



FAKTENBLATT: Klimawandel, Luftverschmutzung und Ökosysteme im polnisch-sächsischen Grenzraum

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





Vorwort

Das EU-Projekt KLAPS (Klimawandel, Luftverschmutzung und ökologische Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum) untersucht grenzüberschreitende Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und der Konzentration und Deposition von Luftschadstoffen, der überregionalen Beeinflussung ökologischer Belastungsgrenzen und dem Einfluss auf die Bevölkerung, den Tourismus oder die Landwirtschaft. Das vorliegende Heft fasst in kurzer und prägnanter Form die Ergebnisse aus dem Projekt KLAPS zusammen. Dabei werden Informationen über aktuelle und zukünftig mögliche klimatische und lufthygienische Trends sowie die Folgen des Klimawandels zielgruppengerecht aufgezeigt. Eine detaillierte Darstellung der Methodik und Ergebnisse kann in den Projektberichten „Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum“ (MEHLER et al. 2014) und „Klimaprojektionen, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen“ (SCHWARZAK et al. 2014) nachgelesen werden.

Finanziert wird das Projekt KLAPS als INTERREG IV A-Vorhaben aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionalentwicklung (EFRE). Das Projekt wird im Rahmen des operationellen Programms der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit Sachsen – Polen 2007–2013 umgesetzt und durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Lead Partner), die Universität Wrocław, Institut für Geographie und Regionalentwicklung und das Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft – Nationales Forschungsinstitut in Wrocław, durchgeführt.

Wesentliches Ziel des Projektes ist der Wissenstransfer und die Sensibilisierung der Öffentlichkeit sowie der betroffenen Akteure für die Anpassung und den Schutz an den Klimawandel im polnisch-sächsischen Grenzraum.



Regionaler Klimawandel

Allgemeine Einordnung

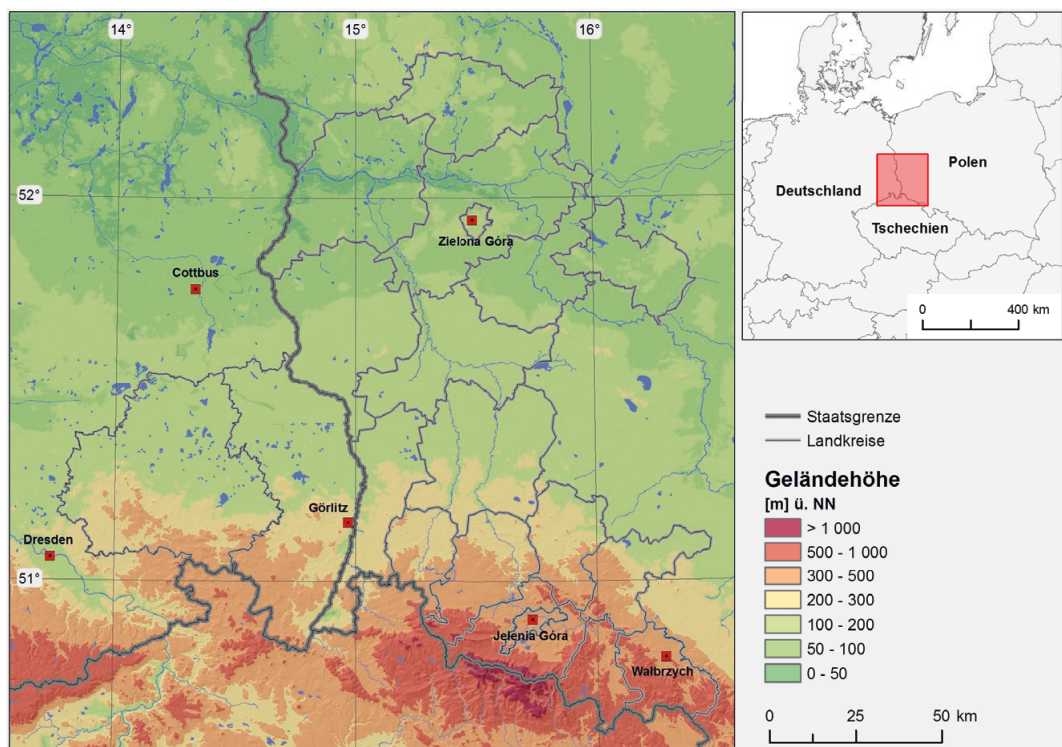
Die KLAPS-Projektregion (Abbildung 1) lässt sich großklimatisch dem Übergangsklima zwischen maritimem westeuropäischem und kontinentalem osteuropäischem Klima der Westwindzone zuordnen.

Regionale klimatische Unterschiede werden entscheidend durch die Höhe sowie die Lage der Mittelgebirge wie Erzgebirge, Zittauer Gebirge, Isergebirge und Riesengebirge im Süden der Projektregion bestimmt. Während mit zunehmender Höhe die Lufttemperatur abnimmt, steigt die Niederschlagsmenge an. Somit beträgt beispielsweise die mittlere Lufttemperatur im Zeitraum 1971–2000 im Tiefland an der Station Lindenberg 9,2°C, an der Schneekoppe werden 0,8°C ermittelt (Abbildung 2). Entsprechend der Hauptwindrichtung West-Südwest beeinflussen topographische Staueffekte und damit verbundene Wol-

ken- und Niederschlagsbildung an den Luvseiten (windzugewandte Seite) sowie Abschattungseffekte mit verstärkter Wolkenauflösung und Niederschlagsarmut an den Leeseiten (windabgewandte Seite) die Verteilung des Niederschlags. Innerhalb des Projektgebietes führt dies zu einer relativen Niederschlagsarmut im Osterzgebirge und einem relativen Niederschlagsreichtum im Iser- und Riesengebirge in der gleichen Höhenlage.

Weitere topographische Einflüsse zeigen sich in der Klimavariabilität kleinräumiger Geländeformen (z. B. Kaltluftseen, Inversionswetterlagen), die eine besonders große Bedeutung für die Landwirtschaft oder Luftverschmutzung haben. Des Weiteren treten bevorzugt bei Süd-Südwestanströmung föhnartige Effekte auf, die zu einem Anstieg der Lufttemperatur an der Nordseite der Mittelgebirge führen, wohingegen an den Südseiten deutlich

Abbildung 1
KLAPS-Projektgebiet



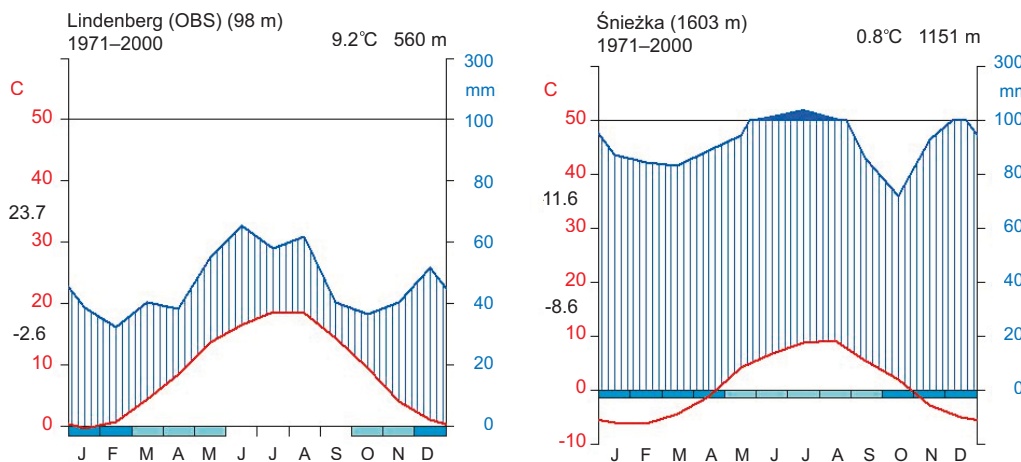


Abbildung 2
 Klimadiagramme nach
 WALTER/LIETH für den
 Zeitraum 1971–2000
 (links = Monatsmittel
 $(T_x+T_n)/2$ der Temperatur
 (rot), Werte links=
 Monatsmittel der
 Maximumtemperatur des
 wärmsten Monats (oben)
 und Monatsmittel der
 Minimumtemperatur des
 kältesten Monats (unten),
 rechts = Monatsmittel
 Niederschlag (blau),
 unten = frostsichere
 Monate (dunkelblau),
 frostgefährdete Monate
 (hellblau))

kühlere Temperaturen vorherrschen. Demgegenüber bedingt der Böhmischer Wind im Neiße- und Elbtal als auch entlang des Brama Lubawska und des Kamienna-Góra-Talbeckens bis zum Ostrand des Riesengebirges deutlich kältere Temperaturen, eine Verlängerung der Schneedeckendauer oder verspätetes Tauwetter im Vergleich zu den übrigen niederen Lagen im Projektgebiet.

Klimabeobachtung

Langfristige meteorologische Messungen in Mitteleuropa belegen, dass sich das Klima verändert und die Lufttemperatur seit 1900 bereits um 1 °C angestiegen ist. Auch der polnisch-sächsische Grenzraum ist durch den Klimawandel betroffen. Analysen zeigen einen signifikanten absoluten Erwärmungstrend der mittleren Lufttemperatur von +1,1 °C im Zeitraum 1971–2010. Der stärkste Trend von +1,6 °C bzw. +1,8 °C wird im Frühjahr und Sommer beobachtet, während im Herbst und Winter moderatere Erwärmungstrends von +1,0 °C bzw. +0,2 °C berechnet werden.

Im Trendverhalten klimatologischer Kenngrößen (z. B. Sommertage, heiße Tage, Frosttage) spiegelt sich die Zunahme der Temperatur wider (Tabelle 1). So zeigen beispielsweise Sommer- und heiße Tage signifikante Zunahmen im Projektgebiet. Dagegen verläuft die beobachtete Entwicklung der Frost- und Eistage gegenläufig und ist nicht signifikant. Etwa vier Wochen länger dauert die thermische Vegetationsperiode an und auch die Dauer der frostfreien Periode hat deutlich zugenommen. Im Gegensatz dazu weist die leichte Zunahme der Frostperiodendauer darauf hin, dass Spätfrostgefährdung trotz Erwärmungstrend durchaus auftreten kann.

Beim Niederschlag werden sowohl im Sommer als auch im Winterhalbjahr zunehmende Trends von +20 mm bzw. +42 mm beobachtet. Gleichzeitig nehmen Trockenperioden von mindestens elf Tagen Länge sowie Starkniederschlagsereignisse im Sommer leicht zu. Aufgrund zunehmender Globalstrahlung steigt die mittlere jährliche potentielle Verdunstung im Projektgebiet um +69 mm an. Für die klimatische Wasserbilanz, welche sich aus den Größen Niederschlag abzüglich potentieller Verdunstung berechnet, wird bereits gegenwärtig ein negativer Trend von -88 mm im Sommerhalbjahr beobachtet. Dieses Wasserdefizit kann nicht durch die positiven Trends im Winter ausgeglichen werden.

Tabelle 1

Mittelwerte der Klimakenngrößen im Zeitraum 1971–2000 und absoluter Trend und Spannweite (Tiefend und Kammlagen) im Zeitraum 1971–2010¹

Größe	Beschreibung	Einheit	Mittelwert 1971 – 2000	absoluter Trend 1971 – 2010
Mittlere Jahrestemperatur	Januar bis Dezember	°C	7,5 (9,0 – 3,6)	1,1 (1,2 – 1,2)
Temperatur Frühjahr	März bis Mai	°C	7,1 (8,6 – 2,7)	1,6 (1,8 – 1,7)
Temperatur Sommer	Juni bis August	°C	16,0 (17,6 – 11,7)	1,8 (1,8 – 1,8)
Temperatur Herbst	September bis November	°C	7,6 (9, – 3,9)	1,0 (1,0 – 1,1)
Temperatur Winter	Dezember bis Februar	°C	-0,8 (0,6 – -4,2)	0,2 (0,5 – 0,3)
Anzahl Sommertage	$T_{\max} > 25\text{ °C}$	d	28 (41 – 4)	12 (16 – 3)
Anzahl heiße Tage	$T_{\max} > 30\text{ °C}$	d	5 (8 – 0)	3 (6 – 0)
Anzahl Tropennächte	$T_{\min} > 20\text{ °C}$	d	0,4 (0,5 – 0)	0,4 (0,4 – 0,1)
Anzahl Frosttage	$T_{\min} < 0\text{ °C}$	d	110 (88 – 170)	-6 (0,6 – -23)
Anzahl Eistage	$T_{\max} < 0\text{ °C}$	d	38 (21 – 84)	3 (2 – -7)
Kältesumme	$\Sigma T < 0\text{ °C}$, 1.11.–31.03.	-	256 (165 – 554)	5 (-6 – -53)
Hitzeperiode	mind. 6 Tage mit $T_{\max} > 90\%$ -Perzentil 1971–2000	Anzahl	0,6 (0,6 – 0,7)	1 (1,4 – 0,8)
Dauer Frostperiode	Anzahl Tage zw. erstem und letztem Frosttag	d	32 (23 – 63)	4 (3 – 6)
Dauer frostfreie Periode	Anzahl Tage zw. erstem und letztem frostfreien Tag	d	163 (173 – 127)	23 (30 – 16)
Dauer thermische Vegetationsperiode	Anzahl Tage, wenn $T_{\text{mit}} > 5\text{ °C}$ an mind. 6 Tagen	d	221 (253 – 142)	28 (34 – 39)
Niederschlag Sommerhalbjahr (SHJ)	April bis September	mm	465 (350 – 634)	20 (31 – -21)
Niederschlag Winterhalbjahr (WHJ)	Oktober bis März	mm	373 (258 – 548)	42 (31 – 45)
Trockenperioden SHJ	min. 11 d < 1 mm Niederschlag	Anzahl	2,0 (2,4 – 1,2)	0,3 (0,3 – 0,2)
Tage mit Starkniederschlag SHJ	Niederschlag über 99%-Perzentil	d	0,7 (0,6 – 0,8)	0,2 (0,2 – -0,3)
Tage mit Starkniederschlag WHJ	Niederschlag über 99%-Perzentil	d	0,7 (0,6 – 0,9)	-0,3 (-0,5 – -0,2)
Potenzielle Verdunstung	nach Ansatz von Turc-Wendling	mm	605 (661 – 518)	69 (69 – 62)
Klimatische Wasserbilanz SHJ	Niederschlag – pot. Verdunstung	mm	-44 (-116 – 543)	-88 (-52 – -159)
Klimatische Wasserbilanz WHJ	Niederschlag – pot. Verdunstung	mm	189 (78 – 371)	33 (14 – 78)
Sonnenscheindauer	Sonnenstunden	h	1492 (1653 – 1377)	252 (246 – 215)

¹ Ergänzung der Tabelle 1 unter Verwendung der Ergebnisse aus dem EU-Projekt NEYMO
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22580>



Größe	Beschreibung	Einheit	Mittelwert 1971 – 2000	absoluter Trend 1971 – 2010
Wachstumsgradtage	$\sum_{01.04.}^{31.10.} \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - 10^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	954 (1106 – 38)	214 (265 – 120)
Summe der aktiven Temperaturen	$\sum_{01.04.}^{31.10.} \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \geq 10^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	2579 (2871 – 379)	419 (496 – 281)
Hydrothermaler Koeffizient nach Selyaninov	$\text{HTC} = R / 0,1 \Sigma T$	-	0,94 (0,56 – 4,04)	0,03 (0,24 – -1,53)

Tabelle 2
Mittelwerte der agrarmeteorologischen Kenngrößen im Zeitraum 1971–2000 und absoluter Trend und Spannweite (Tiefland und Kammlagen) im Zeitraum 1971–2010 auf Basis von Rasterdaten

Agrarmeteorologie

Die Agrarmeteorologie untersucht die Zusammenhänge zwischen hydrologischen und meteorologischen Grundlagen und ihren Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft. Temperaturabgeleitete agrarmeteorologische Indikatoren wie die Wachstumsgradtage bzw. die Summe der aktiven Temperaturen zeigen ebenfalls einen signifikant positiven Trend von +214 °C bzw. +419 °C im Zeitraum 1971–2010 (Tabelle 2). Besonders deutlich verhält sich der Trend im Tiefland, während er im Bergland geringer ausfällt. Neben räumlichen Schwankungen zwischen den Regionen im Tiefland und den Kammlagen existiert eine hohe Jahr-zu-Jahr-Variabilität.

Anhand des dimensionslosen Dürreindicators Hydrothermaler Koeffizient von Selyaninov (HTC), der auf der Lufttemperatur und der Niederschlagssumme während der Wachstumsperiode basiert, können die hydroklimatischen Bedingungen für die Vegetation bestimmt werden. Gemäß Klassifikation lassen sich für die Regionen im Tiefland bereits gegenwärtig trockene Bedingungen ($\text{HTC} < 1$) beobachten. In den höheren Lagen herrschen aufgrund höherer Niederschlagsmengen dagegen feuchte Bedingungen ($\text{HTC} > 1,3$) vor. Während der absolute Trend eine leichte Zunahme im Tiefland aufweist, zeigt der Trend für die Kammlagen eine deutlich negative Richtung mit -1,53 auf.

Bioklimatologie

Die Bioklimatologie oder Biometeorologie erforscht die Zusammenhänge zwischen dem Wetter und verschiedenen Ökosystemen und Organismen, einschließlich des menschlichen Körpers. Klima und Witterungsbedingungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die bioklimatische als auch touristische Eignung an einem Ort. Anhand des bioklimatischen Indicators Universal Thermal Climate Index (UTCI) wird die räumliche und zeitliche Variabilität der biothermischen Bedingungen im Projektgebiet veranschaulicht (Abbildung 3). Im Tiefland und Vorland der Mittelgebirge tritt vor allem während der kalten Jahreszeit „moderater Kältestress“ (-13 bis 0 °C) auf. „Starker Kältestress“ (-27 bis -13 °C) ist kaum zu beobachten, während im Sommer vor allem im Juli und August „moderate Wärmebelastung“ (26 bis 32 °C) festgestellt wird. In den höheren Lagen nimmt die Häufigkeit von „starkem Kältestress“ aufgrund sinkender Temperaturen und höheren Windgeschwindigkeiten deutlich zu. Im Sommer herrscht vorwiegend „thermische Behaglichkeit“ (9 bis 26 °C), „Wärmebelastung“ ist in den Mittelgebirgen nicht zu beobachten. Generell lässt sich ein signifikant positiver Trend des UTCI im Zeitraum 1971–2010 berechnen (z. B. Lindenberg: +1,7 °C), wofür maßgeblich der positive Temperaturentrend verantwortlich ist.

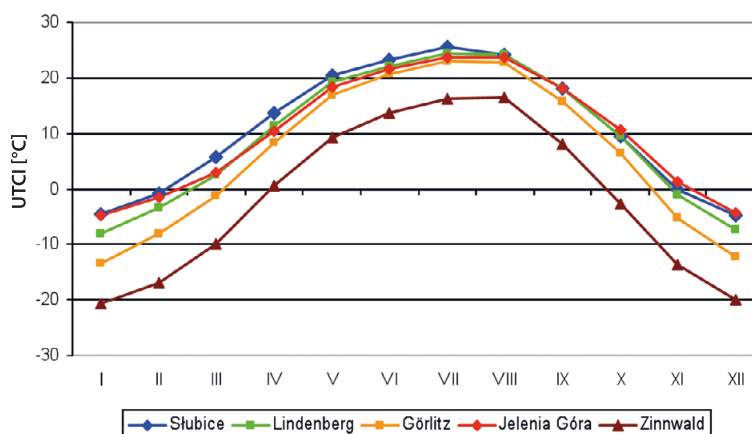


Abbildung 3
Mittlerer Jahresgang des UTCI an ausgewählten Klimastationen im Zeitraum 1971–2010

Anhand des biothermischen Tourismus-Klimaindex (TCI) kann das touristische Erholungspotential (ausgenommen Wintersportaktivitäten) bestimmt werden (Tabelle 3). Auch im Fall des TCI liegen deutliche räumliche und zeitliche Unterschiede vor. Die Spannbreite reicht von „extrem ungünstig“ bis „exzellente Bedingungen“. „Exzellente Bedingungen“ (≥ 80) werden vor allem im Sommer an den Stationen im Tiefland (Lindenbergl, Cottbus, Legnica) beobachtet. Diese hohen TCI-Werte lassen sich auf hohe Temperaturen, eine niedrige relative Luftfeuchte und eine lange Sonnenscheindauer im Sommer in dieser Region zurückführen. Während in den Übergangsjahreszeiten „bedingt günstige“ bis „gute“ Bedingungen vorherrschen, ist die Eignung im Winter als „ungünstig“ einzustufen. Mit zunehmender Höhe, niedrigen Temperaturen, einer hohen relativen Luftfeuchte, hohen Windgeschwindigkeiten und Niederschlagsmengen sowie schlechteren Strahlungsbedingungen im Vergleich zum Tiefland, nimmt die touristische Eignung gemäß TCI ab. In Zinnwald herrschen im Winter „sehr ungünstige“ und nur von Mai bis August „akzeptable“ Bedingungen. Für Śnieżka lassen sich die klimatischen Bedingungen im Winter sogar in die Klasse „extrem ungünstig“ oder „sehr ungünstig“ Bedingungen einstufen und auch im Sommer werden lediglich bedingt günstige Bedingungen erreicht.

Eine weitere Möglichkeit, die touristische Eignung einer Region darzustellen, bietet das Klima-Tourismus-Informationen-Schema (CTIS) (Abbildung 4). Während Hitzestress ($PET > 35^\circ\text{C}$) weder im Tiefland noch im Bergland beobachtet wird, tritt Kältestress ($PET < 0^\circ\text{C}$) vor allem in den Wintermonaten auf. Hinsichtlich Sonnenreichtum ($NN < 5/8$), Starkwind ($v > 8\text{ m/s}$), Nebel ($U > 93\%$), Schwüle ($DD > 18\text{ hPa}$), Tagen ohne ($RR \leq 1\text{ mm}$) und Tage mit hohen Niederschlägen ($RR \geq 5\text{ mm}$) lassen sich im Tiefland günstigere Bedingungen feststellen, als in den höheren Lagen. Besonders Nebel und häufigere Niederschläge können das Tourismuspotential im Bergland negativ beeinflussen. Dagegen eignen sich die höheren Lagen vor allem in den Monaten Januar bis März besser für Wintersportaktivitäten wie z. B. Langlauf ($SN > 10\text{ cm}$) oder Abfahrtski ($SN > 30\text{ cm}$).

Weiter zeigt die Trendanalyse, dass sowohl die Häufigkeit der Tage mit Schneehöhen größer 10 cm als auch 30 cm rückgängig ist. Aufgrund der hohen Variabilität der Schneebedeckung wird für die genannten Trends allerdings keine statistische Signifikanz berechnet.

Tabelle 3
Monatliche TCI-Werte und deren Klassifizierung an ausgewählten Klimastationen im Zeitraum 1971–2010

(SLU – Stubice, COT – Cottbus, LIN – Lindenbergl, LEG – Legnica, ZG – Zielona Góra, DRE – Dresden, w KUB – Kubschütz-Bautzen, GOR – Görlitz, JG – Jelenia Góra, ZIN – Zinnwald, SN – Śnieżka)

Monat/Station	SLU	COT	LIN	LEG	ZG	DRE	KUB	GOR	JG	ZIN	SN
I	39	39	38	40	38	41	37	37	41	27	12
II	41	41	41	43	41	41	41	40	41	31	12
III	47	47	47	49	47	47	45	44	47	37	26
IV	56	56	56	56	56	56	54	56	54	47	28
V	65	71	67	67	63	63	61	63	59	52	37
VI	77	81	80	76	75	72	74	74	67	51	38
VII	77	81	80	78	79	76	76	78	71	53	36
VIII	77	81	80	80	79	76	74	77	73	53	44
IX	64	67	65	67	58	61	59	63	56	49	37
X	51	52	52	52	53	50	52	54	53	42	33
XI	44	43	43	43	39	43	41	42	44	32	22
XII	38	37	37	41	37	37	37	36	39	27	20

■ unmöglich	■ extrem ungünstig	■ sehr ungünstig	■ ungünstig
■ bedingt günstig	■ akzeptabel	■ gut	■ sehr gut
■ exzellent	■ ideal		

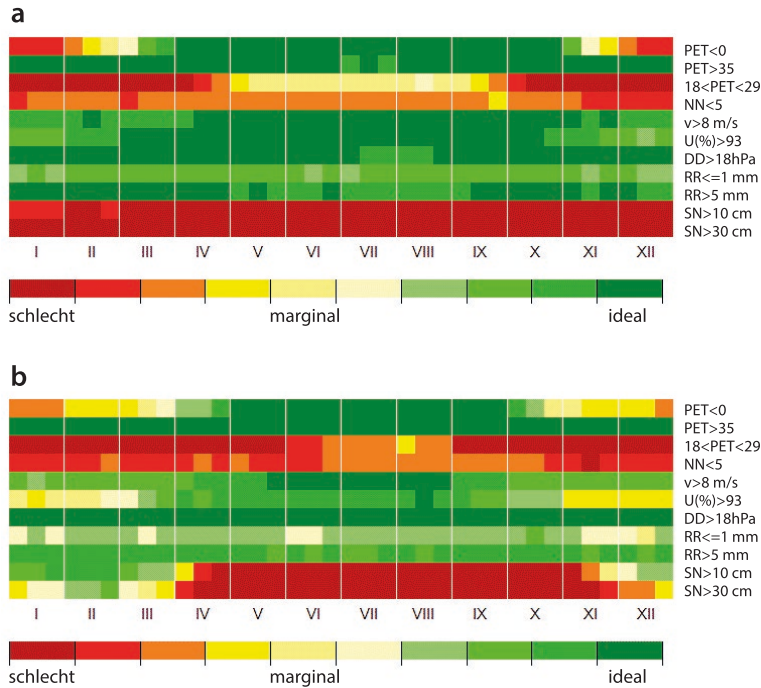


Abbildung 4
CTIS auf 10-Tagesbasis
für a) Lindenberglinden und b)
Zinnwald im Zeitraum
1971–2010

Klimaprojektionen

Anhand von aktuellen Klimaprojektionen wird simuliert, dass eine weitere Freisetzung von Treibhausgasen zu einer zunehmenden globalen Klimaerwärmung bis zu +4 °C zum Ende des 21. Jahrhunderts und den damit einhergehenden Änderungen im Klimasystem führen kann. Ziel der Europäischen Union ist daher, die globale Erwärmung unter +2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu halten. Repräsentativ stellt das Szenario RCP2.6 die notwendigen Annahmen dar, um dieses Ziel langfristig erreichen zu können.

Das im Projekt KLAPS verwendete Szenario-Ensemble (A1B, RCP2.6, RCP8.5) zeigt die Bandbreite der möglichen zukünftigen klimatischen Entwicklung im polnisch-sächsischen Grenzraum. Im Vergleich zu 1971–2000 wird eine mittlere jährliche Temperaturzunahme zwischen +1,1 °C und +1,6 °C im Zeitraum 2021–2050 bzw. +1,0 °C und +3,5 °C im Zeitraum 2071–2100 modelliert (Abbildung 5). Die stärkste Temperaturzunahme wird im Sommer erwartet. Die räumlichen Unterschiede des thermischen Änderungssignals zwischen Tiefland und Mittelgebirge liegen bei ±0,0 °C bis +0,3 °C.

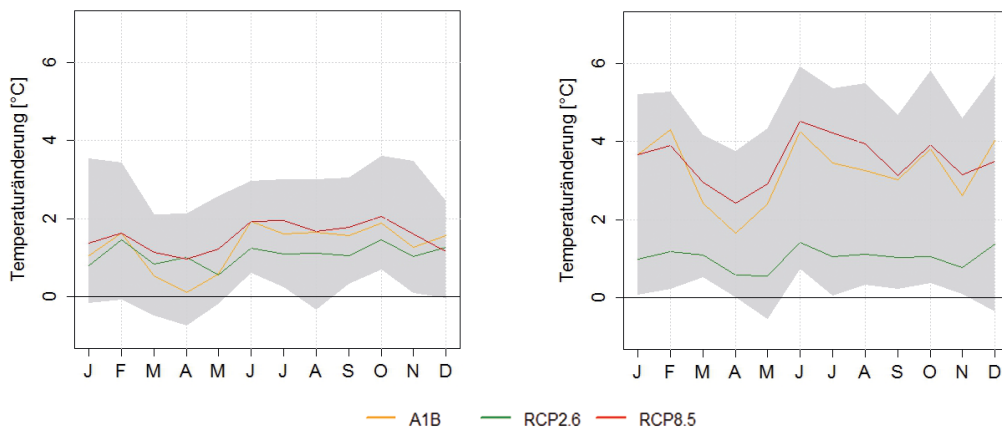


Abbildung 5
Temperaturänderung [°C] 2021–2050 (links)
und 2071–2100 (rechts)
gegenüber 1971–2000 im
KLAPS-Projektgebiet

Die bereits beobachtete Zunahme von warmen Ereignistagen und Hitzeperioden setzt sich zukünftig sehr wahrscheinlich weiter fort (Tabelle 4). Demgegenüber projizieren die Modelle eine deutliche Abnahme der Häufigkeit kalter Ereignistage sowie der Dauer der Frostperiode vor allem zum Ende des 21. Jahrhunderts. Der starken Zunahme der Länge der Vegetationsperiode steht eine Abnahme der Niederschlagsmenge im Sommerhalbjahr gegenüber. Während die Beobachtung eine leichte Zunahme der Niederschläge aufweist, modellieren die Modelle einen abnehmenden Trend im Sommerhalbjahr sowie im gesamten Jahr. Trockenperioden zeigen eine leichte, jedoch

keine signifikante Zunahme im Sommerhalbjahr. Hinsichtlich Starkniederschlag ist kein Trend feststellbar. Aufgrund der deutlich zunehmenden Verdunstung und der abnehmenden Niederschlagsmenge im Projektgebiet nimmt die klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr stark ab, wobei die Spannbreite zwischen den Szenarien sehr hoch ist. Auch im Winterhalbjahr wird eine leichte Abnahme projiziert, sodass es im Projektgebiet zu einer deutlichen Verschlechterung der verfügbaren Wasserressourcen kommt. Generell sind die projizierten Änderungssignale zum Ende des 21. Jahrhunderts stärker ausgeprägt.

Tabelle 4
Szenariobedingte
Bandbreite des Klima-
änderungssignals
2021–2050 und 2071–2100
gegenüber 1971–2000
(globaler Antrieb:
ECHAM5 und MPI-ESM-LR;
Regionalisierung: Wettreg
2013)²

Größe	Einheit	2021–2050	2071–2100
Mittlere Jahrestemperatur	°C	1,1 – 1,6	1,0 – 3,5
Temperatur Frühjahr	°C	0,4 – 1,1	0,8 – 2,8
Temperatur Sommer	°C	1,2 – 1,9	1,2 – 4,3
Temperatur Herbst	°C	1,2 – 1,8	1,0 – 3,4
Temperatur Winter	°C	1,2 – 1,3	1,0 – 3,6
Anzahl Sommertage	d	10 – 18	11 – 41
Anzahl heiße Tage	d	3 – 6	4 – 20
Anzahl Tropennächte	d	0,5 – 0,8	0,5 – 5
Anzahl Frosttage	d	-18 – -22	-18 – -50
Anzahl Eistage	d	-9 – -11	-10 – -26
Kältesumme	-	-70 – -90	-78 – -194
Hitzeperiode	Anzahl	1 – 2	1 – 6
Dauer Frostperiode	d	-8 – -10	-10 – -25
Dauer frostfreie Periode	d	12 – 18	10 – 39
Dauer thermische Vegetationsperiode	d	18 – 25	16 – 56
Niederschlag SHJ	mm	2 – -19	-12 – -68
Niederschlag WHJ	mm	3 – 5	6 – 17
Trockenperioden SHJ	Anzahl	0,0 – 0,1	0,1 – 0,4
Tage mit Starkniederschlag SHJ	d	0,0 – -0,1	-0,1 – -0,2
Tage mit Starkniederschlag WHJ	d	0,0 – 0,1	0,0 – 0,1
Potenzielle Verdunstung	mm	25 – 51	24 – 102
Klimatische Wasserbilanz SHJ	mm	-15 – -56	-30 – -139
Klimatische Wasserbilanz WHJ	mm	-1 – -4	2 – -10
Sonnenscheindauer	h	63 – 164	57 – 327

² Ergänzung der Tabelle 4 unter Verwendung der Ergebnisse aus dem EU-Projekt NEYMO
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22580>



Agrarmeteorologie

Unter allen ausgewählten Klimaszenarien wird im gesamten Projektgebiet ein starker Anstieg der Wachstumsgradtage (Abbildung 6, Tabelle 5) sowie der Summe der aktiven Temperaturen im gesamten Projektgebiet zum Ende des 21. Jahrhunderts modelliert. Dabei treten große räumliche Unterschiede zwischen dem Tiefland und den Mittelgebirgsregionen auf.

Demgegenüber zeigt der Hydrothermale Koeffizient nach SELYANINOV (HTC) einen abnehmenden Trend, besonders in den Berglagen. Im Projektgebiet bedeutet dies, dass sich Regionen, die durch Wasserdefizit charakterisiert werden, weiter ausdehnen und zukünftig auch Gebiete im Hügel- und Bergland umfassen können. Je nach Szenario liegt die Trockenheitsgrenze ($HTC < 1$) bei 450 m . NN (RCP2.6) bzw. 550 m . NN (RCP8.5).

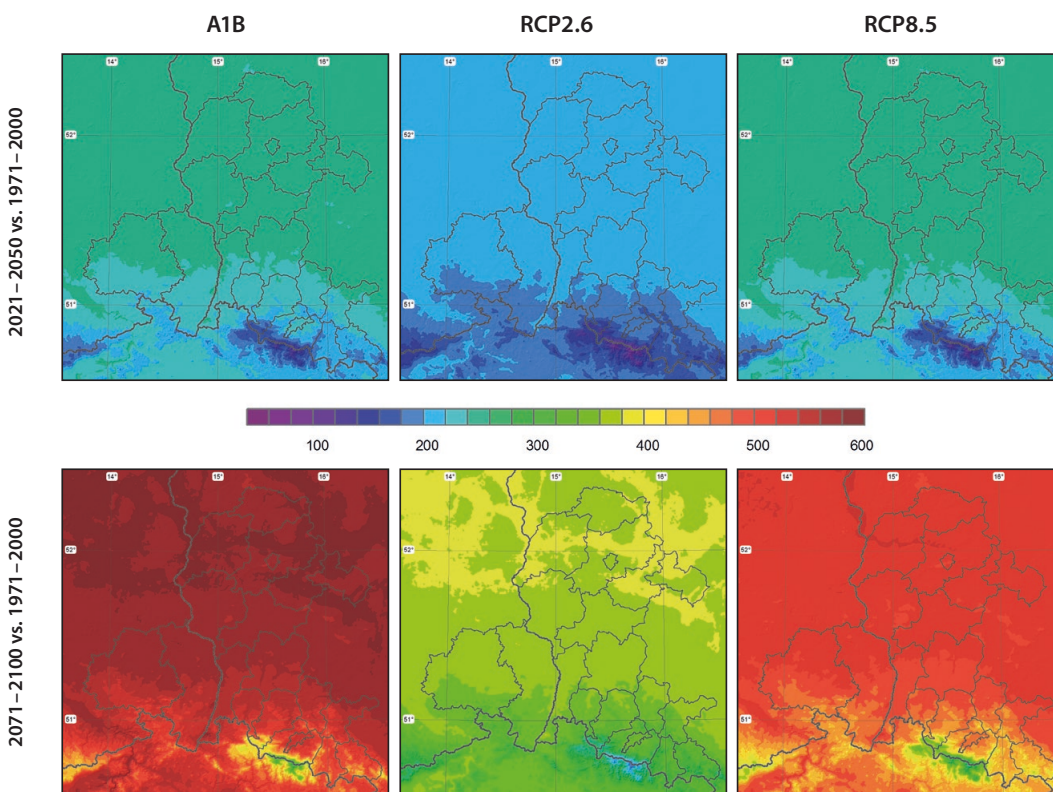


Abbildung 6
Änderung der Wachstumsgradtage [°C] 2021–2050 (oben) und 2071–2100 (unten) gegenüber 1971–2000 im KLAPS-Projektgebiet

Größe	Einheit	2021–2050	2071–2100
Wachstumsgradtage	°C	204–239	362–555
Summe der aktiven Temperaturen	°C	313–342	531–808
Hydrothermale Koeffizient nach Selyaninov	–	-0,13 – -0,09	-0,31 – -0,17

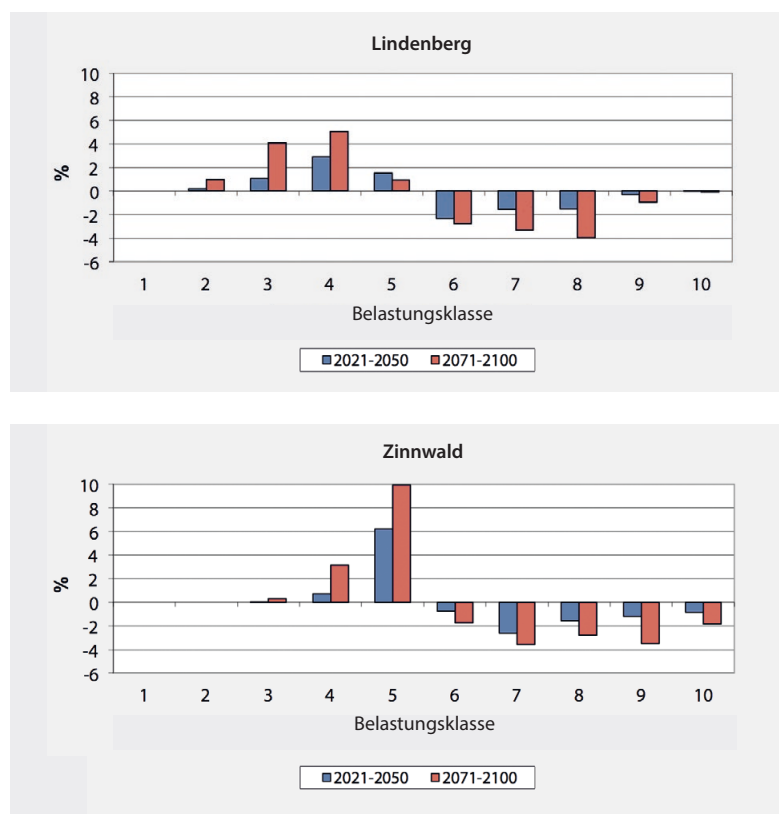
Tabelle 5
Szenariobedingte Bandbreite des Klimaänderungssignals agrarmeteorologischen Kenngrößen 2021–2050 und 2071–2100 gegenüber 1971–2000 auf Basis von Rasterdaten (globaler Antrieb: ECHAM5 und MPI ESM-LR; Regionalisierung: WETTREG 2013)

Bioklima

Auch zukünftig werden räumliche und zeitliche Unterschiede der biothermischen und touristischen Bedingungen im Projektgebiet 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 (Abbildung 7). Andererseits 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. Eine Einhaltung des „2-Grad-Ziels“, würde dazu beitragen, dass biothermische und touristische Aktivitäten zukünftig vor allem im Tiefland im polnisch-sächsischen Grenzraum weniger stark negativ beeinträchtigt wären.

Abbildung 7
 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) für Lindenberg (links) und Zinnwald (rechts) (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)



Luftverschmutzung

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 Schwefeldioxid SO_2 und Stickoxide NO_x beobachtet. Basierend auf Emissionsprognosen wird sich

dieser Trend bis zum Jahr 2030 sehr wahrscheinlich weiter fortsetzen (Abbildung 8). Die Emissionen von Ammoniak verbleiben dagegen, nach einem geringfügigen Rückgang bis 2005, auf ähnlich hohem Niveau von etwa 30 Gg bis zum Jahr 2030. Dem allgemeinen Emissionstrend folgend, wird eine gegenwärtige sowie sich zukünftig fortsetzende Verringerung der Deposition von Schwefel und oxidiertem Stickstoff modelliert (Abbildung 9). Dagegen verbleibt die Deposition von reduziertem Stickstoff auf ähnlich hohem Niveau und macht den größten Anteil der Stickstoffdepositionen im KLAPS-Projektgebiet nach 2005 aus.

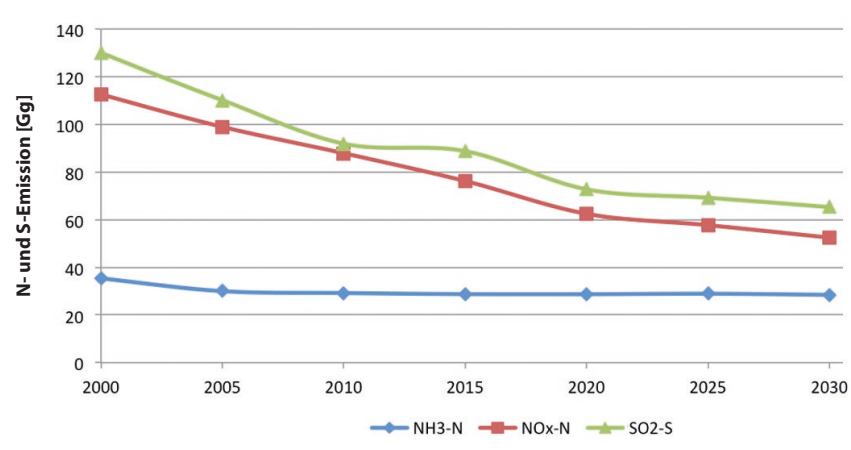


Abbildung 8
Änderung der SO_2 -, NO_x - und NH_3 -Emissionen [Gg] im KLAPS-Projektgebiet im Zeitraum 2000–2030 (5-Jahresschritte)

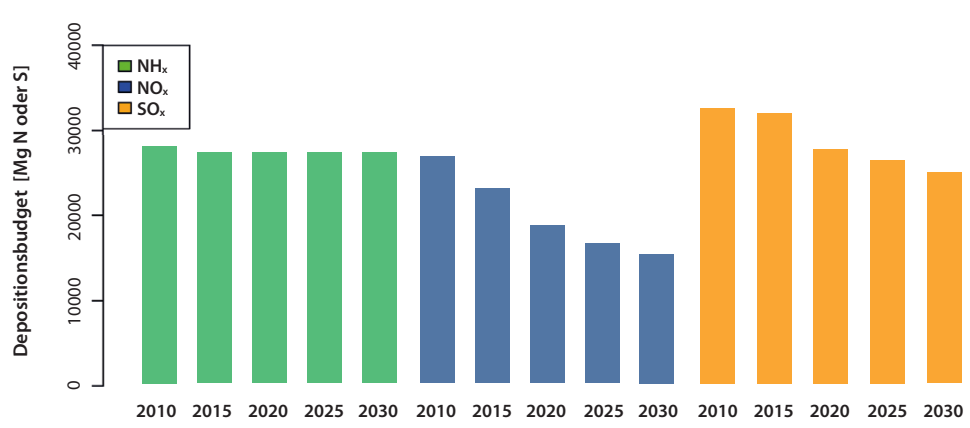


Abbildung 9
Depositionsbudget für Schwefel- und Stickstoffverbindungen für die Jahre 2010–2030 (5-Jahresschritte) im KLAPS-Projektgebiet

Die räumliche Verteilung der Deposition von oxidiertem Schwefel (SO_x) und reduziertem Stickstoff (NH_x) im Jahr 2010 im Projektgebiet ist in **Abbildung 10** dargestellt. Die höchsten Depositionen werden aufgrund hoher nasser Depositionen für die höheren Lagen der Mittelgebirge und in unmittelbarer Nähe der Emissionsquellen modelliert. Dies bestätigen auch Messungen des IMGW-PIB.

Neben veränderten Emissionen zeigt sich der Einfluss klimatischer Änderungen auf die Depositionen verschiedener Luftschadstoffe. Basierend auf

den verwendeten Klimaszenarien ergeben sich vor allem unter den Szenarien A1B und RCP8.5 Abnahmen der Schwefel- und Stickstoffdepositionen von 0,5 Gg zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber dem Zeitraum 2021–2050 (**Abbildung 11**). Dies wird im Wesentlichen durch die 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 Stickstoffdepositionen geringer einzuschätzen als die Minderung der Emissionen im Projektgebiet.

Abbildung 10
Gesamtdeposition von SO_x (links) und NH_x (rechts) im Jahr 2010

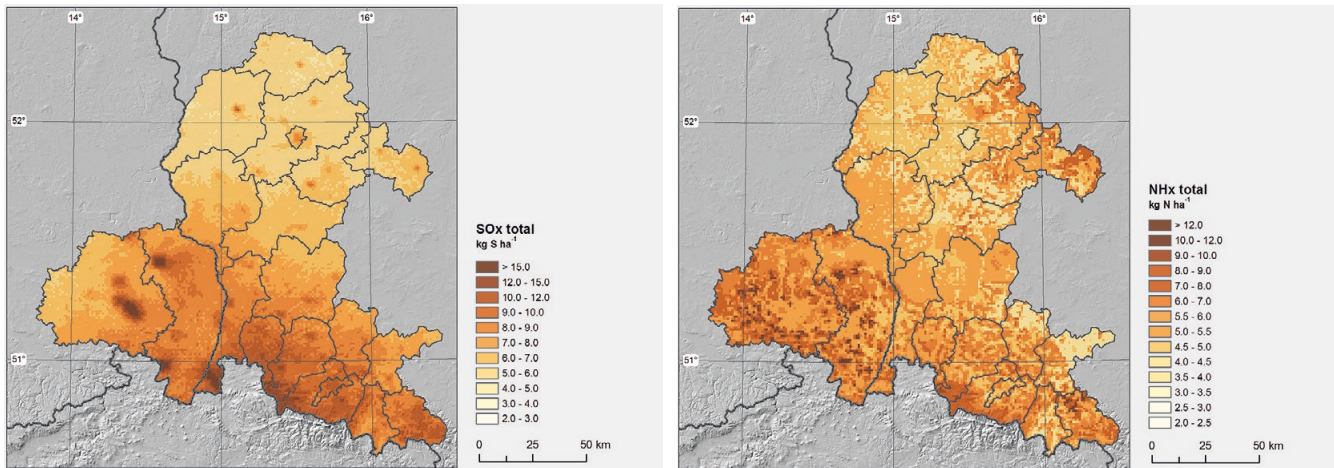
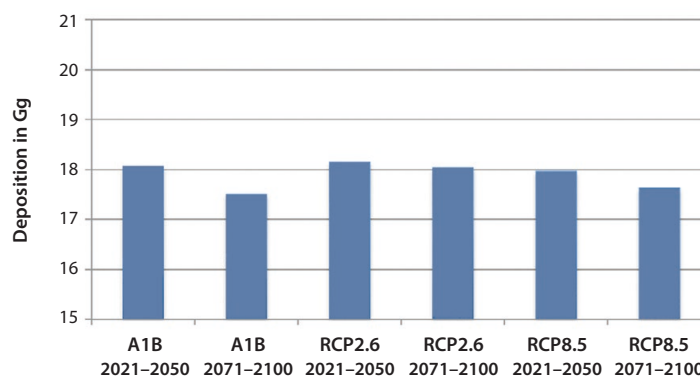


Abbildung 11
Höhe der Schwefeldeposition [Gg] unter verschiedenen Klimaszenarien und Emissionsprognosen im Jahr 2030 im KLAPS-Projektgebiet





Belastungsgrenzen von Ökosystemen

Maßnahmen zur Luftreinhaltung und Minderung von Schadstoffen der letzten Jahrzehnte spiegeln sich im Projektgebiet anhand der ökologischen Belastungsgrenzen, den sogenannten Critical Load wieder. Rückgängige Schwefeldepositionen führen dazu, dass gegenwärtig für nur etwa 10% der Ökosysteme ein Versauerungsrisiko feststellbar ist (Abbildung 12). Vor allem Nadelwälder reagieren besonders sensitiv gegenüber Versauerung. Gemäß zukünftigen Prognosen der Schwefeleinträge wer-

den 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. Betroffen zeigen sich ebenfalls Nadelwälder, relativ hoch ist das Eutrophierungsrisiko bei Sümpfen und Torfmooren. Prognostizierte Abnahmen der Stickstoffemissionen lässt das Eutrophierungsrisiko im Jahr 2030 auf 40% sinken. Allerdings verlangt die



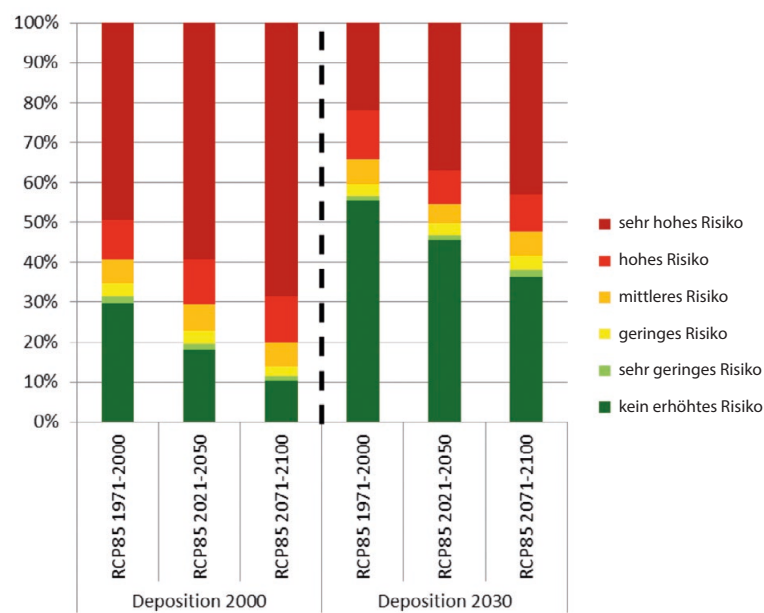
internationale Konvention zum Schutz der Biodiversität (CBD), dass alle Ökosysteme vor dem Risiko der Versauerung und Eutrophierung zu bewahren sind.

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. Projizierte steigende Temperaturen und rückgängige Niederschlagssummen führen zu einer Zunahme der Empfindlichkeit von Ökosystemen gegenüber Stickstoffeinträgen, vor allem zum Ende des 21. Jahrhunderts. Den deutlichsten Effekt zeigt das Szenario RCP8.5 (Lauf 1), während unter RCP2.6

die Verminderung der Ökosystemempfindlichkeit am geringsten ausfällt (Abbildung 13). Im Mittel beträgt der Unterschied der Critical Load für Eutrophierung zwischen beiden Szenarien etwa $3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Insgesamt kompensieren sich stoffliche und klimatische Änderungen gegenseitig, so dass nur etwa die Hälfte der durch Maßnahmen zur Luftreinhaltung erreichten Minderung von Schadstoffeinträgen dem Schutz der Ökosysteme zu Gute kommt. Klimatische Änderungen sollten daher in der zukünftigen Luftreinhaltspolitik zwingend berücksichtigt werden.

Abbildung 13
Risikoklassen der Eutrophierung in Abhängigkeit von Schadstoffeinträgen 2000 (links) und 2030 (rechts) und verschiedene Klimazeiträume unter dem Szenario RCP8.5 Lauf 1





Folgen des Klimawandels

Aus den Ergebnissen im Projekt KLAPS lassen sich Aussagen für erwartbare Klimafolgen im Untersuchungsgebiet und für die untersuchten Themen ableiten. Die nachfolgende Übersicht wird zusätzlich durch Folgerungen aus einer Vielzahl anderer Klima- und klimafolgenrelevanter Studien (z. B.

NEYMO, REGKLAM, Vulnerabilitätsstudie Sachsen, etc.³⁾ ergänzt. Dieser Überblick erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und kann aufgrund regionaler und lokaler Besonderheiten von den generellen Aussagen abweichen.



Foto: LfULG

Landwirtschaft

- verbesserte Ertragschancen insbesondere in kühlen Anbauregionen der Mittelgebirge im Süden der Projektregion möglich
- potentielle Erhöhung der Erträge und Qualität im Obst und Weinbau bei zunehmender Sonneneinstrahlung im Herbst
- Ertragssteigerung bei Winterfrüchten und wärmeliebenden Fruchtarten unter Voraussetzung einer ausreichenden Wasserverfügbarkeit möglich
- Abnahme der Ertragsstabilität durch hohe jährliche Variabilitäten
- vor allem im Norden der Projektregion Ertragseinbußen aufgrund negativer klimatischer Wasserbilanz während der Wachstumsperiode
- auf sandigen Böden steigende Ertragsschwankung bei wasserbedürftigen Feldfrüchten wie Mais, Kartoffeln und Rüben insbesondere in Trockenjahren
- verstärktes Austrocknen der Böden im Sommer durch erhöhte Verdunstung und zunehmende Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden
- verstärkte Abnahme des Humusgehalts bei Temperaturanstieg und damit langfristig Verringerung der Bodenfruchtbarkeit
- erhöhtes Gefährdungspotential hinsichtlich des Verlustes fruchtbarer Ackerböden durch Wassererosion in Folge von Starkniederschlägen, vor allem bei vorangegangenen Trockenperioden
- qualitative Beeinträchtigung bis Totalausfall von Ernteprodukten in Folge von Starkniederschlägen und Hagelereignissen (z. B. Wein, Baumobstarten)
- erhöhte Winderosion in Trockenphasen
- Spätfrostgefährdung bei verfrüht einsetzender Vegetationsperiode bzw. vorzeitiger Aussaat
- Einwanderung und Ausbreitung wärmeliebender Schädlingarten
- Teilweise eingeschränkte Nutzung von Pflanzenschutzmitteln bei Hitze und Trockenheit

³⁾ Unter Verwendung der genannten Referenzen in *Weiterführende Informationen zu Klimaschutz und Klimaanpassung in Sachsen* (Seite 21)



Foto: Marco Schwarzak Fotografie

Forstwirtschaft

- Verschiebung der Waldbauregionen aufgrund von klimatischen Änderungen (wärmer und trockenere Standortbedingungen)
- Auftreten neuer Waldstrukturen (lichte Waldformationen)
- Änderung des Vorkommens und der Verteilung einheimischer Baumarten
- Insbesondere in den höheren Lagen natürliche oder gezielte Ausbreitung wärmeliebender Baumarten
- Vitalitätseinbußen und Verringerung der Holzbestände im Tiefland aufgrund negativer klimatischer Wasserbilanz und Trockenperioden im Sommerhalbjahr
- Sinkende Produktivität der Fichtenbestände aufgrund von Trockenstress
- Zunehmende Empfindlichkeit gegenüber Windwurf
- Erhöhte Reproduktion und Einwanderung neuer Insektenarten
- Zunehmende Empfindlichkeit durch Schädlingsbefall (u. a. Borkenkäfer)
- Erhöhte Waldbrandgefahr



Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft

- Insbesondere im Tiefland sinkende Grundwasserstände durch verringerte Grundwasserneubildung in Folge von rückgängigen Niederschlagsmengen, steigenden Verdunstungsraten und geringerer Speisung der Oberflächengewässer in Trockenzeiten im Sommerhalbjahr
- Verschlechterung der Wasserqualität von Grundwasser und Oberflächengewässer
- Änderung von Stoffumsatz, Lösungsverhalten und Grundwasserbiologie bei Erhöhung der Grundwassertemperatur
- Gefährdung der Fließgewässerökosysteme durch Niedrigwasserperioden und erhöhte Wassertemperaturen
- zunehmende Verminderung, Verlandung oder häufigeres Austrocknen von Gewässern mit kleinem Einzugsgebiet durch erhöhte Verdunstung und Niederschlagsdefizite
- mittlerer Rückgang des Gebietsabflusses durch Niederschlagsdefizite im Sommer
- reduzierte Zuflüsse in Talsperren
- bedeutsame negative klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr
- Gefahr von Blaualgenblüte durch steigende Wassertemperaturen, zunehmende Einstrahlung, Überangebot von Phosphor und Stickstoff sowie verminderte Zuflüsse im Sommer
- Verschlechterung des ökologischen Gewässerzustandes aufgrund erhöhter Sediment- und Schadstoffeinträge bei Starkniederschlägen
- Anstieg des Risikopotentials hinsichtlich lokaler Überflutungs- und Kanalarückstauereignisse der Abwassersysteme
- Hochwassergefahr durch zunehmende konvektive Starkniederschläge im Sommer
- Verminderung der Wahrscheinlichkeit von Hochwasser in Folge abnehmender Schneebedeckung (abnehmendes Schmelzwasserdargebot)
- Versauerungsgefahr der Tagebaurestseen und des abströmenden Grundwassers durch verzögerte Flutung aufgrund fehlendem Wasserdargebot



Foto: LfULG



Foto: LfULG

Teichwirtschaft

- Zerstörung der Teichwirtschaft durch Starkniederschläge und Hochwasser möglich
- Unterbrechung der Winterruhe und folgend Energieverluste der Fische durch ausbleibende Eisbedeckung und höhere Wassertemperaturen
- Einbürgerung von konkurrierenden Arten (z. B. asiatischer Blaubandbärbling) bis zur Verdrängung von einheimischen Arten
- zunehmende Gefahr durch neue Fischkrankheiten
- Gewinnverluste und Fischsterben durch Wassermangel



Foto: Wolfgang Pehlemann

Siedlungsräume

- erhöhte Feinstaubbelastung durch häufigere und längere Trockenperioden
- Gefährdung von Menschen und Zunahme von Schäden an Gebäuden und technischer Infrastruktur in Folge von häufigerem Auftreten und stärkerer Intensität von Hochwasserereignissen, Schlamm und Sedimenteintrag
- Überstauereignisse in Kanalnetzen bei Starkniederschlägen
- Destabilisierung des städtischen Bodenwasserhaushalts
- Beeinträchtigung der Vitalität und wichtiger Regulationsfunktionen von Stadtgrün in Folge häufigerer und länger andauernder Trockenperioden und veränderter Standortbedingungen
- Erfordernis von gebäudetechnischen Veränderungen (z. B. Klimatisierungsbedarf im Sommer, Hitzeschutz, Hochwasserschutz)
- Verschlechterung des Raumklimas in Folge wärmerer Temperaturen
- geringerer Heizbedarf im Winter

Bevölkerung

- Beeinträchtigung der Aufenthaltsqualität und Wohlbefinden der Bevölkerung aufgrund steigender Temperaturen (z. B. Hitzetage, Tropennächte und Hitzeperioden)
- Zunahme von gesundheitlichen Beschwerden (z. B. Allergien, Infektionskrankheiten, Herz-Kreislaufbeschwerden) in Folge wärmerer Temperaturen und erhöhter Feinstaubbelastung
- Abnahme von Kältestress im Winter

Tourismus

- Verlängerung der klimatisch bedingten Reisezeit
- Verlängerung der Freiluftsaison (u. a. Biergarten- und Badesaison)
- Zunahme von Hitzestress insbesondere in Städten und Tieflandregionen
- Steigerung des Tourismuspotentials von höher gelegenen Lagen im Sommer
- Verkürzung oder ggf. Wegfall der Wintersaison durch Abnahme der Schneesicherheit
- Zunahme der Wettervariabilität
- erhöhter Einfluss von Wetterextremen auf das Tourismuspotential einer Region



Weiterführende Informationen zu Klimaschutz und Klimaanpassung in Sachsen

Klimaanpassung in Sachsen – Internetseite des SMUL:
www.klima.sachsen.de

Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2012:
<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/klima/30157.htm>

Klimakompodium Sachsen – Klimastrategien:
http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Klimakompodium_ST.pdf

Regionales Klimainformationssystem:
www.rekis.org

Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden:
http://www.regklam.de/fileadmin/Daten_Redaktion/Publikationen/Regionales-Klimaanpassungsprogramm_Lang_121101.pdf

Klimawandel und Landwirtschaft – Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel:
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11557>

Anpassungsmaßnahmen des sächsischen Pflanzenbaus an den Klimawandel:
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11449>

Vulnerabilitätsanalyse Oberlausitz-Niederschlesien:
<http://www.rpv-oberlausitz-niederschlesien.de/projekte/regionales-energie-und-klimaschutzkonzept-klimaanpassungsstrategie/regionale-klimaanpassungsstrategie/ergebnisse.html>

Praxisleitfaden Tourismus und biologische Vielfalt im Klimawandel:
http://www.bfn.de/fileadmin/MDb/documents/themen/sportundtourismus/Leitfaden_IOER_barrierefrei.pdf

Analyse zum Handlungsbedarf im Bereich Klimaanpassung:
 Bernhofer, C. et al. (2007): Analyse zum Handlungsbedarf im Bereich Klimaanpassung. Studie im Auftrag des Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden.

Veröffentlichungen im EU-Projekt KLAPS

Projektberichte (online und als Druckversion verfügbar):

Band 1: Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum:
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/21673>

Band 2: Klimaprojektionen, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen:
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/23356>

Fachberichte (online verfügbar):

Ökologische Belastungsgrenzen von Ökosystemen: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22073>

Erstellung von Windrosen im Rahmen von KLAPS: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/23037>

Ozonanalyse im polnisch-sächsischen Grenzraum: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/12687>

Kontakt

Andreas Völlings
 Sächsisches Landesamt für Umwelt,
 Landwirtschaft und Geologie
 Referat 51: Klima, Luftqualität
 Tel.: +49 (0)351 2612 5101
 E-Mail: andreas.voellings@smul.sachsen.de

Maciej Kryza
 Uniwersytet Wroclawski
 Instytut Geografii i Rozwoju
 Regionalnego
 Tel.: +48 7134 85 441
 E-Mail: maciej.kryza@uni.wroc.pl

Irena Otop
 Instytut Meteorologii i Gospodarki
 Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy,
 Oddział we Wrocławiu
 Tel.: +48 7132 84 1 07
 E-Mail: Irena.Otop@imgw.pl

Internet: www.klaps.sachsen.de
www.klaps-project.eu

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, Irena Otop, Maciej Kryza, Andreas Völlings

Umschlaggrafik:

Hoch3 GmbH
unter Verwendung der Abbildungen „KLAPS-Projektregion“ (Mehler et al. 2014) und
„Tablets with a bar graph“ (pedrosek/Shutterstock.com)

Gestaltung und Satz:

Hoch3 GmbH, Berlin

Redaktionsschluss:

05.01.2015
(2. geänderte Auflage)

Bezug:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-
Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

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.

