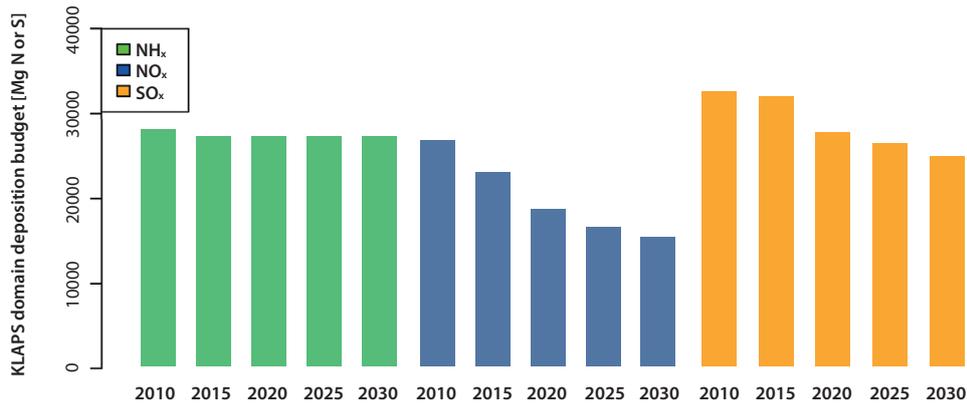


Abbildung 52
Depositionsbudget im KLAPS-Projektgebiet für Schwefel- und Stickstoffverbindungen für die Jahre 2010–2030 (5-Jahresschritte)

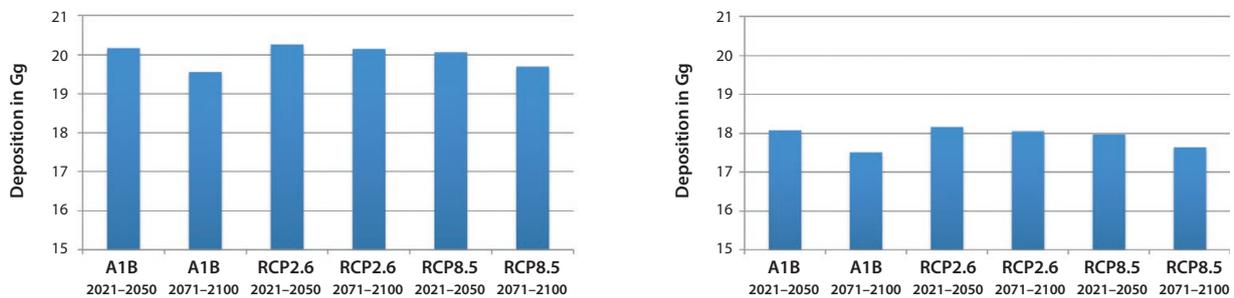


Abbildung 53
Höhe der Schwefel-deposition [Gg] unter verschiedenen Klimaszenarien und Depositionsprognosen im Jahr 2020 (links) und 2030 (rechts) im KLAPS-Projektgebiet

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde die vergangene, gegenwärtige und zukünftige Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen unter Verwendung verschiedener Emissions- und Klimaszenarien vorgestellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Gegenwärtig findet ein Rückgang der Deposition von Schwefel und oxidiertem Stickstoff im KLAPS-Projektgebiet statt, während bei reduziertem Stickstoff keine Abnahme der Deposition modelliert wird. Diese Resultate zeigen sich sowohl durch Messungen der nassen Deposition als auch die Ergebnisse des FRAME-Modells. Ausschlaggebend für die beobachteten Veränderungen sind Maßnahmen zur Reduzierung von regionalen und europäischen Emissionen.

Die dargestellten Emissionsprognosen zeigen, dass die zukünftigen Veränderungen der anthropogenen Emissionen am stärksten für die Änderungen der Schwefel- und Stickstoffdeposition im KLAPS-Projektgebiet verantwortlich sind. Bis 2030

ist demnach ein weiterer Rückgang von oxidierten Schwefel- und Stickstoffdepositionen zu erwarten. Basierend auf den verwendeten Klimaszenarien ergeben sich vor allem unter den Szenarien A1B und RCP8.5 Abnahmen der Schwefel- und Stickstoffdepositionen zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber dem Zeitraum 2021–2050. Dies wird im Wesentlichen durch eine projizierte Abnahme der jährlichen Niederschlagssumme bedingt. Unter RCP2.6 ist der klimatische Einfluss auf die Depositionshöhe vernachlässigbar. Insgesamt ist der klimatische Einfluss auf die Schwefel- und Stickstoffdeposition allerdings geringer einzuschätzen als eine Minderung der Emissionen im Projektgebiet.

Gemäß dem GAINES PRIMES-Emissionsszenario wird zukünftig eine weitere Reduktion der Emission und Deposition von Schwefel und oxidierten Stickstoff stattfinden. Die Depositionen von reduziertem Stickstoff bleiben im Vergleich zu anderen chemischen Verbindungen auch zukünftig auf hohem Niveau. Reduzierter Stickstoff bildet damit die Hauptquelle für die Stickstoffdeposition im polnisch-sächsischen Grenzraum.



Belastungs- grenzen von Ökosystemen





Einleitung

Zum Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit, im Interesse des Vorsorgeprinzips und zur Minderung negativer Umweltauswirkungen muss die Umweltpolitik Ziele festlegen. Vor allem Grenzwerte von Luftschadstoffen haben traditionell große Bedeutung bei der Ableitung solcher Umweltziele. Zur Festlegung von Grenzwerten hat sich u. a. das Prinzip der ökologischen Belastungsgrenzen, der sogenannten Critical Load (CL), bewährt. CL sind Grenzwerte für luftgetragene Schadstoffeinträge, bei deren Einhaltung oder Unterschreitung es weder akut noch langfristig zu schädigenden Wirkungen auf empfindliche Ökosysteme kommt. Anhand der Betrachtung von Klimaprojektionen und Luftschadstoffen in Kombination mit ökologischen Belastungsgrenzen kann somit auch grenzüberschreitend dargestellt werden, für welche Ökosysteme aktuell und zukünftig ein hohes Risikopotential besteht.

Im Rahmen des Projekts KLAPS werden CL von versauernden und eutrophierenden Luftschadstoffen sowie deren Überschreitung für Wald- und andere naturnahe Ökosysteme bestimmt. Den CL werden die tatsächlichen Depositionen atmosphärischer Schadstoffe gegenübergestellt. Aus der Differenz der beiden Größen ergibt sich, ob die Belastungsgrenzen eingehalten oder überschritten werden. Bei einer Überschreitung der CL sind Maßnahmen zur Reduzierung der Schadstoffbelastung notwendig. Generelles Ziel ist die Einhaltung der CL, auf dem Weg dahin sind Zwischenziele möglich (Abbildung 54).

Datengrundlage und Methodik

Für die Ermittlung ökologischer Belastungsgrenzen werden neben chemischen, physikalischen, biologischen und geologischen Indikatoren aktuelle sowie zukünftige Klima- und Luftschadstoffdaten berücksichtigt. Die Berechnung der CL erfolgt nach der einfachen Massenbilanzmethode, bei der Stoffeinträge mit potentiellen Senken und erlaubten Stoffausträgen verglichen werden.

Die Klassifizierung der Ökosysteme basiert auf dem CORINE Land Cover 2006 Datensatz. Die darin enthaltenen natürlichen und halbnatürlichen Ökosysteme bilden die ökologischen Rezeptoren für die Berechnung der CL (Abbildung 55).

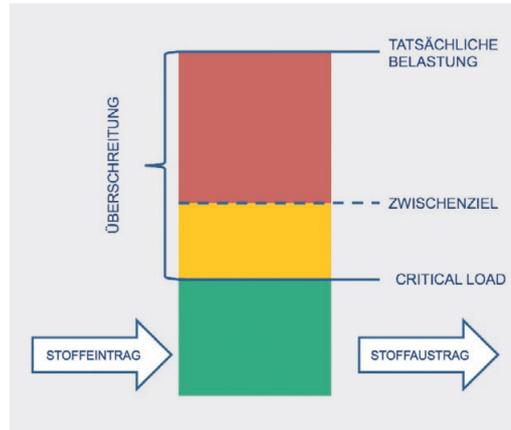


Abbildung 54
Critical Load als Grenz- und Zielwerte in der Luftreinhaltepolitik

Aus der NATURA2000-Datenbank können Informationen über die Ausdehnung von Biosphärenreservaten, Nationalparks, Naturparks, Landschaftsschutzgebieten, Flora-Fauna-Habitat Gebieten (FFH) und Vogelschutzgebieten (SPA) abgeleitet werden. Des Weiteren sind für die Berechnung der CL auch Informationen aus Bodendaten erforderlich, um Terme wie die Verwitterungsrate basischer Kationen oder die Säureneutralisationskapazität ableiten zu können (Abbildung 56). Um eine konsistente Datengrundlage für das gesamte Untersuchungsgebiet zu verwenden, wurde auf die Europäische Bodendatenbank European Soil Database Version v2.0 zurückgegriffen (ESDB 2004).

Aus der Kombination des CORINE2006 Datensatzes und den Bodendaten können vorherrschende Vegetationsgesellschaften abgeleitet und einem Biotoptyp nach EUNIS-Klassifikation⁴ zugeordnet werden. Insgesamt konnten 41 verschiedene EUNIS-Klassen im Projektgebiet definiert werden.

4 eunis.eea.europa.eu

Abbildung 55
 Verwendete Landnutzungs-
 klassen im Projekt-
 gebiet (CORINE2006)

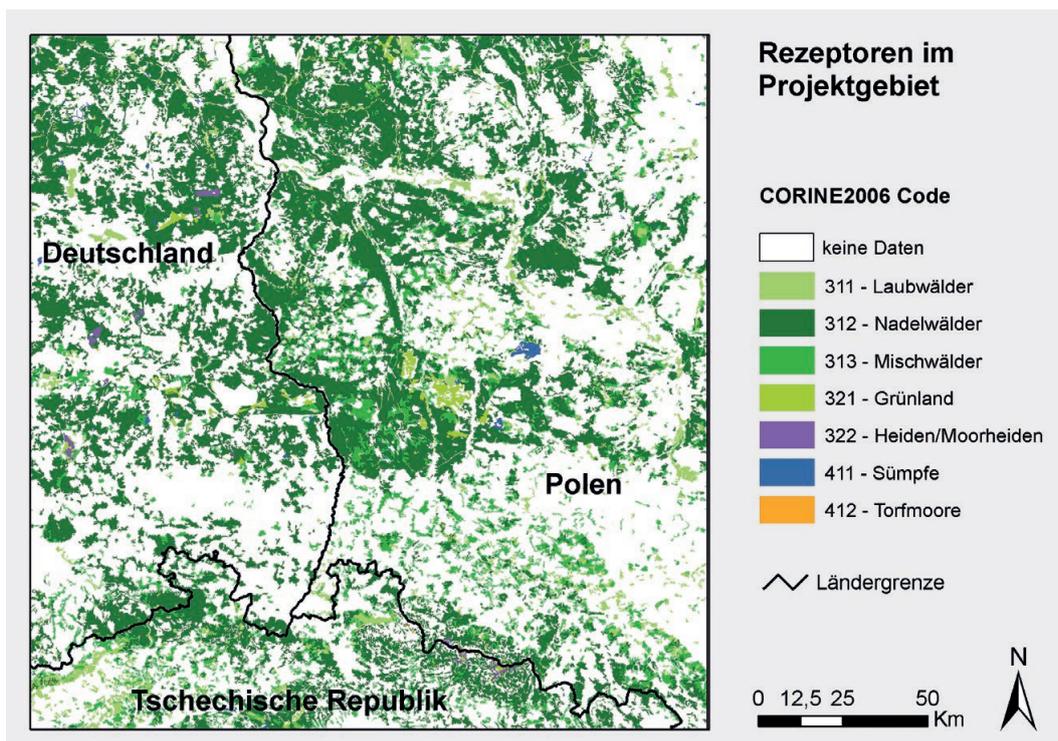
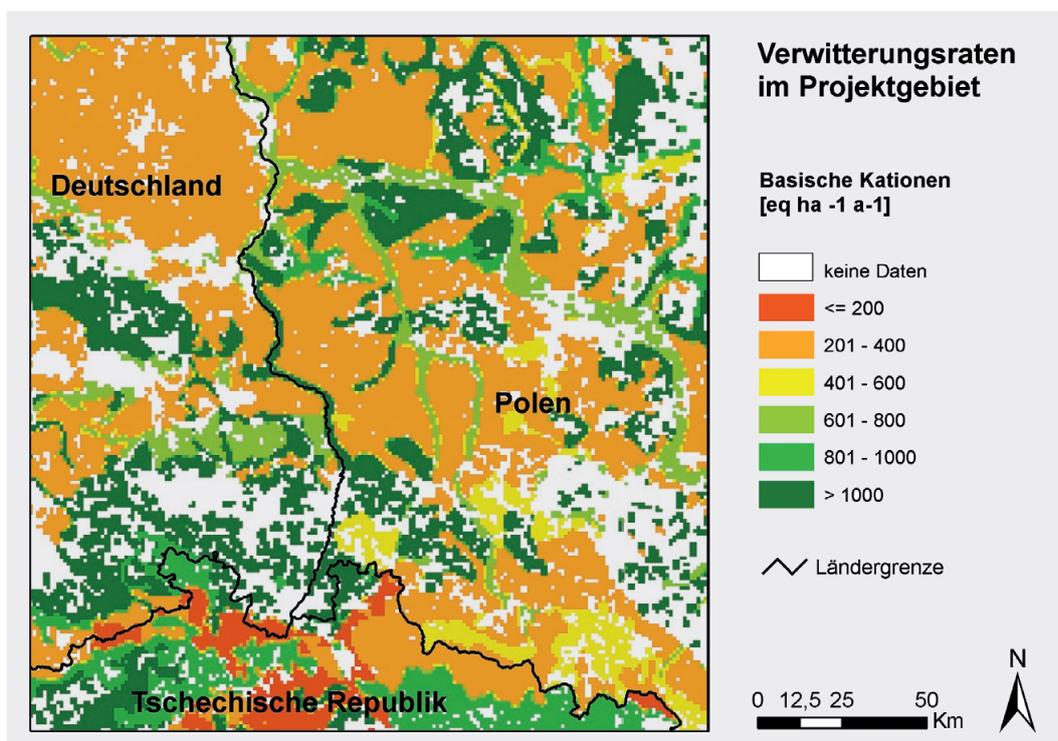


Abbildung 56
 Verwitterungsraten
 basischer Kationen im
 Projektgebiet



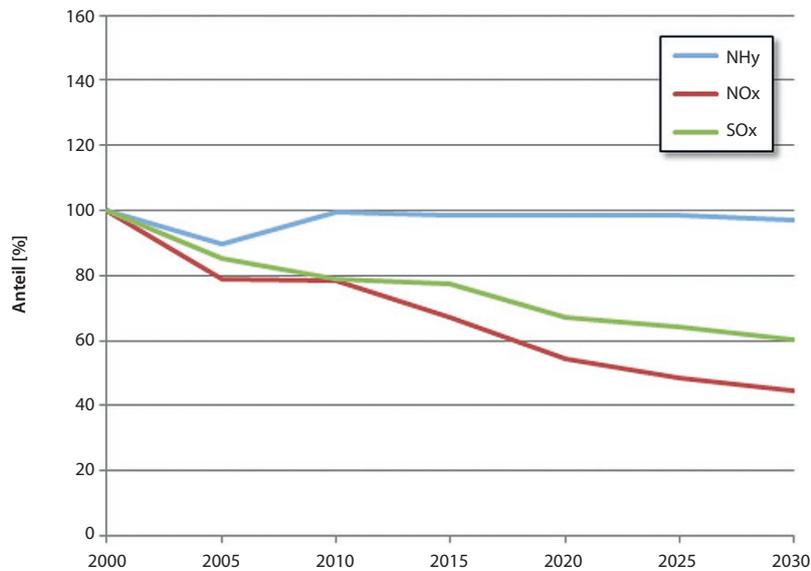


Abbildung 57
Depositionstrend verschiedener Schadstoffe im KLAPS-Projektgebiet im Zeitraum 2000 bis 2030

Die Einträge von Schwefel- und Stickstoffverbindungen wurden für alle betrachteten Klimaszenarien mit dem Ausbreitungsmodell FRAME berechnet (vgl. **Teil B**). Verwendet wurden die Datensätze zu den mittleren Jahresdepositionen in den Jahren 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2025 und 2030. In **Abbildung 57** ist der Trend der Depositionsmittelwerte für das gesamte Untersuchungsgebiet dargestellt. Generell sind zwei unterschiedliche Verläufe erkennbar. Während die Deposition von oxidiertem Stickstoff (NO_x) und oxidiertem Schwefel (SO_x) kontinuierlich abnimmt und im Jahr 2030 nur noch 44% bzw. 60% der historischen Deposition erreicht, zeigen sich beim reduzierten Stickstoff (NH_y) Unterschiede. Nach einem geringfügigen Rückgang im Jahr 2005 nähert sich die Depositionsmenge wieder den historischen Werten aus dem Jahr 2000 und verharrt auf annähernd gleichem Niveau bis zum Jahr 2030.

Um den Einfluss sich ändernder klimatischer Bedingungen im polnisch-sächsischen Grenzraum auf die Entwicklung der CL berücksichtigen zu können, wurden neben den beobachteten Klimadaten die Projektionen der 5 Klimaszenarien (vgl. **Teil A**) einbezogen. Vor allem Stickstoffimmobilisierung, Sickerwasser- oder die Verwitterungsrate korrelieren mit den Klimaveränderungen. Die mögliche Bandbreite der zukünftigen Entwicklung der CL wird anhand der ausgewählten Klimaszenarien dargestellt.

Eine detaillierte Beschreibung der Datengrundlage und Methodik erfolgt im Teilprojektbericht „Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Load – verschiedener Ökosysteme in Abhängigkeit von Klimawandel und Luftschadstoffen im polnisch-sächsischen Grenzraum“ (NAGEL et al. 2014)⁵.

⁵ Online verfügbar unter: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22073>

Ergebnisse

Critical Load für das Basisklima 1971–2000

Die räumliche Verteilung der Critical Load zum Schutz vor Versauerung, ausgedrückt in Schwefeleinheiten $CL_{max}(S)$, ist in [Abbildung 58](#) dargestellt.

Die höchsten Werte (über $2500 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), also eine relative Unempfindlichkeit gegenüber Säureeinträgen, sind in verschiedenen Teilgebieten der Projektregion zu finden. Im Vorland und in Teilen des Zentrums des Riesengebirges liegen die Bereiche mit den höchsten Depositionsmengen für basische Kationen (über $500 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und hohen Verwitterungsraten (600 bis $800 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Eine weitere Region liegt in Teilen der Oberlausitz und des Elbsandsteingebirges. Hier sind vor allem die hohen Verwitterungsraten (800 bis über $1000 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ausschlaggebend. Die Bereiche im polnischen Tiefland zeichnen sich durch Böden mit geringer Säureanfälligkeit und erhöhte Verwitterungsraten von basischen Kationen aus (über $1250 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$).

Die niedrigsten Critical Load (750 – $1000 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) sind im deutschen und polnischen Tiefland zu finden. In diesen Bereichen wird in den Auengebieten mit relativ hohen Entzügen gerechnet, welche die Menge der zur Verfügung stehenden basischen Kationen stärker reduziert. In anderen Bereichen wie z. B. im Zentrum des Riesengebirges sorgen die nur geringmächtigen Böden (teilweise $< 0,3 \text{ m}$) für eine sehr geringe Bereitstellung von basischen Kationen. Der Verwitterungsprozess wird durch die niedrigen Durchschnittstemperaturen zusätzlich gebremst.

Die räumliche Verteilung der Critical Load für Eutrophierung ($CL_{nut}N$) unterscheidet sich wesentlich von der Verteilung der Empfindlichkeiten hinsichtlich der Versauerung ([Abbildung 59](#)). Ein wichtiger Grund dafür ist die verstärkte Anbindung des $CL_{nut}N$ an die Sickerwasserrate und Bodenproduktivität, welche die Menge an erlaubtem Stickstoffabfluss im Bodenwasser und den Stickstoffentzug durch die Vegetation bestimmen. In Abhängigkeit vom Niederschlag können die regenreichen Hochlagen (z. B. Isergebirge und Riesengebirge) als relativ unempfindlich gegenüber dem eutrophierenden Einfluss von Stickstoff gesehen werden. Der modellierte $CL_{nut}N$ liegt in den genannten Gebieten teilweise über $25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die niedrigsten Critical Load ($7,5$ – $15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) sind ebenfalls im deutschen und polnischen Tiefland zu finden. Die wesentlichen Gründe liegen in den geringen Niederschlägen sowie in Bodentypen mit relativ niedrigem Wuchspotenzial.

Eine Analyse der Empfindlichkeiten bestimmter Ökosysteme zeigt, dass sich Laub- und Mischwälder sensitiver gegenüber Nadelwäldern verhalten. Bei den Nicht-Waldtypen erscheint die geringe Empfindlichkeit der Heiden im Vergleich zur relativ hohen Eutrophierungsgefahr bei Sümpfen und Torfmooren interessant.

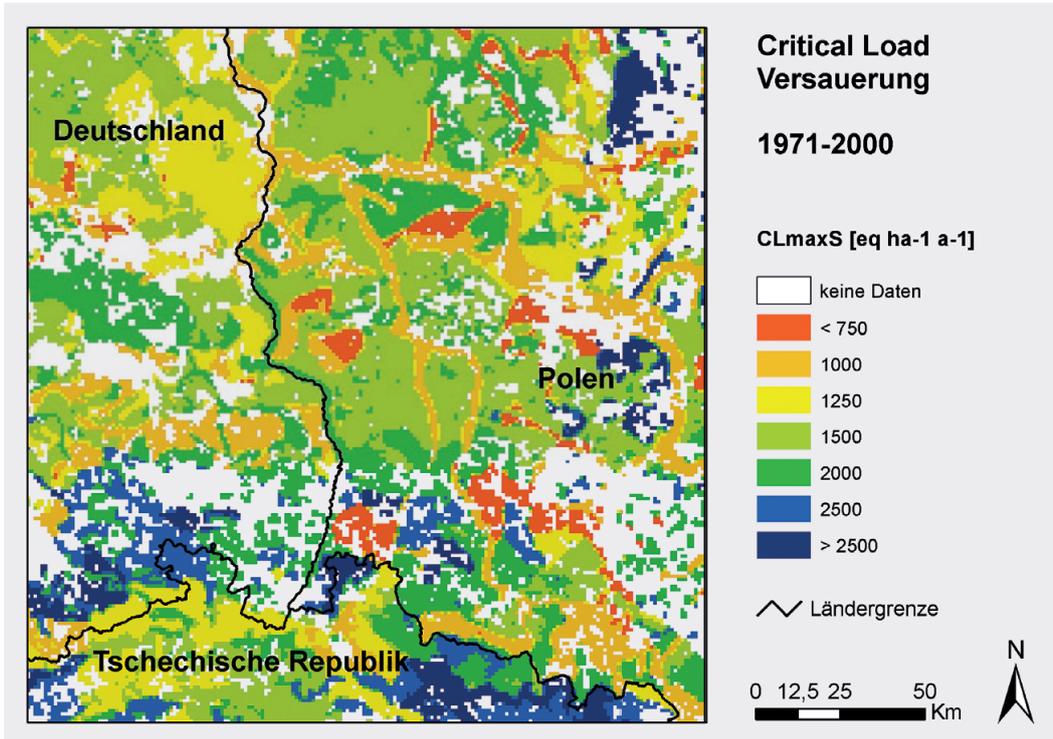


Abbildung 58
Critical Load zum Schutz vor Versauerung (CL_{maxS}) auf Basis von Klimadaten im Zeitraum 1971–2000

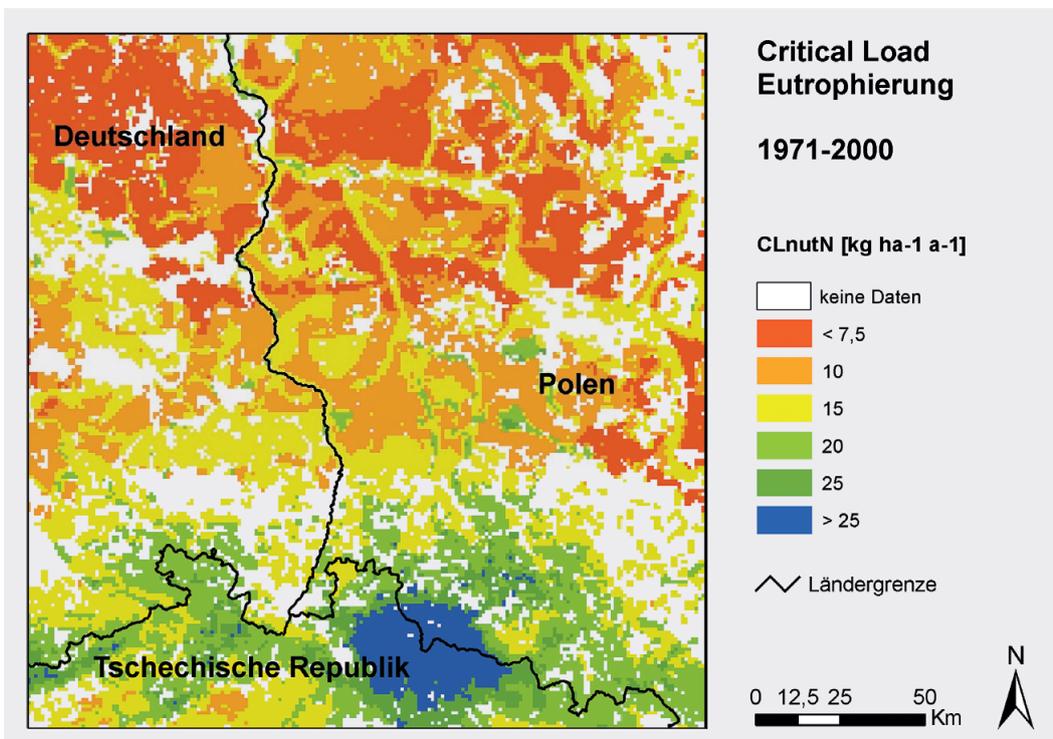


Abbildung 59
Critical Load zum Schutz vor Eutrophierung auf Basis von Klimadaten im Zeitraum 1971–2000

Critical Load in Abhängigkeit von verschiedenen Klimaszenarien

Bei den Critical Load zum Schutz vor Versauerung (CL_{maxS}) ergeben sich aus ökologischer Sicht im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 für den überwiegenden Teil der Ökosysteme (63%) kaum nennenswerte Veränderungen ($\pm 100 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000. Geringere Critical Load Werte, d. h. eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Säureeinträgen, zeigen sich vor allem in den Mittelgebirgsregionen, während sich bei den meisten Ökosystemen in niederen Lagen eine erhöhte Säuretoleranz ergibt. Der Einfluss möglicher Klimaveränderungen auf die Versauerunggefährdung von Ökosystemen im Projektgebiet ist daher als gering einzustufen. Ein gleichlautendes Ergebnis wurde auch bereits in einer Studie zur klimabeeinflussten Veränderung von Critical Load für den Freistaat Sachsen festgestellt (LfULG 2010).

Im Gegensatz zum CL_{maxS} reagieren die Belastungsgrenzen zum Schutz vor Eutrophierung (CL_{nutN}) stärker auf die klimatischen Veränderungen. Für alle Szenarien gilt, dass der CL_{nutN} unter veränderten klimatischen Bedingungen sensibler wird. Damit nimmt das Risikopotential für die Belastung der Ökosysteme durch eutrophierende Stickstoffdeposition mit dem Klimawandel, vor allem zum Ende des 21. Jahrhunderts, zu. Die geringste Absenkung des Critical Load für Stickstoff ergibt sich unter Szenario RCP2.6, während die stärksten Änderungen im ersten Lauf des Szenarios RCP8.5 erreicht werden (Abbildung 60).

Generell wird deutlich, dass sich bei den bereits sehr empfindlichen Ökosystemen mit einem CL unter $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ die Belastungsgrenzen geringfügiger verändern als bei weniger empfindlichen Rezeptoren mit CL über $30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Tabelle 17). Besonders die Ökosysteme in den höheren Lagen sind dadurch stärker durch eutrophierende Stickstoffdeposition betroffen.

Abbildung 60
Critical Load im Klimaszenario RCP2.6 (links) und RCP8.5 Lauf 1 (rechts) in den Zeiträumen 1971–2000, 2021–2050 und 2071–2100

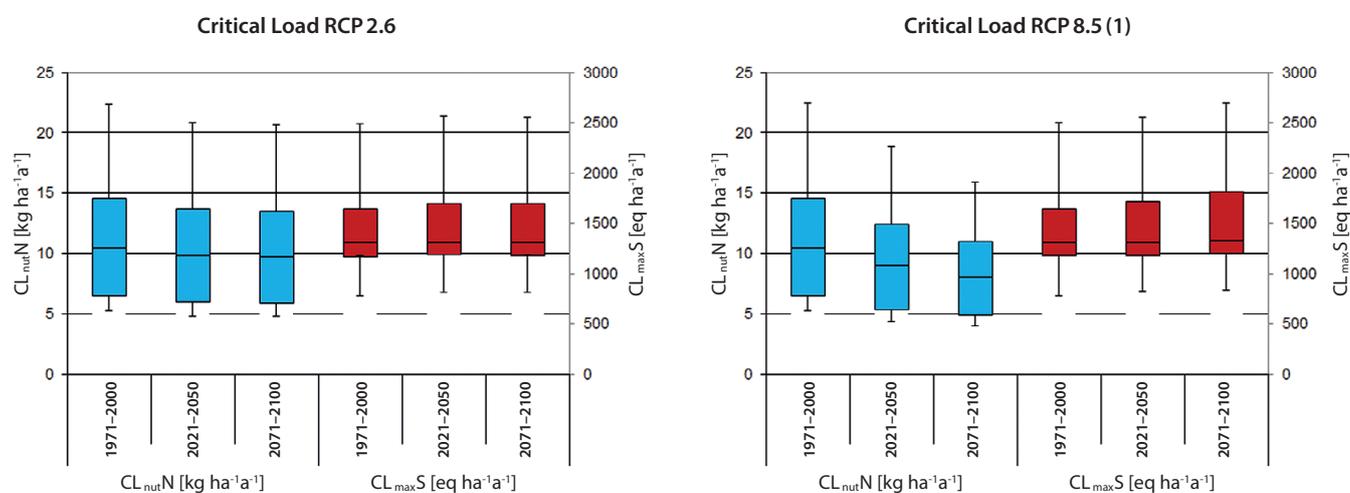


Tabelle 17
Statistische Auswertung der klimatisch bedingten Änderung der Critical Load zum Schutz vor Eutrophierung

	A1B		RCP2.6		RCP8.5 Lauf 1		RCP 8.5Lauf 2		RCP 8.5Lauf 3	
	2021–2050	2071–2100	2021–2050	2071–2100	2021–2050	2071–2100	2021–2050	2071–2100	2021–2050	2071–2100
CL_{nutN} [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]										
< 10	-0,73	-1,67	-0,50	-0,76	-1,10	-1,75	-0,53	-0,81	-1,05	-1,68
10-20	-1,24	-3,45	-0,87	-0,54	-2,04	-1,57	-0,92	-1,34	-0,92	-1,58
20-30	-2,20	-6,37	-1,61	-1,01	-3,76	-3,50	-1,77	-2,84	-1,77	-3,16
> 30	-2,44	-7,42	-2,04	-1,81	-4,98	-6,82	-2,21	-5,37	-2,21	-5,70
Mittelwert	-1,08	-2,84	-0,76	-2,24	-1,75	-8,69	-0,81	-6,62	-1,68	-6,78



Überschreitung der Critical Load in Abhängigkeit von Luftschadstoffen im Zeitraum 2000 bis 2030

Bereits Ende des letzten Jahrhunderts konnten deutliche Fortschritte hinsichtlich der Überschreitung der versauernd wirkenden CL erzielt werden. Im Jahr 2000 wurden bei 78,7 % der im KLAPS-Gebiet befindenden Ökosysteme die CL eingehalten (Abbildung 61). Einem Risiko der Versauerung unterlagen demnach nur 21,3 % der Rezeptoren. Dieser Anteil sank bis zum Jahr 2010 auf 9,5 %, so dass 90,5 % der Ökosysteme keine Beeinträchtigung durch Säurebelastung mehr erfahren haben. Im Prognosezeitraum bis 2030 werden nahezu alle Ökosysteme vor negativen Effekten durch Versauerung geschützt sein, da die CL flächendeckend eingehalten werden.

Dagegen war die Belastung durch Stickstoffdepositionen bis zum Ende des letzten Jahrhunderts noch sehr hoch. In nahezu allen Ökosystemen existierten Einträge deutlich oberhalb der Critical Load zur Vermeidung von Eutrophierungserscheinungen. **Abbildung 62** zeigt die zeitliche Entwicklung des Anteils eutrophierungsgefährdeter Ökosysteme in Polen, Tschechien und Deutschland. Seit dem Jahr 2000 ist ein positiver Trend hin zu einer Verminderung eutrophierungsgefährdeter Ökosysteme zu erkennen. Basierend auf gegenwärtigen Emissionsprognosen wird angenommen, dass sich dieser Trend zukünftig fortsetzen wird. Jedoch bleiben die Emission von Stickoxiden und Ammoniak in der Gegenwart und auch nach dem gegenwärtigen Stand der Prognose für 2030 unverhältnismäßig hoch. Damit bleiben in allen drei Ländern 43 % (DE) bis 74 % (CZ) der Ökosysteme im Jahr 2030 weiterhin dem Risiko einer Eutrophierung ausgesetzt.

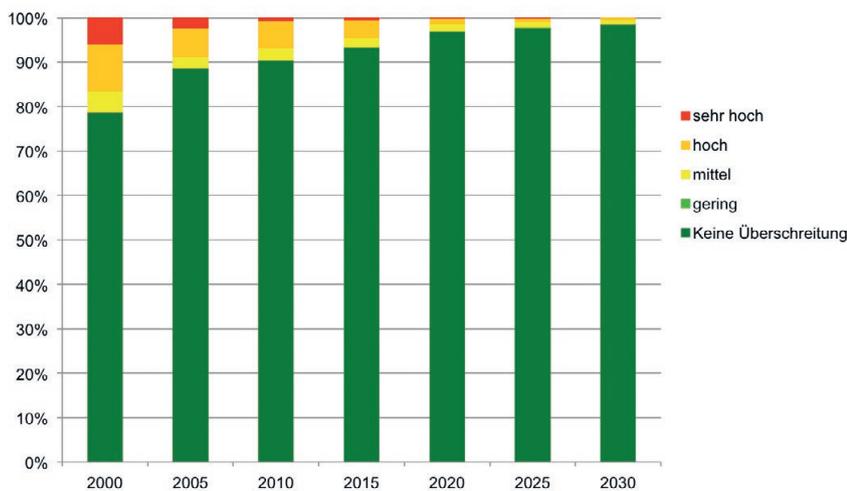


Abbildung 61
Überschreitung der Critical Load für Versauerung in Abhängigkeit der Depositionsszenarien 2000–2030 (Basisklima 1971–2000)

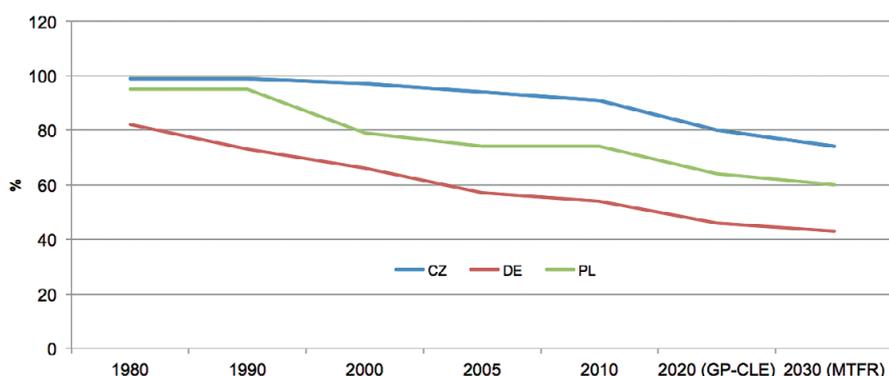


Abbildung 62
Anteil der Ökosysteme mit einem Eutrophierungsrisiko in Polen (PL), Tschechien (CZ) und Deutschland (DE) (EEA 2014)
GP-CLE = Gothenburg Protocol current legislation; MTFR = Maximum Technical Feasible Reduction (maximal mögliche technische Reduktion)

Diese generellen Aussagen treffen im Wesentlichen auch auf das Untersuchungsgebiet des Projektes KLAPS zu (Abbildung 63). So konnte seit dem Jahr 2000 eine leichte Reduzierung der Einträge von eutrophierenden Stickstoffverbindungen erreicht werden. Jedoch sind gegenwärtig (2010) immer noch mehr als 60% der Ökosysteme einer zu hohen Belastung ausgesetzt. Trotz weiterer Emissionsminderungen werden auch im Jahr 2030 38,6% der Ökosysteme einem erhöhten Risiko durch Eutrophierung ausgesetzt sein.

Bewertung der Auswirkungen von Schadstoffeinträgen und Klimawandel auf die Gefährdung von Ökosystemen

Wie bereits verdeutlicht wurde, stellt insbesondere der Stickstoff mit seiner eutrophierenden Wirkung auch in Zukunft ein Problem im Projektgebiet dar. Daher liegt der Fokus der folgenden Betrachtungen auf dem Risiko durch Eutrophierung. Um den Einfluss sich ändernder klimatischer und lufthygienischer Bedingungen auf die Belastungsgrenzen von Ökosystemen berücksichtigen zu können, wird das Risikopotential für Eutrophierung in Abhängigkeit von Schadstoffeinträgen und klimaabhängigen Critical Load kombiniert betrachtet. In Abbildung 64 sind die Schadstoffeinträge von 2000 bis 2030 sowie die klimatischen Bedingungen in den

Abbildung 63
Überschreitung der Critical Load für Eutrophierung in Abhängigkeit der Depositionsszenarien 2000–2030 (Basisklima 1971–2000)

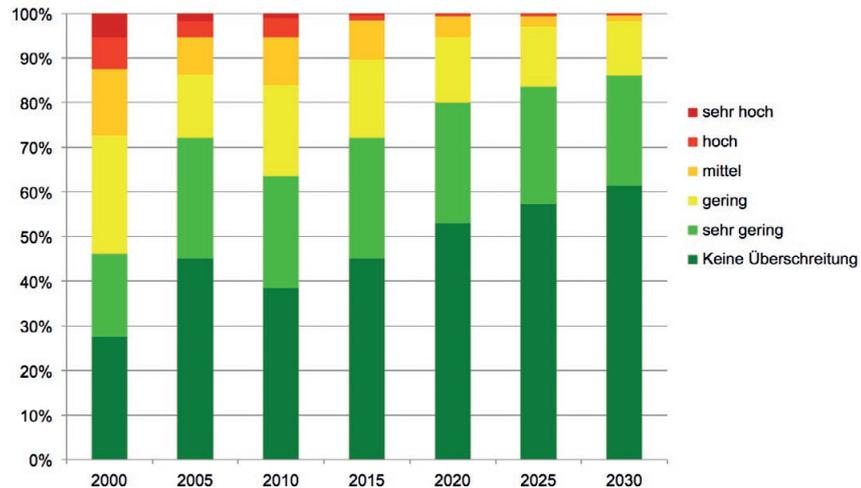
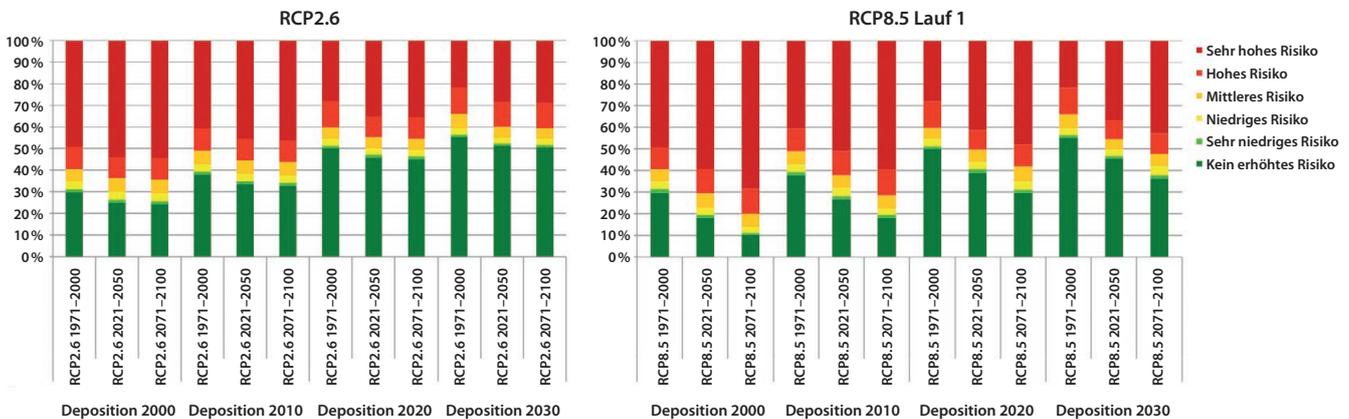


Abbildung 64
Risikoklassen der Eutrophierung von Ökosystemen in Abhängigkeit von Schadstoffeinträgen und klimaabhängigen Critical Load unter RCP2.6 (links) und RCP8.5 Lauf 1 (rechts)





Zeiträumen 1971–2000, 2021–2050 und 2071–2100 exemplarisch für die beiden extremen Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 (Lauf 1) abgebildet.

Unter beiden Szenarien wird deutlich, dass der Anteil der geschützten Ökosysteme unter Berücksichtigung der Depositionsänderungen bis 2030 unter gleichen klimatischen Bedingungen ansteigt. Dieser positive Trend ist unter dem Szenario RCP8.5 stärker ausgeprägt als unter RCP2.6. Bezieht man allerdings die klimatischen Änderungen in die Analysen ein, nimmt der Anteil der gefährdeten Ökosysteme, vor allem zum Ende des 21. Jahrhunderts, wieder zu. Während im optimistischen Szenario (RCP2.6) zum Ende des 21. Jahrhunderts der Anteil der geschützten Ökosysteme im Projektgebiet gegenüber 2000 um 20% auf 50% zunimmt, bleibt dieser unter RCP8.5 (Lauf 1) nahezu konstant bei 37%. Insgesamt wären demnach bis Ende des Jahrhunderts trotz emissionsmindernder Maßnahmen noch 50% bis über 60% der Ökosysteme im polnisch-sächsischen Grenzraum einem Risiko durch Eutrophierung ausgesetzt.

Ergebnisvergleich mit anderen Studien

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden mit einer Critical Load Studie seitens der polnischen Projektpartner verglichen (MILL et al. 2013). In **Abbildung 65** ist ein Vergleich der deutschen und polnischen Datensätze dargestellt. Bei den Belastungsgrenzen für Versauerung CL_{maxS} zeigt sich ein ähnlicher Verlauf, wobei der polnische Datensatz etwas mehr Anteile im Bereich der sehr empfindlichen Ökosysteme ausweist. Im deutschen Datensatz liegen die oberen CL-Werte niedriger als in der polnischen Studie.

Eine sehr gute Übereinstimmung liefern die Ergebnisse der Belastungsgrenzen für Eutrophierung CL_{nutN} . Etwas höhere Grenzwerte der unteren Empfindlichkeitsgrenze von $5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ lassen sich höchstwahrscheinlich darauf zurückführen, dass in der deutschen Studie Stickstoff als essentieller Nährstoff berücksichtigt wird.

Beide Studien gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2030 auf nahezu allen Rezeptorflächen die CL für Versauerung eingehalten werden. Mögliche klimatische Veränderungen sind daher zu vernachlässigen. Beim CL zum Schutz vor Eutrophierung werden sowohl im polnischen wie auch im deutschen Bericht bei mehr als 60% der betrachteten Ökosysteme die Belastungsgrenzen im Jahr 2010 überschritten. Trotz Maßnahmen zur Emissionsminderung sauerwirkender Schadstoffe bleiben auch im Jahr 2030 noch auf etwa 40% der Fläche im Projektgebiet die Critical Load überschritten. Darüber hinaus wurde in beiden Studien übereinstimmend festgestellt, dass im Zuge des Klimawandels eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Stickstoffeinträgen zu erwarten ist.

Bereits im Jahr 2010 wurde zudem eine erste Analyse klimabedingter Auswirkungen auf die ökologischen Belastungsgrenzen im Freistaat Sachsen vorgelegt (SCHLUTOW et al. 2010). Für diese Studie wurden die damals noch verwendeten Szenarien „A1B nass“ und „A1B trocken“ betrachtet. Bei den CL zum Schutz vor Versauerung waren, übereinstimmend mit den Resultaten im KLAPS-Projekt, nur geringfügige klimabedingte Veränderungen im 21. Jahrhundert im Vergleich zum langjährigen Mittel 1971–2000 messbar. Wie im KLAPS-Projekt zeigten sich in der Studie von 2010 die klimabedingten Veränderungen bei den CL zum Schutz vor Eutrophierung deutlich ausgeprägter. Allerdings ist die Zunahme der Empfindlichkeit gegenüber dem Eutrophierungsrisiko (niedrigere CL) unter den im KLAPS-Projekt verwendeten Szenarien höher.

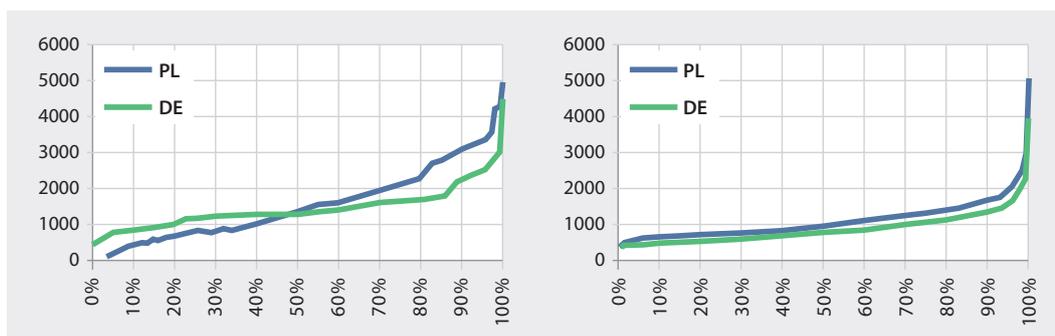


Abbildung 65
Vergleich der deutschen (DE) und polnischen Datensätze (PL) für CL_{maxS} (links) und CL_{nutN} (rechts) (MILL et al. 2013)

Auf europäischer Ebene existieren ebenfalls Prognosen über die Höhe des Anteils geschützter Ökosysteme bis 2020 (WEG 2013). **Abbildung 66** zeigt den Anteil der vor Versauerung geschützten Ökosysteme der Länder Deutschland, Polen und Tschechien im Vergleich zum KLAPS-Projektgebiet für die unterschiedlichen Klimazeiträume und Szenarien. Der Vergleich zeigt, dass im Projektgebiet sehr hohe Schutzziele von über 90% erreicht werden, während in Polen und vor allem Tschechien ein deutlich höheres Versauerungsrisiko besteht.

Beim Schutz vor Eutrophierung sind die bis zum Jahr 2020 zu erwartenden Fortschritte in den drei Ländern insgesamt, wie auch im KLAPS-Gebiet, vergleichsweise gering (**Abbildung 67**). Bestenfalls wird nur die Hälfte der Ökosysteme im Projektgebiet keinem Eutrophierungsrisiko mehr ausgesetzt sein. In Tschechien und Polen liegt der Anteil geschützter Ökosysteme sogar bei nur 20 bzw. 36%. Besonders deutlich zeigt sich der Einfluss klimatischer Änderungen, der im schlimmsten Fall (A1B, RCP8.5 im Zeitraum 2071–2100) eine Verminderung des Anteils der geschützten Ökosysteme um 20% gegenüber dem Basisklima (1971–2000) zur Folge hätte.

Abbildung 66
Anteil der im Jahr 2020 vor Versauerung geschützten Ökosysteme in Tschechien (CZ), Polen (PL) und Deutschland (DE) insgesamt (rot) sowie für das KLAPS-Gebiet unter den verwendeten Klimaszenarien (blau)

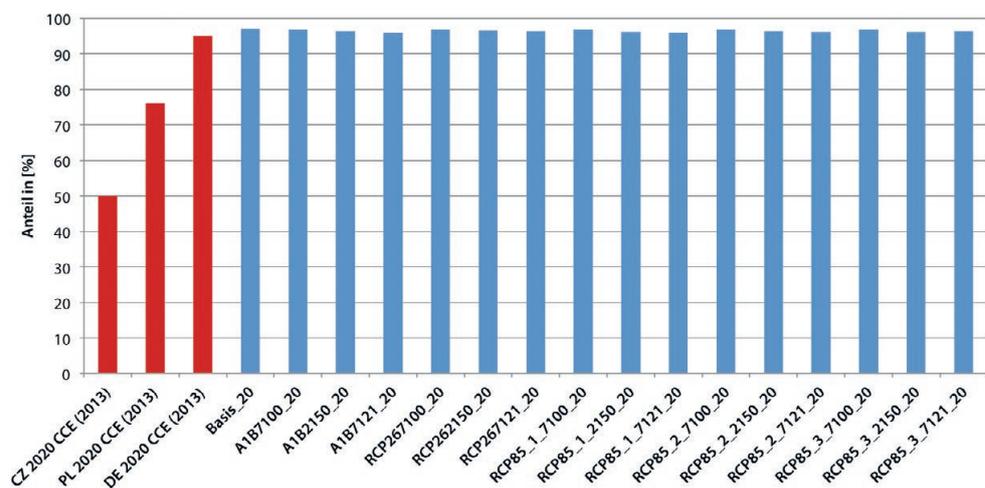
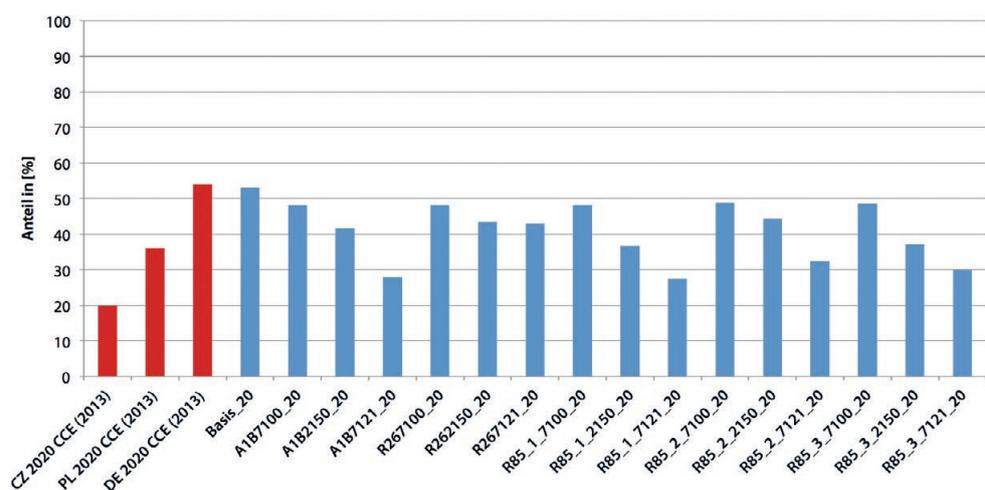


Abbildung 67
Anteil der im Jahr 2020 vor Eutrophierung geschützten Ökosysteme in Tschechien (CZ), Polen (PL) und Deutschland (DE) insgesamt (rot) sowie für das KLAPS-Gebiet unter den verwendeten Klimaszenarien (blau)





Zusammenfassung

Maßnahmen zur Luftreinhaltung und Minderung von Schadstoffen der letzten Jahrzehnte spiegeln sich im Projektgebiet anhand der ökologischen Belastungsgrenzen wieder. Die einst als „Schwarzes Dreieck“ bezeichnete Region unterliegt gegenwärtig kaum noch dem Risiko der Versauerung. Nur auf etwa 10% der Rezeptorfläche werden die Belastungsgrenzen überschritten. Gemäß zukünftigen Prognosen der Schwefeleinträge werden im Jahr 2030 nahezu alle Ökosysteme vor Versauerung geschützt sein. Demgegenüber ist der Anteil an Flächen, die dem Risiko einer Eutrophierung unterliegen, trotz deutlicher Stickstoffminderungen mit 60% im Jahr 2010 immer noch sehr hoch. Prognostizierte Abnahmen der Stickstoffemissionen lässt diesen Anteil im Jahr 2030 auf 40% sinken. Allerdings verlangt die internationale Konvention zum Schutz der Biodiversität (CBD), dass alle Ökosysteme vor dem Risiko der Versauerung und Eutrophierung zu bewahren sind.

Neben den rückgängigen Trends der Schadstoffeinträge im Projektgebiet zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass auch klimatische Veränderungen einen großen Einfluss auf die Critical Load zum Schutz vor Eutrophierung haben. Steigende Temperaturen und rückgängige Niederschlagssummen führen zu einer Zunahme der Empfindlichkeit von Ökosystemen gegenüber Stickstoffeinträgen, vor allem zum Ende des 21. Jahrhunderts. Insgesamt zeigen die vorliegenden Ergebnisse zum Eutrophierungsrisiko, dass sich stoffliche und klimatische Veränderungen gegenseitig kompensieren. So steigt in allen Szenarien der Anteil geschützter Ökosysteme im Zeitraum zwischen 2000 und 2030 infolge verminderter Stoffeinträge deutlich an. Unter der zusätzlichen Berücksichtigung klimatischer Veränderungen in den Zeiträumen 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 nimmt ihr Anteil jedoch ab. Den deutlichsten Effekt in dieser Hinsicht zeigt das Szenario RCP 8.5 (Lauf 1), während beim RCP 2.6 Szenario die Verminderung der Ökosystemempfindlichkeit am geringsten ausfällt. Im Mittel beträgt der Unterschied zwischen beiden Szenarien etwa $3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Überschlägig kann angenommen werden, dass nur etwa die Hälfte der durch Maßnahmen zur Luftreinhaltung erreichten Minderung von Schadstoffeinträgen dem Schutz des Ökosystems zu Gute kommt. Die andere Hälfte wird durch die höhere Empfindlichkeit des Ökosystems infolge des Klimawandels kompensiert. Klimatische Änderungen sollten daher in der zukünftigen Luftreinhaltepolitik zwingend berücksichtigt werden.



Literaturverzeichnis

Teil A

- BERNHOFER C., MATSCHULLAT J., BOBETH A. (Hrsg.), 2011, Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden. Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden. Heft 2. Rhombos Verlag: Berlin, Deutschland.
- BŁAŻEJCZYK, K., 2004, Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce. *Pr. Geogr.*, 192, 291.
- DEMIDOWICZ G., DEPUTAT T., GÓRSKI T., KRASOWICZ S., KUŚ J., 1999, Prawdopodobne zmiany w produkcji roślinnej w związku ze spodziewanymi zmianami klimatu Polski. W: *Zmiany i zmienność klimatu Polski*. Pr. zbior. Red. A. Dubicki, M. Gutry-Korycka, K. Kożuchowski, L. Starkel. Ogólnopolska konferencja naukowa, Łódź, 4–6 listopada 1999. Łódź. UŁ s. 43-48.
- EEA, 2012, Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. Report No 12/2012 [online]. [Dostęp 30.05.2014]. Dostępny w Internecie: www.eea.europa.eu/publications/climate-impacts-and-vulnerability-2012. ISBN 978-92-9213-346-7.
- GIORGI, F., 2008, Regionalization of climate change information for impact assessment and adaptation. *WMO Bulletin*, 57 (2), 86–92.
- HAWKINS E., SUTTON R., 2009, The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 1095-1107.
- HURRELL, J. W., 1995, Decadal trends in the North Atlantic Oscillation, regional temperatures and precipitation. *Science* 269, 676-679.
- HURRELL, J. W., VAN LOON, H., 1997, Decadal variations in climate associated with the North Atlantic oscillation. *Clim. Change* 36, 301-326.
- IPCC, 2007, Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- JACOB D., PODZUN R., 1997, Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorological Atmospheric Physics*, 63, 119-129.
- JAEGER, C., OPPENHEIMER, M., 2005, Emissions Pathways to Avoid Dangerous Climate Change – A Transatlantic View. *INTACT, Options for Future Climate Policy: Transatlantic Perspectives*, 7-17.
- KREIENKAMP, F., SPEKAT A., ENKE W., 2010, Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. *Desau: Umweltbundesamt*.
- KREIENKAMP, F., SPEKAT A., ENKE W., LFULG (Hrsg.), 2013, Klimaprojektionen im Projekt KLAPS. Publikationsreihe des EU-Projektes KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum, Dresden, 35 S.
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., 2013, IDP. Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse. Bedienungsanleitung. Version 3.6. Bericht, Potsdam: CEC Potsdam GmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LATIF, M., 2003, Simulation und Vorhersage von ENSO-Extremen. *promet*, Jahrgang 29, Nr. 1-4.
- MATZARAKIS A., 2007, Assessment method for climate and tourism based on daily data. In: A. Matzarakis, C.R. de Freitas, D. Scott (Eds.), *Developments in tourism climatology*, 52-58.
- MEHLER, S., VÖLLINGS, A., FLÜGEL, I., SZYMANOWSKI, M., BŁAŚ, M., SOBIK, M., MIGAŁA, K., WERNER, M., KRYZA, M., MISZUK, B., OTOP, I., KOLANEK, A., STROŃSKA, M., LFULG (Hrsg.), 2014, Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum. Publikationsreihe des EU-Projektes KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum, Dresden, 80 S.



- MICHALSKA, B., 2011, Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce. *Prace i Studia Geograficzne*. T. 47 s. 67-75.
- MOBERG, A. SONECHKIN, D.M., HOLMGREN, K., DATSENKO N.M., KARLÉN W., 2005, Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433, 613-617.
- MUNICH RE, 2002, Annual Review: Natural Catastrophes 2002. Topics, http://www.munichre.com/pdf/topics_2002_e.pdf
- NAKICENOVIC, N., SWART, R., 2000, Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- NIERÓBCA A., 2009, Skutki zmian klimatycznych dla rolnictwa w Polsce – ocena zagrożeń. W: *Zmiany klimatyczne a rolnictwo w Polsce – ocena zagrożeń i sposoby adaptacji*. Pr. zbior. Red. J. Kozyra, A. Nieróbca, K. Mizak. Puławy. IUNG-PIB.
- ORLOWSKY, B., GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P. C., 2007, STAR 2.0 – ein kombinatorischer Ansatz für regionale Klimasimulationen. Persönliche Mitteilung, 36 S.
- PARKER, W. S., 2011, When Climate Models Agree: The Significance of Robust Model Predictions. *Phil. Science*, 579-600.
- PAWLIK, Ł., 2012, Przekształcenia powierzchni stokowych w Sudetach w wyniku procesu saltacji wykrotowej. *Landform Analysis*, 20, 79-94.
- RAHMSTORF, S., SCHELLENHUBER H.J., 2006, *Der Klimawandel – Diagnose, Prognose, Therapie*. C.H. Beck, München, 144 S.
- RANDALLS, S., 2010, History of the 2°C climate target. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 598-606. DOI: 10.1002/wcc.62.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (Hrsg.), 2005, *Klimawandel in Sachsen. Sachstand und Ausblick*. Dresden.
- SCHÖNWIESE, C.D., 1992, *Klima im Wandel, Tatsachen, Irrtümer, Risiken*. Deutsche-Verlags-Anstalt GmbH, 223 S.
- SCHÖNWIESE, C.D., 2003, *Klimatologie*. 2. Aufl., Verlag Ulmer, Stuttgart.
- SPEKAT, A., ENKE W., KREIENKAMP, F., 2007, Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG. Dessau: Umweltbundesamt.
- TAUBENHEIM, J., 1969, *Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.
- VAN DER LINDEN P, MITCHELL J.F.B. (eds), 2009, ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 160 pp.; http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), 2013, *WMO greenhouse gas bulletin – The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2012*. No. 9, Geneva, Switzerland, 4 pp.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), 2014, *Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2012)*. WMO-No. 1123, Geneva, Switzerland.
- ŻMUDZKA E., 2012, Wieloletnie zmiany zasobów termicznych w okresie wegetacyjnym i aktywnego wzrostu roślin w Polsce. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 12. Z. 2 (38) s. 377-389.

Teil B

- AMANN, M., BERTOK, I., BORKEN-KLEEFELD, J., COFALA, J., HEYES, C., HOEGLUND-ISAKSSON, L., KLIMONT, Z., NGUYEN, B., POSCH, M., RAFAJ, P., SANDLER, R., SCHOEPP, W., WAGNER, F., WINIWARDER, W., 2011, Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications. *Environmental Modelling & Software*, 26(12):1489-1501.
- ASMAN, W.A.H., SUTTON, M.A., SCHJORRING, J.K., 1998, Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition. *New Phytologist* 139, 27-48.

- BARRETT, K., SELAND, O., 1995, European Transboundary Acidifying Air Pollution – Ten Years Calculated Field and Budgets to the End of the First Sulphur Protocol. EMEP 1/95. Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway.
- DORE, A.J., CHOULARTON, T.W., FOWLER, D., 1992, An improved wet deposition map of the United Kingdom incorporating the topographic dependence of rainfall concentrations. *Atmos. Environ.* 26A, 1375-1381.
- DORE, A.J., VIENO, M., FOURNIER, N., WESTON, K.J., SUTTON, M.A., 2006, Development of a new windrose for the British Isles using radiosonde data, and application to an atmospheric transport model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (2006), 132, pp. 2769-2784.
- EEA, 2013, EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013. Technical report No 12/2013.
- EMEP/CEIP, 2014, Present state of emissions as used in EMEP models. http://www.ceip.at/webdab_emep-database/emissions_emepmodels/
- FLETCHARD, C.R., NEMITZ, E., SMITH, R.I., et al., 2011, Dry deposition of reactive nitrogen to European ecosystems: a comparison of inferential models across the NitroEurope network. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 2703-2728.
- FOURNIER, N., DORE, A.J., VIENO, M., WESTON, K.J., DRAGOSITS, U., SUTTON, M.A., 2004, Modelling the deposition of atmospheric oxidised nitrogen and sulphur to the UK using a multi-layer long-range transport model. *Atmos. Environ.* 38, 683-694.
- KRYZA, M., WERNER, M., BŁAŚ, M., DORE, A.J., SOBIK, M., 2010, The effect of emission from coal combustion in non-industrial sources on deposition of sulfur and oxidised nitrogen in Poland. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 60, 856-866.
- KUENEN, J. H., DENIER VAN DER GON, A., VISSCHEDIJK VAN DER BRUGH, H., 2011, High resolution European emission inventory for the years 2003-2007. TNO report TNO-060-UT-2011-00588, Utrecht. <https://gmes-atmosphere.eu/documents/deliverables/d-emis/>
- KOBIZE, 2012, Raport Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NMLZO, NH₃, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 2009-2010 w układzie klasyfikacji SNAP i NFR, Warszawa 2012.
- SINGLES, R.J., SUTTON, M.A., WESTON, K.J., 1998, A multi-layer model to describe the atmospheric transport and deposition of ammonia in Great Britain. *Atmos. Environ.* 32, 393-399.
- SURKE, M., HEIDENREICH, M., GOLDBERG, V., LfULG (Hrsg.), 2013, Erstellung von Windrosen im Rahmen von KLAPS. Publikationsreihe des EU-Projektes KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum, Dresden, 32 S.
- SZYMANOWSKI M., KRYZA M., SPALLEK W., 2013, Regression-based air temperature spatial prediction models: an example from Poland. *Meteorologische Zeitschrift* (in press)
- SIMPSON D., BENEDICTOW A., BERGE H., BERGSTROEM R., EMBERSON L.D., FAGERLI H., FLECHARD C.R., HAYMAN G.D., GAUSS M., JONSON J.E., JENKIN M.E., NYIRI A., RICHTER C., SEMEENA V.S., TSYRO S., TUOVINEN J.P., VALDEBENITO A., WIND P., 2012, The EMEP-MS-CW chemical transport model – technical description, *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 7825-2865.

Teil C

- EEA, 2014, Effects of air pollution on European ecosystems. EEA Technical report 11/2014, European Environment Agency (<http://www.eea.europa.eu/publications/effects-of-air-pollution-on>) veröffentlicht 30. Juni 2014.
- ESDB v2.0, 2004, The European Soil Database distribution version 2.0. European Commission and the European Soil Bureau Network, CD-ROM, EUR 19945 EN.
- MILL, W., PECKA T., ULACZYK R., 2013, Opracowanie map ładunków krytycznych i wykonanie analizy przekroczeń ładunków krytycznych na obszarze wsparcia w kontekście zmian klimatu i modelowanej informacji o depozycji związków siarki i azotu na potrzeby projektu KLAPS.
- NAGEL, H.-D., SCHEUSCHNER, T., SCHLUTOW, A., WEIGELT-KIRCHNER, A., LfULG (Hrsg.), 2014, Ökologische Belastungsgrenzen von Ökosystemen. Publikationsreihe des EU-Projektes KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum, Dresden, 61 S.
- SCHLUTOW, A., NAGEL, H.-D., SCHEUSCHNER, T., WEIGELT-KIRCHNER, A., LfULG (Hrsg.), 2010, Ökologische Belastungsgrenzen unter Einfluss des Klimawandels. LfULG Schriftenreihe, Heft 12, Dresden, 134 S.



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	
Rekonstruktion des mittleren Temperatur- und Niederschlagsverlaufs der Erde seit 3,8 Milliarden Jahren	7
Abbildung 2	
Schematische Darstellung der die Eiszeitzyklen antreibenden Änderungen der Erdumlaufbahn (Milankovitch-Zyklen)	8
Abbildung 3	
Globale mittlere Lufttemperaturanomalie relativ zu 1901–1950	8
Abbildung 4	
Anzahl der gemeldeten Naturkatastrophen 1900 bis 2012	8
Abbildung 5	
Schematische Darstellung des Downscaling	11
Abbildung 6	
Anschauliche Darstellung der IPCC-Szenarien	12
Abbildung 7	
Zeitliche Entwicklung des anthropogenen Strahlungsantriebs gegenüber dem vorindustriellen Niveau (1765) zwischen 2000 und 2300 unter RCP-Szenarien	12
Abbildung 8	
Prinzip der Bildung von Zirkulationsmustern	14
Abbildung 9	
Zuordnung der verwendeten Modelle und Szenarien	15
Abbildung 10	
Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur 1971–2000 und Änderung der Jahresgänge unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6, RCP8.5 im Vergleich zum Jahresgang der Beobachtungswerte (Beo) 1971–2000	16
Abbildung 11	
Jährliche Änderung der mittleren Lufttemperatur 1971–2100 unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	17
Abbildung 12	
Jahresgang der Lufttemperatur 2021–2050 und 2071–2100 sowie Änderung im Jahresgang gegenüber 1971–2000 im Projektgebiet für die Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	17
Abbildung 13	
Verteilung der jährlichen und jahreszeitlichen Temperaturänderung 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 im Projektgebiet	19
Abbildung 14	
Änderung der mittleren Lufttemperatur für die Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 für 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 im Projektgebiet	22
Abbildung 15	
Bandbreite der projizierten Änderung von klimatischen Kenntagen und Kältesumme im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 am Beispiel Görlitz für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	24

Abbildung 16 Änderungen von klimatischen Kenntagen 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 im Tiefland und in den Kammlagen für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	25
Abbildung 17 Höhenabhängige Änderung der Kältesumme 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	27
Abbildung 18 Höhenabhängige Änderung der Häufigkeit von Hitzeperioden und Andauer Frost- und frostfreier Perioden 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	28
Abbildung 19 Änderungssignal der Wachstumsgradtage im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	29
Abbildung 20 Entwicklung der Wachstumsgradtage im Zeitraum 1971–2100 an ausgewählten Klimastationen unter den Klimaszenarien a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5	29
Abbildung 21 Änderungssignal der Summe der aktiven Temperaturen im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	30
Abbildung 22 Entwicklung der Summe der aktiven Temperaturen im Zeitraum 1971–2100 an ausgewählten Klimastationen unter den Klimaszenarien A) A1B, B) RCP2.6 und C) RCP8.5	31
Abbildung 23 Änderungssignal des Hdyrothermalen Koeffizienten nach Selyaninov im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	32
Abbildung 24 25 UTCI-Werte an ausgewählten Klimastationen im Zeitraum 1971–2100	33
Abbildung 25 Änderung der Häufigkeit der thermischen Belastung im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter A1B	34
Abbildung 26 Änderung der Häufigkeit der thermischen Belastung im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter RCP2.6.....	35
Abbildung 27 Änderung der Häufigkeit der thermischen Belastung im Zeitraum 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter RCP8.5	35
Abbildung 28 Änderung des mittleren täglichen WSI für Sonnenbäder an den Stationen Görlitz und Śnieżka 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5	36
Abbildung 29 Änderung des mittleren täglichen WSI für Luftbäder an den Stationen Görlitz und Śnieżka 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5	37



Abbildung 30 Änderung des mittleren täglichen WSI für leichte Freizeitaktivitäten an den Stationen Görlitz und Śnieżka 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5	38
Abbildung 31 Änderung des mittleren täglichen WSI für intensive Freizeitaktivitäten an den Stationen Görlitz und Śnieżka 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 unter a) A1B, b) RCP2.6 und c) RCP8.5	39
Abbildung 32 CTIS für Lindenberg und Śnieżka in den Zeiträumen a) 1971–2000, b) 2021–2050 und c) 2071–2100 unter A1B	40
Abbildung 33 CTIS für Lindenberg und Śnieżka in den Zeiträumen a) 1971–2000, b) 2021–2050 und c) 2071–2100 unter RCP2.6	41
Abbildung 34 CTIS für Lindenberg und Śnieżka in den Zeiträumen a) 1971–2000, b) 2021–2050 und c) 2071–2100 unter RCP8.5	42
Abbildung 35 Waldsterben infolge von Versauerung im Riesengebirge	45
Abbildung 36 FRAME-Modellgebiet und verwendete Landnutzungsklassen (CORINE 2006)	47
Abbildung 37 Mittlere jährliche NO _x - und SO _x -Emissionen im KLAPS-Projektgebiet im Jahr 2010	49
Abbildung 38 Veränderung der SO ₂ -, NO _x - und NH ₃ -Emissionen im KLAPS-Projektgebiet im Zeitraum 2000–2030	50
Abbildung 39 Windrose der mittleren Häufigkeit der Windrichtung und harmonisches Mittel der Windgeschwindigkeit im Projektgebiet im Jahr 2010 und im Zeitraum 1996–2009	51
Abbildung 40 Mittlere jährliche Niederschlagsverteilung im KLAPS-Projektgebiet im Jahr 2010	52
Abbildung 41 Räumliche Verteilung der verwendeten Messstationen	53
Abbildung 42 Mittlere jährliche Deposition von Sulfat durch Niederschlag für ausgewählte Stationen im Zeitraum 1999–2011 an ausgewählten chemischen Messstationen in Deutschland, Tschechien und Polen	54
Abbildung 43 Mittlere jährliche Deposition von Nitratstickstoff durch Niederschlag für ausgewählte Stationen im Zeitraum 1999–2011 an ausgewählten chemischen Messstationen in Deutschland, Tschechien und Polen	54
Abbildung 44 Mittlere jährliche Deposition der Wasserstoffionenkonzentration im Niederschlag für ausgewählte Stationen im Zeitraum 1999–2011 an ausgewählten chemischen Messstationen in Deutschland, Tschechien und Polen	55
Abbildung 45 Mittlere jährliche Deposition von Ammoniumnitrat durch Niederschlag im Zeitraum 1999–2011 an ausgewählten chemischen Messstationen in Deutschland, Tschechien und Polen	56

Abbildung 46	
Vergleich der FRAME-Modellergebnisse mit den Messungen der Deposition von reduziertem Stickstoff, oxidiertem Stickstoff und Schwefel	57
Abbildung 47	
Vergleich der FRAME-Modelldaten mit den IMGW-Daten der nassen Deposition von a) Schwefel, b) oxidiertem Stickstoff und c) reduziertem Stickstoff	59
Abbildung 48	
Menge der trockenen (dry) und nassen (wet) Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen im KLAPS-Projektgebiet, berechnet mit FRAME und EMEP für das Jahr 2010	60
Abbildung 49	
Trockene und nasse Deposition von a) Schwefel, b) oxidiertem Stickstoff und c) reduziertem Stickstoff für das Basisjahr 2010	62
Abbildung 50	
Gesamtdeposition von a) Schwefel und b) reduziertem Stickstoff im Jahr 2000 und 2010	63
Abbildung 51	
Gesamtdeposition von a) Schwefel und b) reduziertem Stickstoff im Jahr 2020 und 2030	64
Abbildung 52	
Depositionsbudget im KLAPS-Projektgebiet für Schwefel- und Stickstoffverbindungen für die Jahre 2010–2030	65
Abbildung 53	
Höhe der Schwefeldeposition unter verschiedenen Klimaszenarien und Depositionsprognosen im Jahr 2020 und 2030 im KLAPS-Projektgebiet	65
Abbildung 54	
Critical Load als Grenz- und Zielwerte in der Luftreinhaltepolitik	67
Abbildung 55	
Verwendete Landnutzungsklassen im Projektgebiet (CORINE2006)	68
Abbildung 56	
Verwitterungsraten basischer Kationen im Projektgebiet	68
Abbildung 57	
Depositionstrend verschiedener Schadstoffe im KLAPS-Projektgebiet im Zeitraum 2000 bis 2030	69
Abbildung 58	
Critical Load zum Schutz vor Versauerung (CL _{max,S}) auf Basis von Klimadaten im Zeitraum 1971–2000	71
Abbildung 59	
Critical Load zum Schutz vor Eutrophierung auf Basis von Klimadaten im Zeitraum 1971–2000	71
Abbildung 60	
Critical Load im Klimaszenario RCP2.6 und RCP8.5 Lauf 1 in den Zeiträumen 1971–2000, 2021–2050 und 2071–2100	72
Abbildung 61	
Überschreitung der Critical Load für Versauerung in Abhängigkeit der Depositionsszenarien 2000–2030	73



Abbildung 62 Anteil der Ökosysteme mit einem Eutrophierungsrisiko in Polen, Tschechien und Deutschland (EEA 2014)	73
Abbildung 63 Überschreitung der Critical Load für Eutrophierung in Abhängigkeit der Depositionsszenarien 2000–2030	74
Abbildung 64 Risikoklassen der Eutrophierung von Ökosystemen in Abhängigkeit von Schadstoffeinträgen und klimaabhängigen Critical Load unter RCP2.6 und RCP8.5 Lauf 1	74
Abbildung 65 Vergleich der deutschen und polnischen Datensätze für CL_{maxS} und CL_{nutN}	75
Abbildung 66 Anteil der im Jahr 2020 vor Versauerung geschützten Ökosysteme in Tschechien, Polen und Deutschland insgesamt sowie für das KLAPS-Gebiet unter den verwendeten Klimaszenarien	76
Abbildung 67 Anteil der im Jahr 2020 vor Eutrophierung geschützten Ökosysteme in Tschechien, Polen und Deutschland insgesamt sowie für das KLAPS-Gebiet unter den verwendeten Klimaszenarien	76



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Die größten Naturkatastrophen in Deutschland und Polen 1900 bis 2014 sortiert nach der Anzahl der betroffenen Personen	10
Tabelle 2 Charakterisierung des verwendeten Regionalmodells WETTREG für das Projekt KLAPS	13
Tabelle 3 Szenariobedingte Bandbreite der jährlichen und jahreszeitlichen Änderung der Lufttemperatur 2021 – 2050 und 2071 – 2100 gegenüber 1971 – 2000 in den verschiedenen Höhenstufen	20
Tabelle 4 Mittlere Anzahl klimatischer Kenntage 1971 – 2000 (Modell) je Höhenstufe	24
Tabelle 5 Höhenabhängige Änderung klimatischer Kenntage 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	26
Tabelle 6 Klassifizierung zur Beurteilung der Winterstrenge (SMUL 2008)	26
Tabelle 7 Mittlere Kältesumme 1971–2000 (Modell) und höhenabhängige Änderung der Kältesumme 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	26
Tabelle 8 Mittlere Häufigkeit der Hitzeperioden und Andauer von Frost- und frostfreien Perioden 1971–2000 (Modell) sowie höhenabhängige Änderung der Häufigkeit und Andauer in den Zeiträumen 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 für die Szenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5	27
Tabelle 9 Klassifizierung der Höhenstufen im Projektgebiet und zugehörige Klimastationen	28
Tabelle 10 Wassererfügbarkeit für die Vegetation in Abhängigkeit vom HTC-Wert	31
Tabelle 11 Übersicht der Emissionen [Gg*] für Polen (KOBIZE 2012) und Anteil [%] der in FRAME eingehenden Emissionen je SNAP-Kategorie im KLAPS-Projektgebiet	48

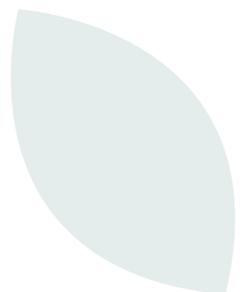




Tabelle 12	
Übersicht der Emissionen [Gg*] für Sachsen im Jahr 2010 und Anteil [%] der in FRAME eingehenden Emissionen je SNAP-Kategorie im KLAPS-Projektgebiet	48
Tabelle 13	
Gesamtmenge der SO₂-, NO_x- und NH₃-Emissionen im KLAPS-Projektgebiet im Jahr 2010 [Gg]	50
Tabelle 14	
Datenverfügbarkeit der verwendeten Messstationen der Depositionsmessnetze (1 = Messstationen im und in direkter Nähe des Projektgebiets)	53
Tabelle 15	
Zusammenfassung der Fehlerstatistiken der FRAME-Modellergebnisse (nasse Deposition) für das Jahr 2010	58
Tabelle 16	
Zusammenfassung aller Modellläufe und der genutzten Eingangsdaten	60
Tabelle 17	
Statistische Auswertung der klimatisch bedingten Änderung der Critical Load zum Schutz vor Eutrophierung	72



Impressum

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Redaktion:

Susann Schwarzak, Maciej Kryzka, Irena Otop

Umschlagfoto:

Kohlekraftwerk Jänschwalde (iStock photo)
Wald (Andreas Völlings)
Wolken (Robert Kneschke)

Gestaltung und Satz:

Hoch3 GmbH, Berlin

Druck:

Laserline, Berlin

Redaktionsschluss:

30.10.2014

Auflage:

200 Exemplare

Papier:

FSC-zertifiziertes Papier

Bezug:

Diese Druckschrift kann kostenfrei bezogen werden bei:
Zentraler Broschürenversand der Sächsischen Staatsregierung
Hammerweg 30, 01127 Dresden
Telefon: +49 351 2103-671
Telefax: +49 351 2103-681
E-Mail: publikationen@sachsen.de
www.publikationen.sachsen.de

Verteilerhinweis:

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von politischen Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

ISBN: 978-83-64979-01-9

