



PODSUMOWANIE PROJEKTU: Zmiany klimatu, zanieczyszczenia powietrza i przekroczenia ładunków krytycznych w regionie granicznym Polska-Saksonia

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Freistaat
SACHSEN



Uniwersytet
Wrocławski



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



Zmiany klimatu, zanieczyszczenia
powietrza i przekroczenia ładunków krytycznych
w regionie granicznym Polska – Saksonia





Wprowadzenie

Problematyka poruszana w ramach unijnego projektu KLAPS (*Zmiany klimatu, zanieczyszczenia powietrza i przekroczenia ładunków krytycznych w regionie granicznym Polska – Saksonia*) dotyczy wpływu zmian klimatu na wielkość i depozycję zanieczyszczeń powietrza, ładunki krytyczne, a także ich oddziaływanie na społeczeństwo, turystykę i rolnictwo. Niniejsza publikacja przede wszystkim w sposób ogólny podsumowuje wyniki badań uzyskane w ramach realizacji projektu KLAPS. Ponadto, informacje dotyczące obecnych i przyszłych trendów zmian warunków klimatycznych i zanieczyszczeń powietrza oraz wyniki badań innych projektów dotyczących zmian klimatu, zostały omówione pod kątem ich przydatności dla poszczególnych grup odbiorców. Dokładny opis zastosowanych metod oraz wyniki badań zostały przedstawione w publikacjach: „Zmiany klimatu w regionie granicznym Polski i Saksonii” (MEHLER i in. 2014) oraz „Projekcje klimatu, zanieczyszczenia powietrza i ładunki krytyczne w regionie granicznym Polski i Saksonii” (SCHWARZAK i in. 2014).

Projekt jest współfinansowany przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego (ERDF) w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska-Saksonia 2007–2013. W projekcie uczestniczy trzech partnerów: Saksoński Urząd ds. Środowiska, Rolnictwa i Geologii (Partner Wiodący), Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego, a także Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział we Wrocławiu.

Celem projektu jest podniesienie świadomości mieszkańców i użytkowników projektu w zakresie tematyki poruszanej w projekcie, a także transfer wiedzy w celu zapewnienia warunków dla podjęcia odpowiednio wczesnych działań ukierunkowanych na adaptację do zmian klimatu w obszarze granicznym oraz minimalizację ich skutków.



Regionalne zmiany klimatu

Ogólne cechy klimatu

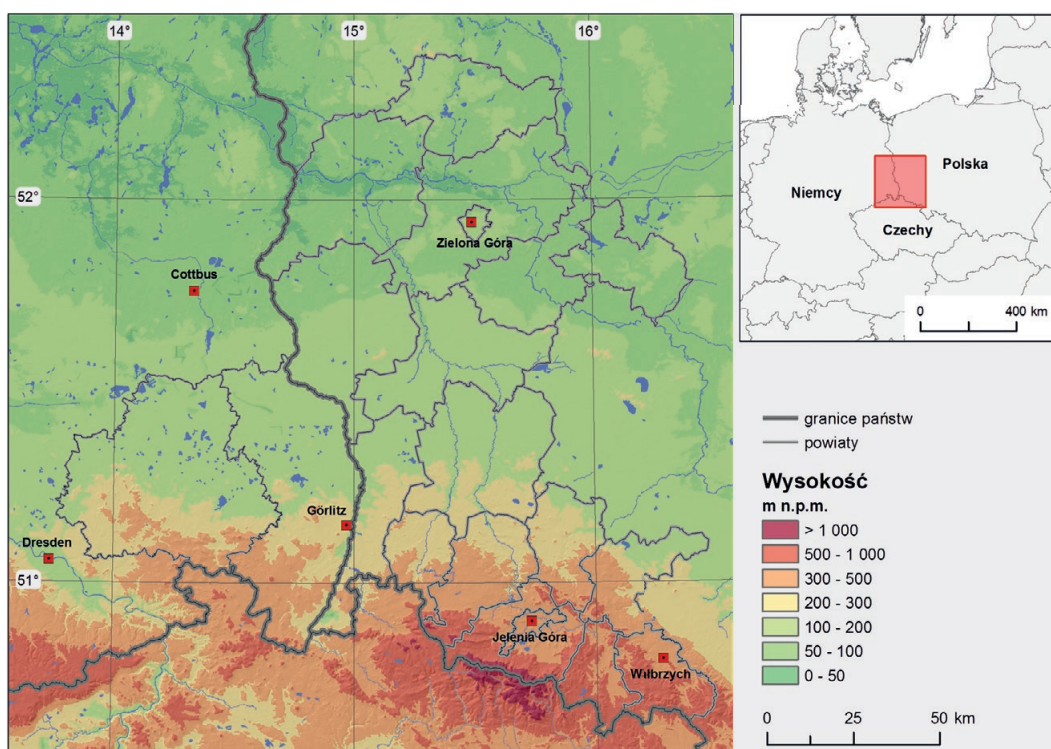
Region projektu KLAPS jest położony w strefie klimatu umiarkowanego przejściowego, pomiędzy zachodnioeuropejskim klimatem morskim, a klimatem kontynentalnym, charakterystycznym dla wschodniej części Europy (Ryc. 1).

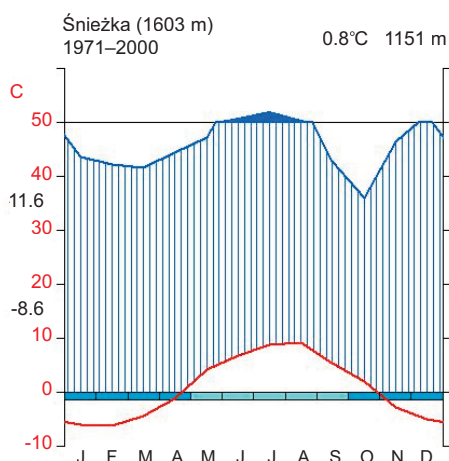
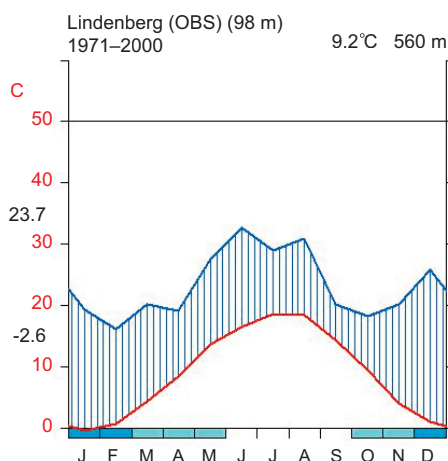
Zróżnicowanie warunków klimatycznych w regionie jest w największym stopniu uwarunkowane wysokością bezwzględną. Jest to szczególnie zauważalne w południowej części regionu, obejmującej pasma górskie: Rudaw, Gór Żytawskich, Gór Izerskich i Karkonoszy. Wraz ze wzrostem wysokości bezwzględnej maleją wartości temperatury powietrza oraz wzrastają sumy opadów atmosferycznych. Z uwagi na znaczne zróżnicowanie wysokości w regionie, obserwowane są duże różnice średniej temperatury rocznej powietrza pomiędzy nizinami (np. 8.9°C w Lindenbergu) a szczytową partią gór (0.8°C na Śnieżce) (Ryc. 2). W przypadku opadów

ważnym czynnikiem jest również ekspozycja maszyn górskich w kierunku zachodnim i południowo-zachodnim, powodująca zróżnicowanie opadów i zachmurzenia w obszarach po nawietrznej i zawietrznej stronie maszyn. Skutkiem tego są stosunkowo niskie sumy opadów we wschodniej części Rudaw oraz wysokie sumy na podobnych wysokościach w Górach Izerskich i Karkonoszach.

Wpływ rzeźby terenu jest widoczny również w mniejszej skali, m.in. w lokalnych obniżeniach, odznaczających się występowaniem zastoisk chłodnego powietrza i inwersji termicznych, co w konsekwencji oddziałuje na problemy związane z rolnictwem i zanieczyszczeniami powietrza. Napływ powietrza z kierunku SSW skutkuje częstym pojawianiem się zjawisk fenowych, które powodują wzrost średnich wartości temperatury powietrza na północnych stokach gór, przy niższych wartościach

Ryc. 1
Region projektu KLAPS





Ryc. 2
Diagramy klimatyczne wg WALTERA/LIETHFORA dla okresu 1971–2000 (po lewej = średnia miesięczna temperatura powietrza ($T_x + T_n / 2$) (na czerwono); wartości po lewej stronie: średnia miesięczna temperatura maksymalna najcieplejszego miesiąca (wyżej), średnia miesięczna temperatura minimalna najchłodniejszego miesiąca (niżej); po prawej = średnia miesięczna suma opadów atmosferycznych (na niebiesko); poniżej = miesiące z przymrozkami (na ciemnoniebiesko); miesiące z możliwymi przymrozkami (na jasnoniebiesko)

obserwowanych po stronie południowej. Natomiast wiatr typu bora („Bohemian wind”) powoduje spadek temperatury powietrza, przyczynia się do dłuższego występowania pokrywy śnieżnej. Jest najczęściej obserwowany w dolinach Nysy Łużyckiej i Łaby oraz wzdłuż Brama Lubawskiej i w Kotlinie Kamiennogórskiej.

Obserwowane warunki klimatyczne

Wieloletnie pomiary meteorologiczne w Europie Środkowej wykazały, że od roku 1900 średnia roczna temperatura powietrza wzrosła o ok. 1 °C. Dotyczy to również regionu granicznego Polska-Saksonia. Analizy pokazały istotny statystycznie, rosnący trend temperatury powietrza w regionie. Wzrost średniej temperatury powietrza w latach 1971–2010 wyniósł ok. 1,1 °C. Najsilniejszą tendencją wzrostową odznaczają się sezony wiosenny i letni, dla których odnotowano trend wynoszący odpowiednio +1,6 °C i +1,8 °C. W przypadku jesieni i zimy wzrost jest mniej intensywny i wynosi odpowiednio +1,0 °C i +0,2 °C.

Wyniki analizy trendów liczby dni charakterystycznych (np. dni upalne, gorące, mroźne) są odzwierciedleniem wzrostu temperatury powietrza (tab. 1). W przypadku dni upalnych i gorących odnotowano istotny statystycznie trend wzrostowy, zaś dla dni przymrozkowych i mroźnych tendencję malejącą, nieistotną statystycznie. Sezon wegetacyjny wg kryterium termicznego trwa obecnie dłużej o ok. 4 tygodnie, wydłużeniu uległ również okres bezprzymrozkowy. Pomimo trendu wzrostowego tempera-

tury powietrza, nieznacznemu zwiększeniu uległa liczba okresów przymrozkowych, co wskazuje na ryzyko występowania późnych przymrozków wiosennych.

W przypadku opadów atmosferycznych, dla półrocza letniego i zimowego, obserwowana jest tendencja wzrostowa, wynosząca +20 mm i +42 mm. Natomiast okresy suche (co najmniej 11 dni suchych) oraz silne opady atmosferyczne wykazują słabą tendencję wzrostową dla okresu lata. Z uwagi na wzrost promieniowania całkowitego, średnie roczne parowanie potencjalne w regionie projektu wzrosło o 69 mm. Skutkuje to zmniejszeniem wartości klimatycznego bilansu wodnego, liczonego jako różnica pomiędzy sumą opadów a parowaniem potencjalnym, o 88 mm w okresie półrocza letniego. Powstały deficyt wody nie jest zrekompensowany przez dodatnie wartości klimatycznego bilansu wodnego w półroczu zimowym.

Tabela 1

Średnie wartości
wybranych parametrów
meteorologicznych dla
lat 1971–2000 oraz trendy
dla okresu 1971–2010,
w nawiasach podano
zróżnicowanie wartości
pomiędzy nizinami a
górami¹

Element meteorologiczny/wskaźnik	Opis	Jednostka	Średnia 1971 – 2000	Trend absolutny 1971 – 2010
Średnia roczna temperatura powietrza	styczeń – grudzień	°C	7.5 (9.0 – 3.6)	1.1 (1.2 – 1.2)
Temperatura powietrza – wiosna	marzec – maj	°C	7.1 (8.6 – 2.7)	1.6 (1.8 – 1.7)
Temperatura powietrza – lato	czerwiec – sierpień	°C	16.0 (17.6 – 11.7)	1.8 (1.8 – 1.8)
Temperatura powietrza – jesień	wrzesień – listopad	°C	7.6 (9. – 3.9)	1.0 (1.0 – 1.1)
Temperatura powietrza – zima	grudzień – luty	°C	-0.8 (0.6 – -4.2)	0.2 (0.5 – 0.3)
Dni gorące	$T_{\max} > 25\text{ °C}$	dni	28 (41 – 4)	12 (16 – 3)
Dni upalne	$T_{\max} > 30\text{ °C}$	dni	5 (8 – 0)	3 (6 – 0)
Noce gorące	$(T_{\min} > 20\text{ °C})$	dni	0.4 (0.5 – 0)	0.4 (0.4 – 0.1)
Dni przymrozkowe	$(T_{\min} < 0\text{ °C})$	dni	110 (88 – 170)	-6 (0.6 – -23)
Dni mroźne	$(T_{\max} < 0\text{ °C})$	dni	38 (21 – 84)	3 (2 – -7)
Suma chłodu	$\Sigma T < 0\text{ °C}$. 1.11. – 31.03.	-	256 (165 – 554)	5 (-6 – -53)
Fale ciepła	min 6 dni z $T_{\max} > 90$ percentyla 1971–2000	liczba epizodów	0.6 (0.6 – 0.7)	1 (1.4 – 0.8)
Czas trwania okresu z przymrozkami	okres pomiędzy pierwszym a ostatnim przymrozkiem	dni	32 (23 – 63)	4 (3 – 6)
Czas trwania okresu bez przymrozków	okres pomiędzy pierwszym a ostatnim dniem bez przymrozku	dni	163 (173 – 127)	23 (30 – 16)
Długość sezonu wegetacyjnego	Liczba dni z $T_{\text{sr}} > 5\text{ °C}$ dla min 6 dni	dni	221 (253 – 142)	28 (34 – 39)
Opad atmosferyczny – półrocze ciepłe (SHY)	kwiecień – wrzesień	mm	465 (350 – 634)	20 (31 – -21)
Opad atmosferyczny – półrocze chłodne (WHY)	październik – marzec	mm	373 (258 – 548)	42 (31 – 45)
Okresy suche (SHY)	min 11 dni z opadem dobowym < 1 mm	liczba epizodów	2.0 (2.4 – 1.2)	0.3 (0.3 – 0.2)
Dni z opadami silnymi (SHY)	opad dobowy > 99 percentyla	dni	0.7 (0.6 – 0.8)	0.2 (0.2 – -0.3)
Dni z opadami silnymi (WHY)	opad dobowy > 99 percentyla	dni	0.7 (0.6 – 0.9)	-0.3 (-0.5 – -0.2)
Parowanie potencjalne	Wg Turc-Wendlinga	mm	605 (661 – 518)	69 (69 – 62)
Klimatyczny bilans wodny (SHY)	opad – parowanie potencjalne	mm	-44 (-116 – 543)	-88 (-52 – -159)
Klimatyczny bilans wodny (WHY)	opad – parowanie potencjalne	mm	189 (78 – 371)	33 (14 – 78)
Usłonecznienie	Czas trwania promieniowania bezpośredniego	godz.	1492 (1653 – 1377)	252 (246 – 215)

1 Tabela 1 zawiera wyniki projektu NEYMO
<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/11547.htm>



Wskaźnik	Opis	Jednostka	Średnia 1971 – 2000	Trend absolutny 1971 – 2010
Stopniodni okresu wegetacyjnego (GDD)	$\sum_{01.04.}^{31.10.} \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - 10^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	954 (1106 – 38)	214 (265 – 120)
Suma temperatur aktywnych (SAT)	$\sum_{01.04.}^{31.10.} \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \geq 10^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	2579 (2871 – 379)	419 (496 – 281)
Wskaźnik hydrotermiczny Selianinowa (HTC)	$\text{HTC} = R / 0,1 \Sigma T$	-	0.94 (0.56 – 4.04)	0.03 (0.24 – -1.53)

Tabela 2
Średnie wartości
wybranych wskaźników
agrometeorologicznych
w latach 1971–2000 oraz
trendy dla okresu 1971–
2010 na podstawie danych
gridowych, w nawiasach
podano zróżnicowanie
wartości pomiędzy
nizinami a górami

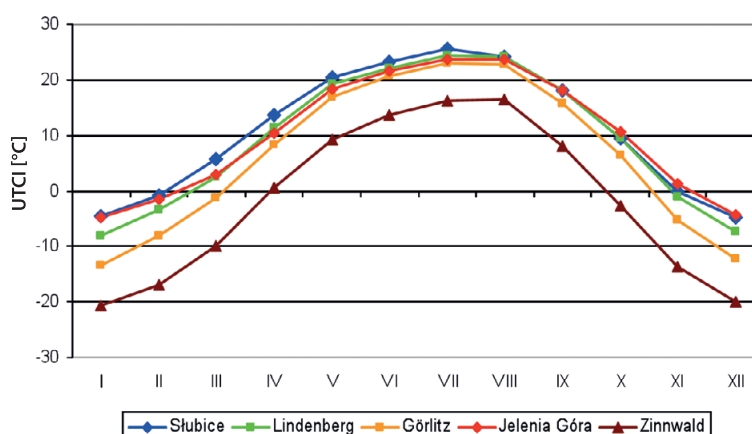
Agrometeorologia

Agrometeorologia zajmuje się głównie relacjami pomiędzy czynnikami meteorologicznymi i hydrologicznymi oraz ich wpływem na rolnictwo i leśnictwo. Wskaźniki agrometeorologiczne, obliczane na podstawie temperatury powietrza, takie jak stopniodni okresu wegetacyjnego (GDD) oraz suma temperatur aktywnych (SAT), wykazują trend rosnący, który osiąga dla lat 1971–2010 wartość $+214^{\circ}\text{C}$ i $+419^{\circ}\text{C}$ (tab. 2). Trendy te są szczególnie zauważalne na nizinach, w mniejszym stopniu w górach. Oprócz znacznego zróżnicowania przestrzennego wartości wskaźników agrometeorologicznych, obserwowana jest również ich bardzo duża zmienność z roku na rok.

Na podstawie bezwymiarowego wskaźnika hydrotermiczny suszy Selianinowa (HTC), obliczanego w oparciu o wartości temperatury powietrza i sumy opadów w sezonie wegetacyjnym, można określić warunki hydro-klimatyczne dla roślin. Zgodnie z klasyfikacją wskaźnika HTC, w regionie nizin obserwowane są warunki suche ($\text{HTC} < 1$), podczas gdy w górach, w ich szczytowej partii, przeważają warunki wilgotne ($\text{HTC} > 1.3$), wynikające z wysokich sum opadów i relatywnie niskiej temperatury. Trendy zmian wartości wskaźnika wykazują lekką tendencję wzrostową na nizinach i wyraźnie malejącą tendencję w najwyższych partiach gór, osiągając wartość -1.53 .

Biometeorologia

Badania biometeorologiczne są związane z określaniem relacji pomiędzy pogodą a organizmem człowieka. Klimat i pogoda mają znaczący wpływ na warunki bioklimatyczne, m.in. w kontekście ich oddziaływania na turystykę. Zróżnicowanie warunków biotermicznych regionu, określone w oparciu o wskaźnik UTCI, zostało przedstawione na Ryc. 3. „Umiarkowany stres zimna” (od -13 do 0°C) na nizinach oraz na przedpolu gór jest obserwowany podczas całego półrocza chłodnego. Rzadziej pojawia się „silny stres zimna” (od -27 do -13°C). Sytuacje pogodowe z „umiarkowanym stresem ciepła” (od 26 do 32°C) są najczęściej notowane dla miesięcy letnich (lipiec i sierpień) dla północnej, nizinnej części regionu. W przypadku obszarów położonych na wyższych wysokościach częstość występowania „silnego stresu zimna” wzrasta, wskutek spadku wartości temperatury powietrza i wzrostu prędkości wiatru. W lecie, w górach przeważają sytuacje pogodowe z „komfortem termicznym” (od 9 do 26°C), zaś stres ciepła nie jest w ogóle obserwowany. Wartości UTCI w latach 1971–2010 wykazują trend rosnący (np. $+1.7^{\circ}\text{C}$ dla stacji Lindenberg), dla większości stacji istotny statystycznie, spowodowany głównie wzrostem temperatury powietrza w tym okresie.



Ryc. 3
Przebieg średnich
miesięcznych wartości
wskaźnika UTCI w latach
1971–2010

Wskaźnik klimatyczno-turystyczny (TCI) stosuje się w celu określenia użyteczności pogody z punktu widzenia oddziaływania na potencjał rekreacyjny (za wyjątkiem sportów zimowych) (tab. 3). W regionie projektu Klaps TCI odznacza się dużym zróżnicowaniem pomiędzy poszczególnymi obszarami, przyjmując wartości z klas od „warunków skrajnie niekorzystnych” do warunków doskonałych. „Warunki doskonałe” ($TCI \geq 80$) są obserwowane podczas lata w niższej położonych terenach (np. Lindenberg, Cottbus, Legnica). Wysokie wartości wskaźnika wynikają głównie z wysokiej temperatury powietrza, niskiej wilgotności powietrza oraz dużych sum usłonecznienia. W przypadku przejściowych pór roku charakteryzują się one występowaniem warunków z klas od „mało korzystnych” do „dobrych”, zaś w okresie zimy odpowiadają „warunkom niekorzystnym”. Wraz ze wzrostem wysokości bezwzględnej, wskutek spadku temperatury powietrza, a także wzrostu wilgotności, prędkości wiatru i sum opadów, użyteczność pogody dla turystyki maleje. W Zinnwald notowane są „warunki bardzo niekorzystne” w okresie zimy oraz „warunki umiarkowane” w okresie maj-sierpień. W przypadku Śnieżki różnicują się one od „warunków skrajnie niekorzystnych” w zimie do „warunków mało korzystnych” w lecie.

Inną metodą, za pomocą której można przedstawić użyteczność warunków pogodowych dla turystyki, jest diagram informacji klimatyczno-turystycznej (CTIS). Stres gorąca ($PET > 35^{\circ}C$) jest rzadko obserwowany, zaś największa częstość występowania pogody ze stresem zimna ($PET < 0^{\circ}C$) przypada na okres od listopada do marca. W przypadku dni pogodnych ($cloud < 5/8$), wietrznych ($max\ wind > 8\ m/s$), parnych ($vp > 18\ hPa$), suchych ($Prec \leq 1\ mm$) i dni z wysokimi sumami opadów ($Prec \geq 5\ mm$), lepsze warunki w porównaniu do obszarów górskich są notowane na nizinach. Negatywny wpływ na turystykę w obszarach górskich ma duża częstość dni z mgłą i opadem atmosferycznym. Pozytywnym aspektem są natomiast warunki śnieżne dla uprawiania zarówno narciarstwa biegowego ($snow > 10\ cm$), jak i zjazdowego ($snow > 30\ cm$), których największa użyteczność przypada na okres od stycznia do marca.

Analizy trendu zmian częstości występowania pokrywy śnieżnej powyżej 10 i 30 cm wykazują tendencję spadkową, jednakże trend ten nie jest istotny statystycznie.

Tabela 3

Wartości wskaźnika TCI dla wybranych stacji meteorologicznych dla lat 1971–2010

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

Miesiąc/Stacja	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

aktywność niemożliwa

war. mało korzystne

war. doskonałe

war. skrajnie niekorzystne

war. umiarkowane

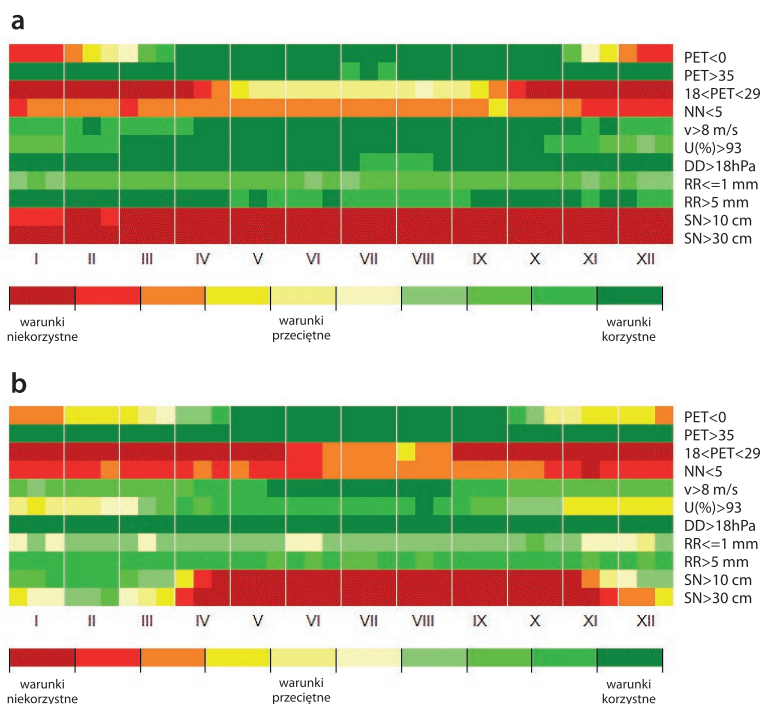
war. idealnie

war. bardzo niekorzystne

war. dobre

war. niekorzystne

war. bardzo dobre



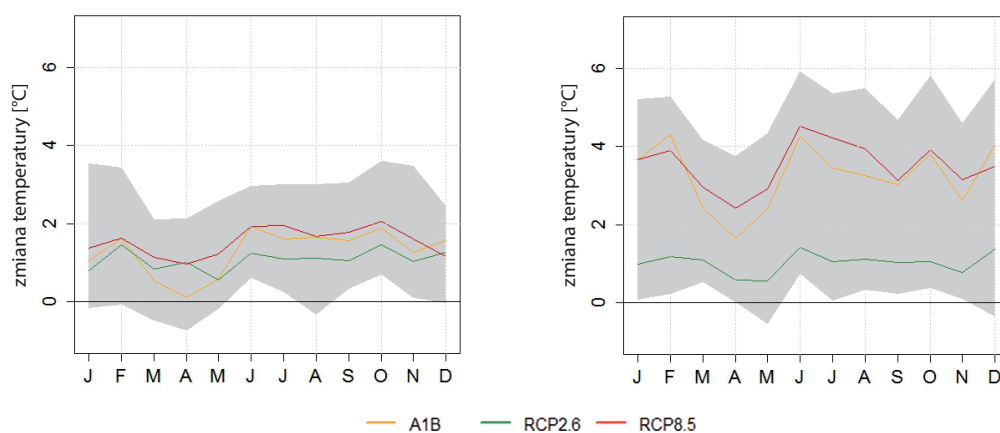
Ryc. 4

CTIS dla okresów dekadowych dla
a) Lindenbergu i
b) Zinnwald dla lat
1971–2010

Projekcje klimatyczne

Dane z projekcji klimatycznych wykazały, że dalsza emisja gazów cieplarnianych może spowodować do końca XXI w. wzrost temperatury powietrza nawet o 4°C. Dlatego też jednym z priorytetów Unii Europejskiej jest zapobieganie wzrostowi temperatury powietrza powyżej 2°C w stosunku do ery przed-industrialnej. Scenariusz zmian klimatu RCP2.6 uwzględnia wszystkie warunki dotyczące emisji i wymuszenia radiacyjnego, niezbędne dla osiągnięcia tego celu („2-degree-target”).

W ramach realizacji projektu KLAPS, przy pomocy tzw. podejścia „multi-model, multi-scenario ensemble” (A1B, RCP2.6, RCP8.5) przedstawiono możliwy zakres zmian klimatu w regionie granicznym Polska-Saksonia. Ocenia się, że w porównaniu do okresu 1971–2000, średnia roczna temperatura powietrza może wzrosnąć odpowiednio o 1,1 i 1,6°C w latach 2021–2050 i 2071–2100 (Ryc. 5). Największy wzrost temperatury powietrza jest oczekiwany dla okresu letniego. Zróżnicowanie przestrzenne zmian pomiędzy górami i nizinami może wynieść od 0,0 do 0,3°C.



Ryc. 5

Zmiany wartości temperatury powietrza w regionie projektu KLAPS [°C] w latach 2021–2050 (po lewej) i 2071–2100 (po prawej) w porównaniu do okresu 1971–2000

Obecny wzrost częstości występowania dni gorących i fal ciepła może być również obserwowany w przyszłości (Tab. 4). Natomiast w horyzoncie czasowym końca XXI w. obniżeniu może ulec liczba dni przymrozkowych oraz długość okresu przymrozkowego. Wydłużeniu czasu trwania sezonu wegetacyjnego towarzyszy tendencja spadkową sum opadów w półroczu ciepłym. Podczas gdy na podstawie danych obserwacyjnych można stwierdzić nieznaczną tendencję wzrostową sum opadu, w przypadku projekcji, w świetle wszystkich scenariuszy, prognozowane jest ich znaczne obniżenie, zarówno dla półrocza ciepłego, jak i całego roku. Okresy suche, w przypadku sezonu letniego, cha-

rakteryzują się łagodnym trendem rosnącym. Natomiast dla opadów silnych nie można stwierdzić wyraźnego trendu zmian. Z uwagi na przewidywany wzrost ewapotranspiracji i mniejsze sumy opadu, klimatyczny bilans wodny może ulec znacznemu obniżeniu podczas lata. Zakres zmian wartości klimatycznego bilansu wodnego odznacza się dużym zróżnicowaniem, w zależności od przyjętego scenariusza. Nieznaczny spadek dostępności zasobów wodnych w regionie projektu jest prognozowany nawet dla okresu zimowego. Największe zmiany w stosunku do stanu obecnego są symulowane dla ostatnich lat bieżącego stulecia.

Tabela 4
Zakres sygnału zmian klimatu dla okresu 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do lat 1971–2000 (na podstawie modelu globalnego ECHAM5 i MPI ESM-LR oraz modelu WETTREG 2013²)

Element meteorologiczny/wskaźnik	Jednostka	2021–2050	2071–2100
Średnia roczna temperatura powietrza	°C	1.1 – 1.6	1.0 – 3.5
Temperatura powietrza – wiosna	°C	0.4 – 1.1	0.8 – 2.8
Temperatura powietrza – lato	°C	1.2 – 1.9	1.2 – 4.3
Temperatura powietrza – jesień	°C	1.2 – 1.8	1.0 – 3.4
Temperatura powietrza – zima	°C	1.2 – 1.3	1.0 – 3.6
Dni gorące	dni	10 – 18	11 – 41
Dni upalne	dni	3 – 6	4 – 20
Noce gorące	dni	0.5 – 0.8	0.5 – 5
Dni przymrozkowe	dni	-18 – -22	-18 – -50
Dni mroźne	dni	-9 – -11	-10 – -26
Suma chłodu	–	-70 – -90	-78 – -194
Fale ciepła	liczba epizodów	1 – 2	1 – 6
Czas trwania okresu z przymrozkami	dni	-8 – -10	-10 – -25
Czas trwania okresu bez przymrozków	dni	12 – 18	10 – 39
Długość sezonu wegetacyjnego	dni	18 – 25	16 – 56
Opad atmosferyczny – półrocze ciepłe (SHY)	mm	2 – -19	-12 – -68
Opad atmosferyczny – półrocze chłodne (WHY)	mm	3 – 5	6 – 17
Okresy suche (SHY)	liczba epizodów	0.0 – 0.1	0.1 – 0.4
Dni z opadami silnymi (SHY)	dni	0.0 – -0.1	-0.1 – -0.2
Dni z opadami silnymi (WHY)	dni	0.0 – 0.1	0.0 – 0.1
Ewapotranspiracja potencjalna	mm	25 – 51	24 – 102
Klimatyczny bilans wodny (SHY)	mm	-15 – -56	-30 – -139
Klimatyczny bilans wodny (WHY)	mm	-1 – -4	2 – -10
Usłonecznienie	godz.	63 – 164	57 – 327

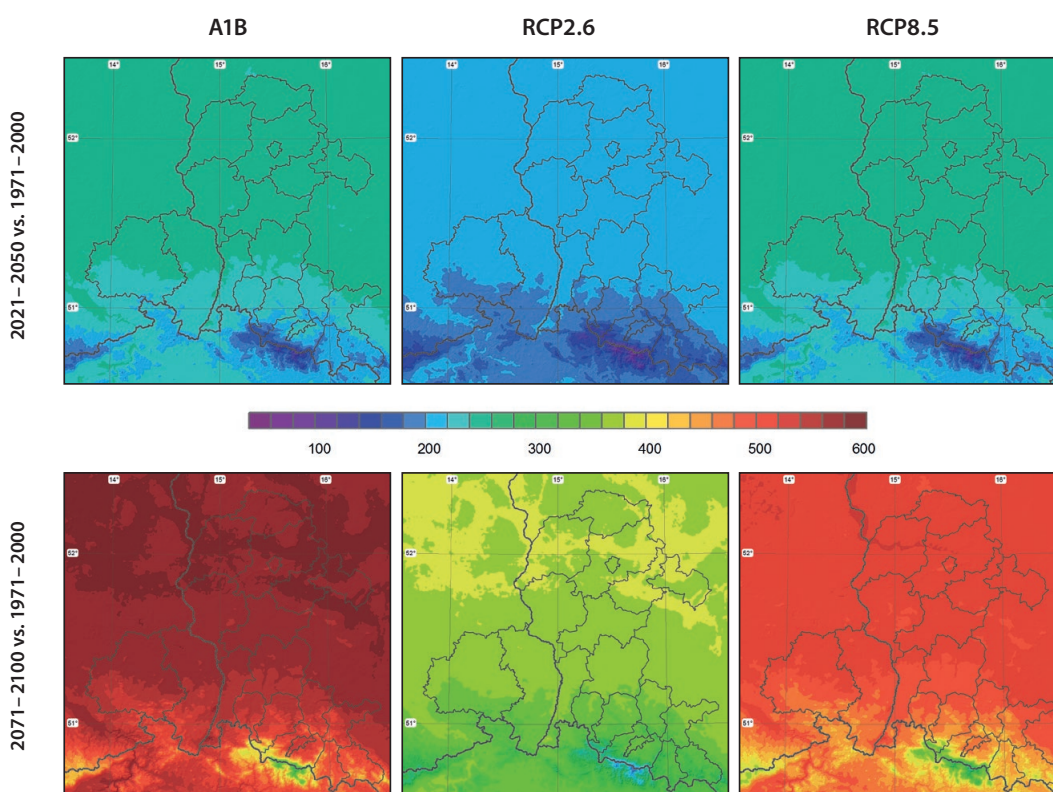
² Tabela 4 zawiera wyniki projektu NEYMO
<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/11547.htm>



Agrometeorologia

W świetle uwzględnionych scenariuszy zmian klimatu, do końca XXI w. przewidywany jest wzrost stopniodni okresu wegetacyjnego i sum temperatur aktywnych (Ryc. 6). Podobnie jak w przypadku charakterystyk klimatologicznych, widoczne jest znaczne zróżnicowanie przestrzenne pomiędzy górami a obszarami nizinnymi.

W przypadku wskaźnika Sielaninowa (HTC), wykazuje on trend malejący, zwłaszcza dla gór. Oznacza to, że deficyt wody może być w przyszłości również obserwowany w obszarach położonych na wyższej wysokości. W zależności od scenariusza, wartość graniczna dla suszy ($HTC < 1$) przebiega na wysokości 450 m n.p.m. (RCP2.6) i 550 m n.p.m. (RCP8.5).



Ryc. 6
Zmiana sygnału wskaźnika stopniodni okresu wegetacyjnego [°C] w latach 2021–2050 (na górze) i 2071–2100 (na dole) względem okresu 1971–2000 w regionie projektu KLAPS

Element	Jednostka	2021–2050	2071–2100
Stopniodni okresu wegetacyjnego (GDD)	°C	204–239	362–555
Suma temperatur aktywnych (SAT)	°C	313–342	531–808
Wskaźnik hydrotermiczny Sielaninowa (HTC)	–	-0.13 – -0.09	-0.31 – -0.17

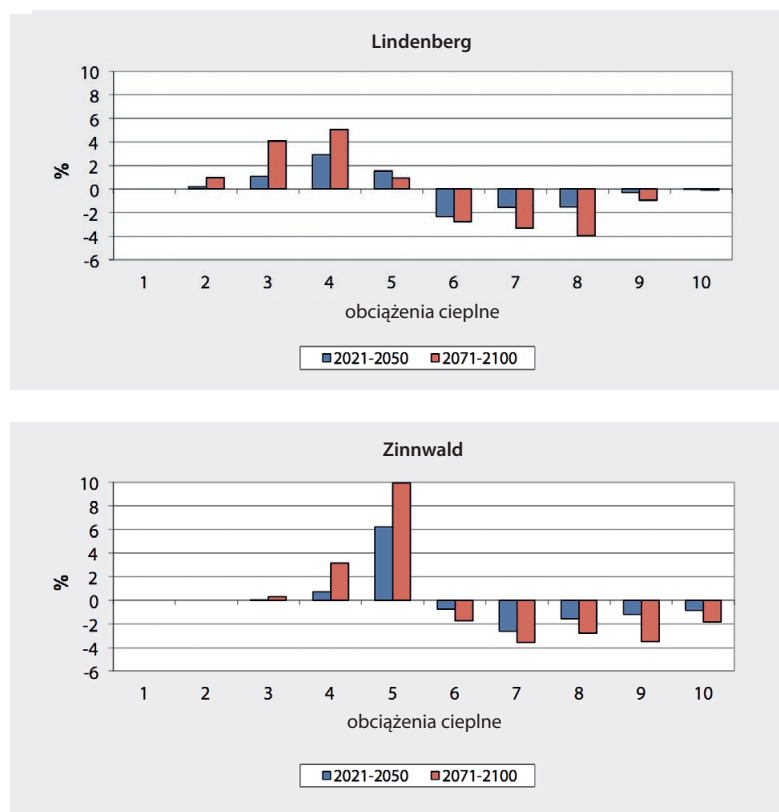
Tabela 5
Zakres zmian sygnału wskaźników agrometeorologicznych w okresie 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000 dla danych gridowych (na podstawie modelu globalnego ECHAM5 i MPI ESM-LR oraz modelu WETTREG 2013)

Biometeorologia

Przewidywane warunki biotermiczne oraz użyteczność warunków pogodowych dla turystyki w regionie, mogą w przyszłości odznaczać się znacznym zróżnicowaniem czasowym i przestrzennym. Najbardziej wyraźne zmiany są symulowane w oparciu o scenariusze A1B i RCP8.5, w horyzoncie czasowym końca XXI w. Potencjalne zmiany będą spowodowane przede wszystkim wzrostem wartości temperatury powietrza i częstości dni słonecznych, a także spadkiem prędkości wiatru. Dla obszarów nizinnych przewidywany jest również wzrost frek-

wencji pogody ze stresem gorąca (Ryc. 7). W górach spodziewany jest wzrost użyteczności pogody dla turystyki w okresie lata. Dla zimy przewidywany jest spadek częstości występowania stresu zimna, ograniczeniu może ulec użyteczność pogody dla sportów zimowych. W przypadku osiągnięcia celu „2-degree-target” (RCP2.6) wpływ zmian klimatu na turystykę w niżej położonych obszarach będzie się charakteryzował mniej negatywnym oddziaływaniem w porównaniu do pozostałych scenariuszy.

Ryc. 7
Różnice częstości występowania poszczególnych rodzajów obciążeń cieplnych w okresie 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000 dla scenariusza RCP8.5 (1 = nieznosny stres ciepła, 2 = bardzo silny stres ciepła, 3 = silny stres ciepła, 4 = umiarkowany stres ciepła, 5 = brak obciążeń cieplnych, 6 = łagodny stres zimna, 7 = umiarkowany stres zimna, 8 = silny stres zimna, 9 = bardzo silny stres zimna, 10 = nieznosny stres zimna)



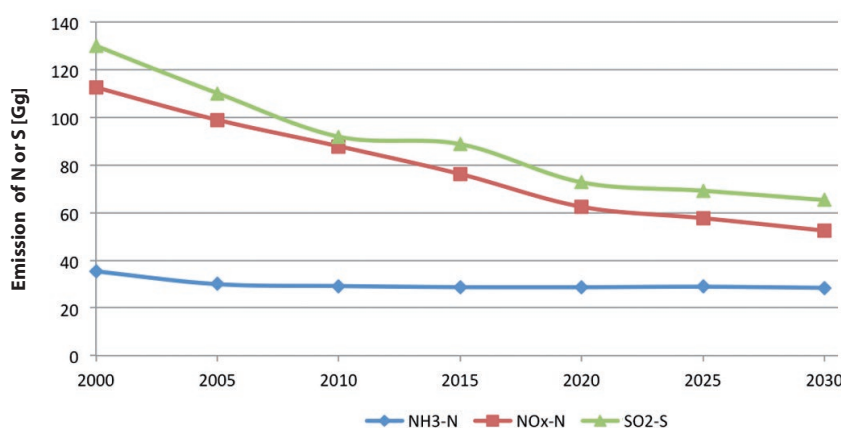


Zanieczyszczenia powietrza

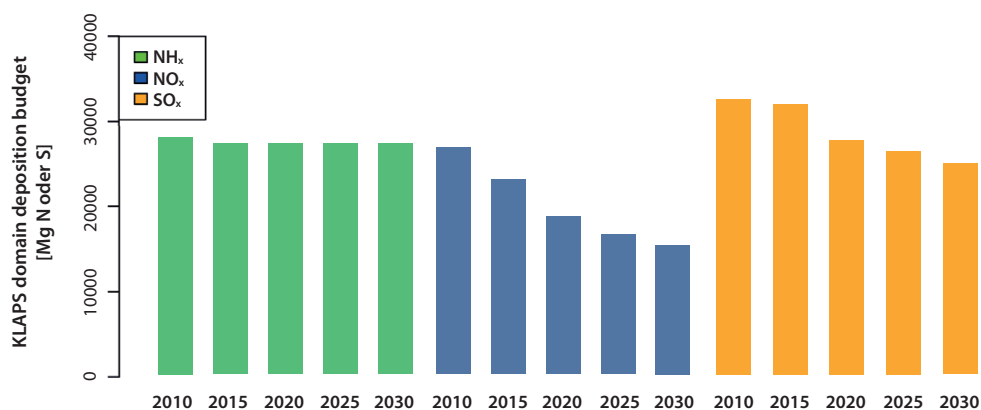
Z powodu intensywnego wykorzystania węgla brunatnego i rozwiniętego przemysłu chemicznego w latach 70' i 80' obszar Saksonii, Dolnego Śląska oraz Czech był nazywany „Czarnym Trójkątem”. Po roku 1990 emisja zanieczyszczeń, głównie ze spalania węgla, została znacznie ograniczona. Wynikało to z jednej strony ze względów ekologicznych, ale ważną rolę odegrały również zmiany polityczne i ekonomiczne w Środkowej Europie. Szczególnie mocno zmniejszeniu uległa emisja dwutlenku siarki (SO_2) oraz tlenków azotu (NO_x). Projekcje emisji do roku 2030 wskazują na dalszą redukcję emisji tych zanieczyszczeń (Ryc. 8). W przypadku amoniaku

(NH_3), po nieznacznym zmniejszeniu do roku 2005, emisja utrzymuje się na mniej więcej stałym poziomie ok. 30 Gg, i taka wielkość może się utrzymywać do roku 2030.

W wyniku redukcji emisji zanieczyszczeń obserwuje się zmniejszenie depozycji tlenków siarki i azotu (Ryc 9). W przypadku azotu zredukowanego, depozycja utrzymuje się na mniej więcej stałym poziomie. Dodatkowo, depozycja NH_x jest głównym źródłem deponowanego azotu po roku 2005.



Ryc. 8
Zmiany emisji SO_2 , NO_x i NH_3 w obszarze projektu KLAPS w okresie 2000–2030



Ryc. 9
Całkowita depozycja SO_x , NO_x , NH_x w okresie 2010–2030 w obszarze projektu KLAPS

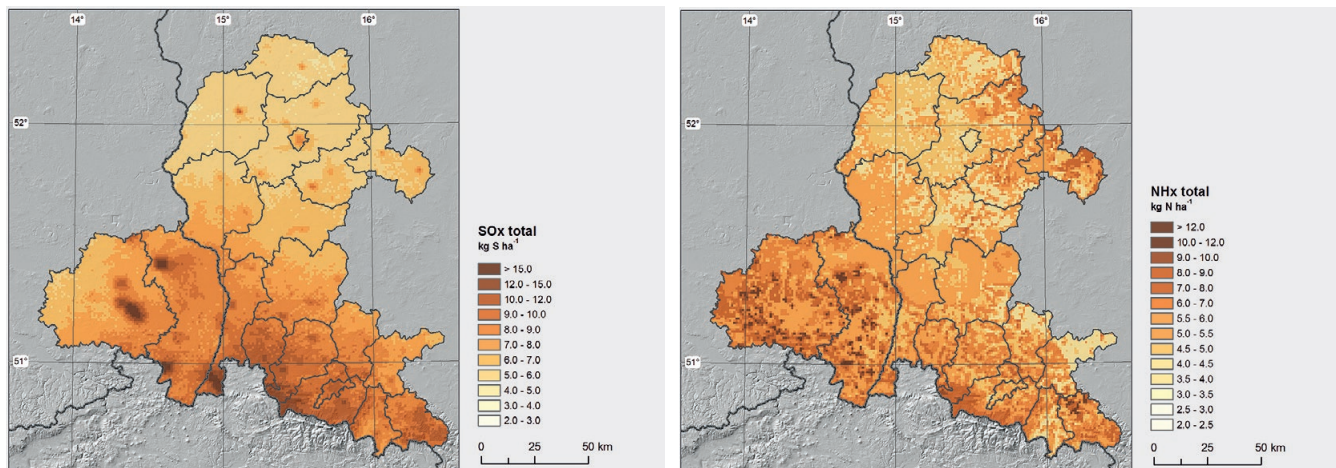
Przestrzenny obraz depozycji SO_x azotu zredukowanego (NH_x) w roku 2010 przedstawia Ryc. 10. Najwyższa depozycja została policzona przez model FRAME dla obszarów górskich (wynik wysokiej mokrej depozycji, potwierdzony także m.in. pomiarami prowadzonymi przez IMGW-PIB) i dla bliskiego sąsiedztwa największych źródeł emisji.

Prognozowane zmiany klimatu w regionie projektu KLAPS wpływają także na depozycję zanieczyszczeń atmosferycznych. Pod koniec 21 wieku spodziewany jest niewielkie zmniejszenie depozycji o ok.

0.5 Gg w porównaniu z okresem 2021–2050 w przypadku scenariuszy A1B i RCP8.5 (Ryc. 11). Głównym czynnikiem wpływającym na zmniejszenie depozycji są zmniejszające się opady atmosferyczne w całym obszarze projektu. Zmiany w depozycji, wynikające ze zmian klimatu, są znacząco mniejsze w porównaniu ze zmianami wynikającymi z ograniczania emisji.

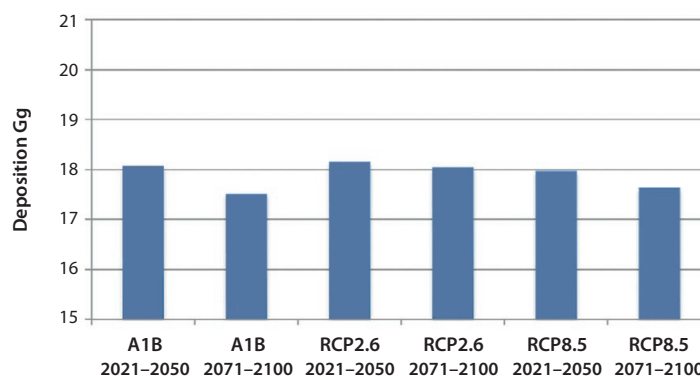
Ryc. 10

Całkowita depozycja SO_x
(lewa strona) i NH_x (prawa)
w roku 2010



Ryc. 11

Depozycja siarki [Gg]
dla scenariuszy zmian
klimatu i stałej emisji
prognozowanej dla roku
2030 w obszarze projektu
KLAPS

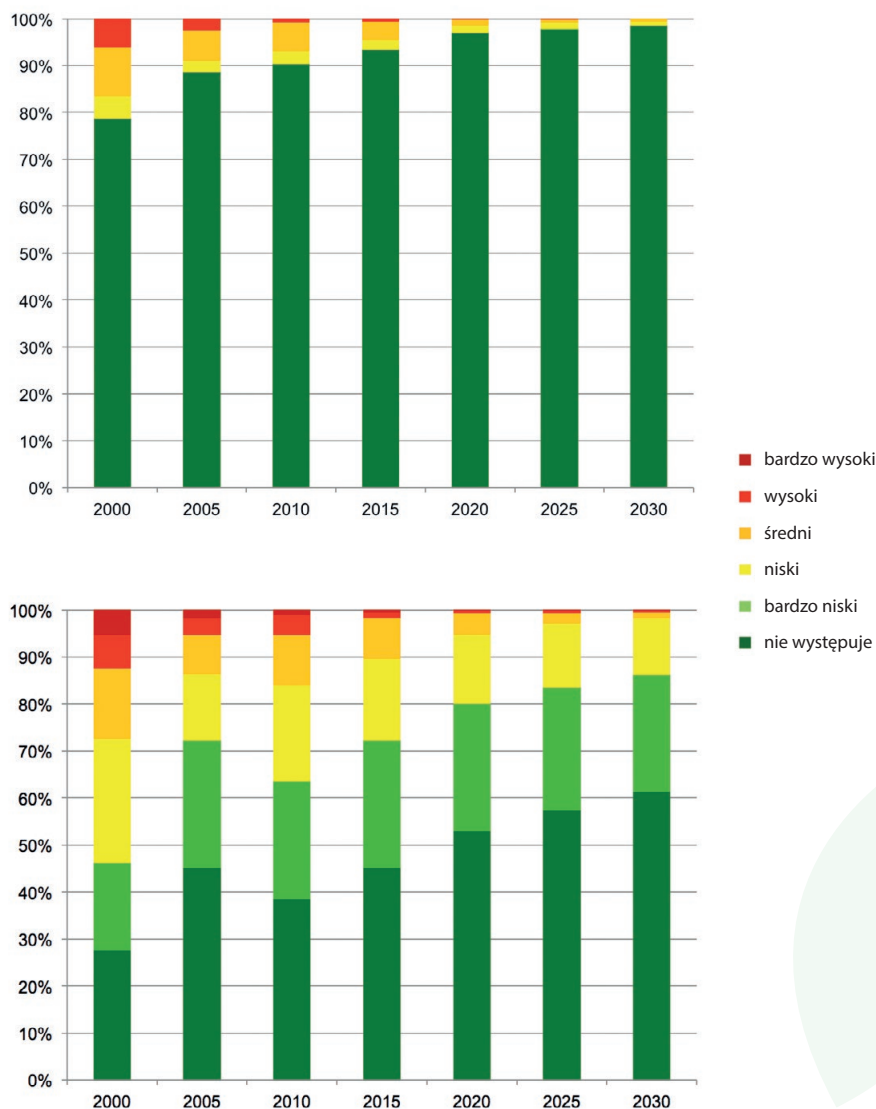




Ładunki krytyczne dla ekosystemów

Wysiłki zmierzające do redukcji zanieczyszczenia powietrza, jakie mają miejsce w ostatnich dekadach, są mierzone poprzez tzw. ładunki krytyczne (Critical Loads) i ich przekroczenia. Zmniejszająca się depozycja związków siarki spowodowała, że ekosystemy zagrożone zakwaszeniem na terenie KLAPS (w szczególności lasy iglaste) stanowiły w roku 2010 ok. 10% (Ryc. 12). Oczekuje się, że prognozowana dalsza redukcja emisji doprowadzi do pełnej ochrony ekosystemów przed zakwaszeniem do roku 2030. Pomimo zmniejszenia emisji związków azotu

(głównie NO_x), eutrofizacja stanowi zagrożenie dla blisko 60% ekosystemów. Dotyczy to szczególnie lasów iglastych, ale także obszarów bagien i torfowisk. Do roku 2030 zagrożenie to będzie dotyczyło ciągle ok. 40% ekosystemów. Podstawowy cel ochrony ekosystemów przed zakwaszeniem i eutrofizacją, zdefiniowany w Konwencji o Bioróżnorodności (Convention on Biodiversity, CBD) nie zostanie osiągnięty przy aktualnie założonych poziomach emisji.

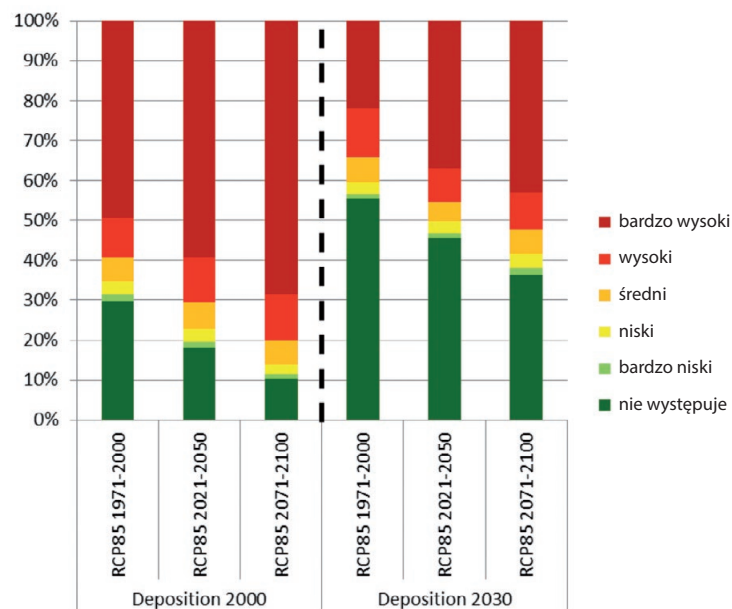


Ryc. 12
Przekroczenia ładunków krytycznych dla zakwaszenia (lewa strona) i eutrofizacji (prawa) w zależności od zmian emisji w okresie 2000–2030

Konieczne jest także rozważenie relacji pomiędzy zmniejszeniem depozycji, kierowanym głównie przez politykę ochrony środowiska, oraz efektami zmian klimatu. Wzrost temperatury i zmniejszanie rocznych sum opadu prowadzi do zwiększenia wrażliwości ekosystemów na depozycję związków azotu do końca 21 wieku (Ryc. 13). Najsilniej ten efekt jest zauważalny w scenariuszu RCP8.5 symulacji 1, w mniejszym stopniu w RCP2.6. Przeciętnie, różnice w ładunkach krytycznych dla eutrofizacji między tymi scenariuszami sięgają ok. $3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$.

Ogólnie, blisko połowa pozytywnego efektu redukcji emisji i depozycji jest kompensowana przez negatywne skutki zmian klimatu. W przyszłości działania zmierzające do zmniejszenia depozycji i ochrony ekosystemów powinny brać pod uwagę zarówno redukcje emisji, jak i skutki zmian klimatu.

Ryc. 13
Klasy zagrożenia ekosystemów eutrofizacją dla depozycji w roku 2000 (lewa strona) i 2030 (prawa) oraz różnych okresów dla scenariusza RCP8.5 run 1





Skutki zmian klimatu i jakości powietrza

Na podstawie wyników projektu KLAPS oraz innych projektów (np. NEYMO, REGKLAM itp.³) podsumowane zostały przypuszczalne skutki zmian klimatu

w obszarze badań. Lista ma charakter otwarty, a przedstawione w niej wnioski mają charakter ogólny dla całego regionu.



Foto: LfULG

Rolnictwo

- zwiększenie produkcji, szczególnie w obszarach chłodnych i wyżej położonych w południowej części regionu
- zwiększenie wielkości produkcji i jakości owoców w wyniku zwiększenia liczby godzin z promieniowaniem słonecznym jesienią
- zwiększenie produkcji ozimin i gatunków ciepłolubnych przy założeniu dostatecznej ilości wody
- zmniejszenie stabilności produkcji w wyniku wysokiej zmienności warunków pogodowych w ciągu roku
- szczególnie w północnej części obszaru projektu, zmniejszenie produkcji w wyniku ujemnego klimatologicznego bilansu wodnego w sezonie wegetacyjnym
- wysoka zmienność produkcji roślinnej na glebach piaszczystych w przypadku odmian mających wysokie zapotrzebowanie na wodę, jak kukurydza, ziemniaki i buraki, szczególnie w latach suchych
- zwiększona częstość występowania suszy w okresie letnim z powodu wysokiej ewapotranspiracji
- zwiększone ryzyko zniszczenia gleb z powodu erozji w wyniku gwałtownych opadów deszczu, szczególnie po okresach suszy
- spadek jakości lub całkowite zniszczenie upraw np. sadowniczych czy winorośli w wyniku gwałtownych opadów lub gradobicia
- zwiększenie erozji eolicznej w okresach suchych
- zagrożenie późnymi przymrozkami z powodu wcześniejszego początku okresu wegetacyjnego i wysiewu
- rozprzestrzenianie się gatunków ciepłolubnych
- w niektórych przypadkach ograniczona skuteczność działania pestycydów w okresach gorących i suchych

³ Więcej informacji o mitygacji i adaptacji do zmian klimatu w Saksonii (s. 21)



Foto: Marco Schwarzak Fotografi

Leśnictwo

- przesunięcie obszarów dogodnych dla lasów świerkowych z powodu zmian klimatu (cieplej i bardziej sucho)
- zmiana składu gatunkowego lasów
- redystrybucja natywnych gatunków drzew
- rozprzestrzenianie się gatunków ciepłolubnych, także na wyższych wysokościach
- zmniejszenie witalności i objętości drewna na obszarach nizinnych z powodu ujemnego klimatologicznego bilansu wodnego i susz w okresie letnim
- zmniejszenie produkcji świerka z powodu susz
- zwiększone ryzyko pożarów lasów
- zmniejszona depozycja zanieczyszczeń zakwaszających i eutrofizujących w wyniku zmniejszania się sum opadu i ograniczania emisji



Bilans wodny i zarządzanie zasobami wodnymi

- szczególnie na obszarze nizinnym – obniżenie poziomu wód gruntowych z powodu zmniejszonego zasilania wód podziemnych w wyniku redukcji opadu atmosferycznego, zwiększonego parowania i zasilania wodami powierzchniowymi w okresach suchych w czasie lata
- zmiany właściwości chemicznych i biologicznych wód gruntowych w wyniku wzrostu temperatury wody
- zwiększenie ryzyka dla ekosystemów rzecznych z powodu niskich stanów wód i wzrostu temperatury wody
- redukcja powierzchni, wzrost zamulenia i częstsze wysychanie zbiorników wodnych z powodu zwiększonego parowania i deficytu opadów
- zmniejszenie odpływu powierzchniowego w wyniku zmniejszania się opadu w lecie
- zmniejszenie zasilania zbiorników wodnych
- znaczny negatywny klimatologiczny bilans wodny w miesiącach letnich
- ryzyko wystąpienia sinic z powodu wzrostu temperatury i dopływu promieniowania słonecznego, nadmiernej depozycji związków azotu i fosforu oraz zmniejszonego zasilania zbiorników w lecie
- pogorszenie warunków ekologicznych w wyniku zwiększonej dostawy zanieczyszczeń podczas epizodów wystąpienia wysokich opadów
- zwiększenie ryzyka wystąpienia lokalnych powodzi, w tym także wynikających z nieefektywnej kanalizacji
- zwiększone ryzyko powodzi w wyniku wystąpienia intensywnych konwekcyjnych opadów w lecie
- zmniejszenie zagrożenia powodzią roztopową jako skutek zmniejszonej akumulacji śniegu z powodu cieplejszych zim
- ryzyko zakwaszenia zbiorników powyrobowych i wód podziemnych z powodu małego zasilania



Foto: LfULG



Foto: LfULG

Hodowla ryb

- zagrożenie dla hodowli ryb z powodu gwałtownych opadów i powodzi
- straty energii i zaburzenia rytmu biologicznego u ryb z powodu braku pokrywy lodowej i wyższych temperatur
- zmniejszenie dochodów i wzrost śmiertelności ryb z powodu deficytu wody



Obszary zamieszkałe

- zwiększone zanieczyszczenie powietrza ze względu na częstsze i dłuższe okresy suche
- destabilizacja bilansu wodnego gleby na obszarach zurbanizowanych
- pogorszenie się stanu i zmniejszenie funkcji regulacyjnych obszarów zielonych na terenach zurbanizowanych z powodu częstszych i dłużej trwających okresów suchych
- konieczność wykonania nowych instalacji technicznych w budynkach (np. zapotrzebowanie na klimatyzację w lecie, ochrona przed ciepłem i powodzią)
- pogorszenie się klimatu wewnątrz pomieszczeń z powodu wzrostu temperatury powietrza
- zmniejszone zapotrzebowanie na ogrzewanie w zimie

Ludność

- obniżenie jakości życia ludności z powodu wzrostu temperatury powietrza (np. wzrost częstości dni gorących, nocy gorących i fal upałów)
- wzrost problemów ze zdrowiem (np. alergie, infekcje, problemy z krążeniem) z powodu wzrostu temperatury powietrza i stężeń pyłu zawieszonego
- zmniejszenie stresu zimna w półroczu chłodnym

Turystyka

- Wydłużenie okresu optymalnego pod względem warunków pogodowych dla turystyki
- wydłużenie okresu przebywania na świeżym powietrzu (np. w ogródkach kawiarnianych/piwnych, pływanie w otwartych akwenach)
- wzrost częstości stresu gorąca, szczególnie w miastach i na obszarach nizinnych
- wzrost potencjału turystycznego w obszarach górskich latem
- skrócenie okresu zalegania lub brak porywy śnieżnej w sezonie zimowym
- wzrost zmienności pogody
- zwiększenie wpływu ekstremów pogodowych na potencjał turystyczny regionu



Więcej informacji o mitygacji i adaptacji do zmian klimatu w Saksonii

Adaptacje do zmian klimatu w Saksonii – strona internetowa SMUL:
www.klima.sachsen.de

Program energia i klimat Saksonii 2012:
<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/klima/30157.htm>

Kompendium o klimacie Saksonii – Strategie klimatyczne
http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Klimakompendium_ST.pdf

Regionalny System Informacji o Klimacie:
www.rekis.org

Regionalny Program Adaptacji do Zmian Klimatu – Model dla Regionu Drezna:
www.regklam.de

Zmiany klimatu i rolnictwo – strategie adaptacyjne dla rolnictwa w Saksonii:
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11557>

Adaptacje rolnictwa w Saksonii do zmian klimatu:
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11449>

Analiza wrażliwości Łużyc i Dolnego Śląska:
<http://www.rpv-oberlausitz-niederschlesien.de/projekte/regionales-energie-und-klimaschutzkonzept-klimaanpassungsstrategie/regionale-klimaanpassungsstrategie/ergebnisse.html>

Analiza w zakresie potrzeb działań adaptacyjnych do zmian klimatu:
BERNHOFER, C. et al. (2007): Analyse zum Handlungsbedarf im Bereich Klimaanpassung.
Studie im Auftrag des Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden

Publikacje projektu KLAPS

Publikacje projektu (dostępne online oraz w wersji papierowej):

Tom 1: Klimat obszaru granicznego Polski i Saksonii:
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/21673>

Tom 2: Projekcje klimatu, zanieczyszczenia powietrza i ładunków krytycznych dla ekosystemów:
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/23356>

Raporty projektu (dostępne online):

Ökologische Belastungsgrenzen von Ökosystemen (opracowanie dostępne w języku niemieckim)
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22073>

Erstellung von Windrosen im Rahmen von KLAPS (opracowanie dostępne w języku niemieckim)
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/23037>

Ozonanalyse im polnisch-sächsischen Grenzraum (opracowanie dostępne w języku niemieckim)
Publikationsdatenbank des LfULG
<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 Wrocławski
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

Notatka bibliograficzna

Wydawca:

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

Redakcja:

Susann Schwarzak, Irena Otop, Maciej Kryza, Andreas Völlings

Zdjęcie na okładce:

Hoch3 GmbH
Wykorzystano mapę obszaru KLAPS (Mehler et al. 2014)
orz zdjęcie „Tablets with a bar graph” (pedrosek/Shutterstock.com)

Przygotowanie do druku:

Hoch3 GmbH, Berlin

Data wydania:

05.01.2015
(2. wydanie poprawione)

Publikacja może być uzyskana nieodpłatnie z:

Broszura nie jest dostępna w wersji drukowanej, ale można
pobrać w postaci pliku PDF na www.klaps-project.eu.

Informacja ogólna:

Niniejsza publikacja została wydana przez Rząd Saksonii w ramach konstytucyjnego obowiązku informowania społeczeństwa. Materiały nie mogą być wykorzystane przez partie polityczne, kandydatów w wyborach lub osób zaangażowanych w wybory w inny sposób w okresie sześciu miesięcy przed nadchodzącymi wyborami. Dotyczy to wszystkich wyborów.

