



KLAPS • Projekcje klimatu, zanieczyszczenia powietrza i ładunki krytyczne w regionie granicznym Polski i Saksonii

Projekcje klimatu, zanieczyszczenia powietrza i ładunki krytyczne w regionie granicznym Polski i Saksonii




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





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

Projekcje klimatu, zanieczyszczenia powietrza i ładunki krytyczne w regionie granicznym Polski i Saksonii



Autorzy

Część A i B

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

Susann Schwarzak
we współpracy z Andreas Völlings i Michaela Surke

Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego

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

**Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut
Badawczy, Oddział Wrocław**

Bartłomiej Miszuk
Irena Otop
Ewa Liana
Marzenna Strońska
Agnieszka Kolanek

Część C

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

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

Recenzenci:
Dr hab. Krystyna Bryś
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Prof. dr hab. Zbigniew Szwejkowski
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie



Spis treści

A Projekcje klimatu

Wprowadzenie do problematyki globalnego ocieplenia	7
Historyczne zmiany klimatu	7
Przyczyny zmian klimatycznych	7
Zdarzenia ekstremalne	9
Podstawy modelowania klimatu	10
Globalne i regionalne modele klimatyczne	10
Scenariusze klimatyczne	11
Niepewność	12
Baza danych i metody badawcze	13
Regionalny model klimatyczny WETTREG	13
Wybrane scenariusze klimatyczne	14
Podejście zespołowe	14
Przedział ufności	15
Analiza projekcji klimatu w skali regionalnej	15
Wyniki	16
Walidacja modelu	16
Temperatura powietrza	16
Wskaźniki agroklimatyczne	28
Wskaźniki bioklimatyczne i turystyczne	33
Podsumowanie	46
Temperatura powietrza	46
Agroklimat	46
Bioklimat	46

B Modelowanie zanieczyszczeń powietrza

Wprowadzenie do zagadnień modelowania zanieczyszczeń	49
Dane i metody	49
Model FRAME	49
Dane wejściowe do modelu FRAME	51
Weryfikacja wyników modelu FRAME	56
Podsumowanie symulacji wykonanych modelem FRAME	64
Wyniki	65
Aktualna depozycja zanieczyszczeń	65
Przyszłe zmiany w depozycji	65
Podsumowanie i wnioski	69

C Ładunki krytyczne

Wprowadzenie do problematyki ładunków krytycznych	71
Dane i metody	71
Wyniki	73
Ładunki krytyczne dla okresu referencyjnego 1971 – 2000	73
Ładunki krytyczne a różne scenariusze klimatu	75
Przekroczenia ładunków krytycznych związane ze zmianami emisji w latach 2000 – 2030	76
Ocena skutków zanieczyszczeń powietrza i zmian klimatu na zagrożenie ekosystemów	77
Porównanie z innymi badaniami	78
Wnioski	79
Spis literatury	80
Spis rysunków	84
Spis tabel	89
Notatka bibliograficzna	90



Wstęp

Ochrona klimatu oraz adaptacje do zmian klimatu są wyzwaniem XXI wieku. Klimat obszaru pogranicza Polski i Saksonii ociepla się, w przyszłości nadal będzie się zmieniał, a zachodzące zmiany stają się nowym wyzwaniem. Obniżenie plonów spowodowane przez suszę czy silne opady, rozwój szkodników i chorób, szkody powstałe w wyniku powodzi i gwałtownych burz oraz straty ekonomiczne w obszarach górskich spowodowane przez bezśnieżne zimy, mają negatywny wpływ na środowisko i społeczeństwo. Zapewnienie podobnych warunków życia następnym pokoleniom, bez znacznego ich pogorszenia się w przyszłości, może być osiągnięte przez wprowadzenie regulacji dotyczących ochrony klimatu. Sposoby redukcji gazów cieplarnianych mają wpływ na to jak silne będą zmiany klimatu oraz jaki świat zostawimy naszym dzieciom. Zmiany klimatu powodują nieuniknione konsekwencje, jednak rozwijanie odpowiednich działań mitygacyjnych i adaptacyjnych może ograniczyć ryzyko wynikające ze zmian klimatu lub pozwoli skorzystać z potencjalnych szans.

Niniejsze opracowanie oraz wcześniejsza publikacja „Zmiany klimatu w regionie granicznym Polski i Saksonii” (Mehler et al. 2014) przedstawiają kompleksowe analizy obecnych i przyszłych warunków klimatycznych oraz jakości powietrza w regionie granicznym Polska-Saksonia. Podstawą analiz jest transgraniczna baza danych. Odpowiednie wskaźniki pozwalają ocenić zachodzące zmiany klimatu oraz podkreślają potrzebę podjęcia niezbędnych działań. Projekcje przyszłych warunków klimatycznych symulowane na podstawie różnych scenariuszy i modeli globalnych pozwoliły uzyskać szeroki zakres przyszłych realizacji warunków klimatycznych (podejście ensamble).

W części A niniejszej publikacji przedstawione są projekcje zmian klimatu w bliższej i dalszej przyszłości. Część B zawiera wyniki modelowania zanieczyszczeń powietrza. Natomiast w części C zostały określone ładunki krytyczne dla ekosystemów na podstawie projekcji klimatu oraz scenariuszy emisji.



A

Projekcije klimatu





Wprowadzenie do problematyki globalnego ocieplenia

Klimat nie ma charakteru stabilnego, charakteryzuje się zmianami w czasie i przestrzeni. Wieloletnie pomiary meteorologiczne prowadzone w Europie Centralnej dokumentują skalę tych zmian oraz wskazują na wzrost globalnej temperatury powietrza o 1 °C począwszy od 1900 roku. Jest coraz więcej przesłanek, że współczesne zmiany klimatu są odpowiedzialne za wzrost częstości ekstremalnych zdarzeń pogodowych (IPCC 2013). Na przykład, zgodnie z Munich Reinsurance Company, straty związane z gwałtownymi burzami w USA uległy podwojeniu w okresie 1990–2009 w porównaniu z 1970–1989 (MUNICH RE 2002). Poza tym, bazując na projekcjach klimatycznych szacuje się, że prognozowana emisja gazów cieplarnianych doprowadzi do wzrostu globalnej temperatury powietrza nawet o 4 °C, co spowoduje zmiany w systemie klimatycznym (IPCC 2013). Stąd dalszy wzrost frekwencji ekstremalnych zdarzeń pogodowych jest bardzo prawdopodobny. Ciepłsza atmosfera przekłada się także na wzrost maksymalnej prężności pary wodnej, co może doprowadzić do większej częstości zdarzeń z wydajnymi opadami atmosferycznymi. Dotyczy to szczególnie gwałtownych burz, ponieważ im więcej pary wodnej w atmosferze, tym większa energia chwiejności. Z drugiej strony, ciepłsza atmosfera może spowodować wzrost ewapotranspiracji i w dalszej konsekwencji wydłużanie się okresów bezopadowych oraz suszy. Sprzyjają temu stacjonarne wyżowe układy baryczne, które mogą blokować cyrkulację z sektora zachodniego i przyczyniać się do pojawiania się ekstremów pogodowych, takich jak fale upałów, susze, ale także nawalnych opadów. Taka sytuacja miała miejsce w roku 2003 w Europie Środkowej.

Jednym z klimatycznych celów Unii Europejskiej jest tzw. „2-degree target”. Oznacza on utrzymanie wzrostu globalnej temperatury powietrza na poziomie niższym niż 2 °C, w porównaniu z okresem referencyjnym, tj. przedindustrialnym. Daje także szansę na uniknięcie „niebezpiecznej ingerencji w system klimatyczny” (2 artykuł UNFCCC). Aby osiągnąć wspomniany cel, globalna emisja zanieczyszczeń w skali roku powinna być zredukowana do poziomu 2 Gt (JAEGER & OPPENHEIMER 2005). Scenariusz klimatyczny RCP2.6, zawarty w raporcie UNFCCC, uwzględnia założenia emisyjne oraz poziom wymuszenia radiacyjnego, aby w dłuższej perspektywie stało się możliwe osiągnięcie zakładanego celu („2-degree-target”).

Historyczne zmiany klimatu

Należy przyjąć, że zmienność klimatu w skali globalnej oraz regionalnej to jego typowa cecha (Ryc. 1). W plejstocenie (od 2,6 do 0,01 milionów lat temu) zlodowacenia i okresy cieplejsze przeplatały się, a zasięg lądolodu zmieniał się od północnej Europy po Saksonię i południową Polskę. W okresie od 1350 do 1850 roku nazywanym „małą epoką lodową” globalna temperatura powietrza była o około 1 stopień niższa niż dzisiaj, podczas gdy w Średniowieczu (Medieval Warm Period; od 950 do 1250 roku) oraz w czasie optimum klimatycznego w czasach rzymskich była o 1 stopień wyższa (SCHÖNWIESE 1992). Jednakże wzrost temperatury globalnej, odnotowany w drugiej połowie XX w., jest wyjątkowy, co do tempa oraz swej skali. MOBERG i in. (2005) przyjmują, że aktualna temperatura powietrza na półkuli północnej jest najwyższa od 2000 lat.

Istotny trend wzrostowy temperatury powietrza, 1,1 °C w okresie 1971–2010, jest także obserwowany na pograniczu Polski i Saksonii. O ile największy wzrost jest typowy dla wiosny i lata, o tyle jest on bardziej umiarkowany jesienią i w czasie zimy (odpowiednio 1,0 °C i 0,2 °C) (MEHLER i in. 2014).

Przyczyny zmian klimatycznych

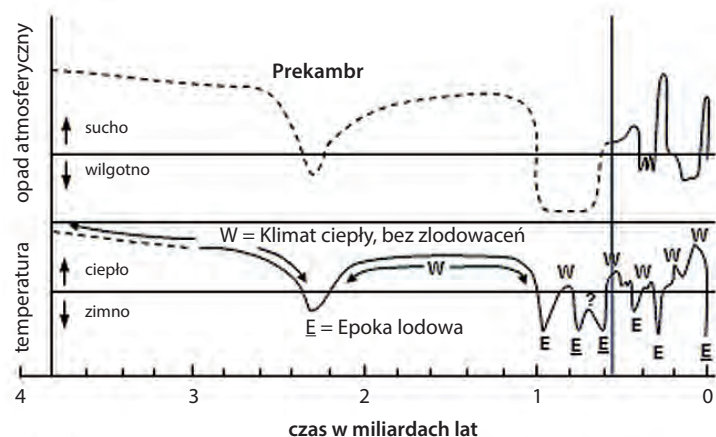
Do głównych przyczyn zmian klimatu należy zaliczyć:

- zmiany w natężeniu promieniowania słonecznego,
- zmiany globalnego albedo (współczynnik odbicia),
- zmiany natężenia promieniowania długofalowego,
- naturalne uwarunkowania tkwiące w strukturze systemu klimatycznego.

Zmiany w natężeniu promieniowania słonecznego

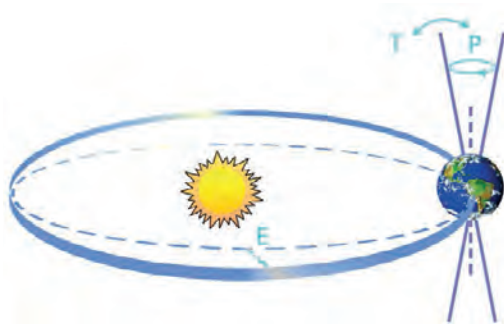
Promieniowanie słoneczne cechuje się wieloma fluktuacjami i dlatego ma istotny wpływ na klimat globalny. Te zmiany są wywołane przede wszystkim

Ryc. 1
Rekonstrukcja średniej temperatury powietrza i opadu dla 3,8 miliarda lat.
E = epoka lodowa, E (podkreślone) = epoka lodowa z rozwojem pokrywy lądolodu na obu polach podbiegunowych, W = ocieplenie klimatu i brak pokrywy lądolodu (ze zmianami, za SCHÖNWIESE 1992)



Ryc. 2

Zmiany parametrów orbity ziemskiej (cykl Milankowicia): „P” precesja; orbita jest mniej lub bardziej ekscentryczna, „T” odchylenie osi ziemskiej zmieniające się w przedziale pomiędzy 21,5° a 24,5°, „E” mimośród; stosownie do nachylenia osi ziemskiej, północna lub południowa półkula zwraca się w stronę Słońca (IPCC 2007, FAQ 6.1, Fig. 1, RAHMSTORF i SCHELLENHUBER 2006)



przez zmiany parametrów orbity ziemskiej (cykl Milankowicia, Ryc. 2) oraz aktywności słonecznej. Podczas gdy tzw. cykl aktywności słonecznej (związany z liczbą pojawiających się plam słonecznych) trwa 11 lat, to periodyczne zmiany parametrów orbity ziemskiej, obejmujące ekscentryczność i nachylenie ekliptyki oraz precesję (tzw. cykl Milankowicia) obejmują tysiące lat. Takie długoterminowe wahania są zapewne odpowiedzialne za kolejne fale ochłodzenia i zlodowaceń oraz wzrostu temperatury globalnej w plejstocenie (SCHÖNWIESE 2003).

Zmiany globalnego albedo

Pewna część promieniowania słonecznego jest odbijana przez atmosferę (albedo atmosferyczne), a kolejna część przez powierzchnię ziemi (albedo ziemskie). Zmiany albedo atmosferycznego są uwarunkowane czynnikami pochodzenia naturalnego (np. aktywność wulkaniczna) lub antropogenicznego (np. emisja zanieczyszczeń do atmosfery). Promieniowanie słoneczne jest w dużej części odbijane przez chmury oraz aeroszol atmosferyczny (jądra kondensacji i kryształki lodu). W przypadku powierzchni ziemi (rozkład ląd-lodowce-woda)

współczynnik odbicia jest zależny od jej jasności (barwy). Na przykład, powierzchnia pokryta lodem lub śniegiem, ma większe albedo i może być znacznie chłodniejsza niż taka sama powierzchnia pozbawiona tej pokrywy. Stąd zmniejszanie się powierzchni pokrywy lodowej i śnieżnej prowadzi do redukcji albedo i w dalszej konsekwencji wzrostu temperatury powietrza. Jednocześnie poszerzanie się obszarów wylesień i m.in. urbanizacja sprawiają, że także człowiek może w istotny sposób wpływać na klimat Ziemi.

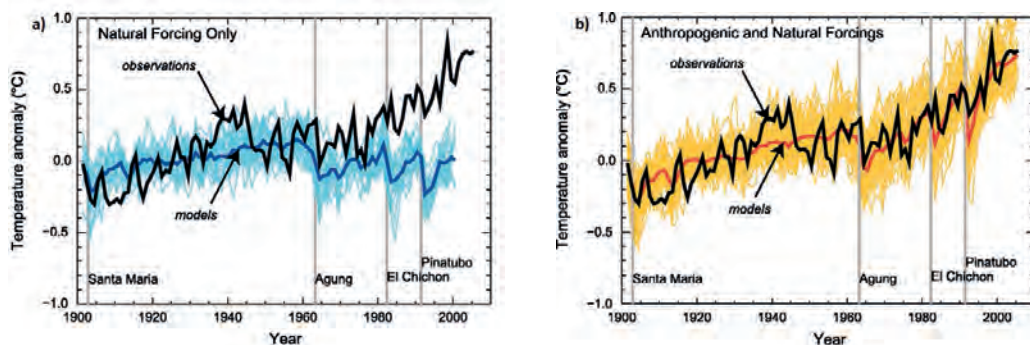
Zmiany natężenia promieniowania długofalowego

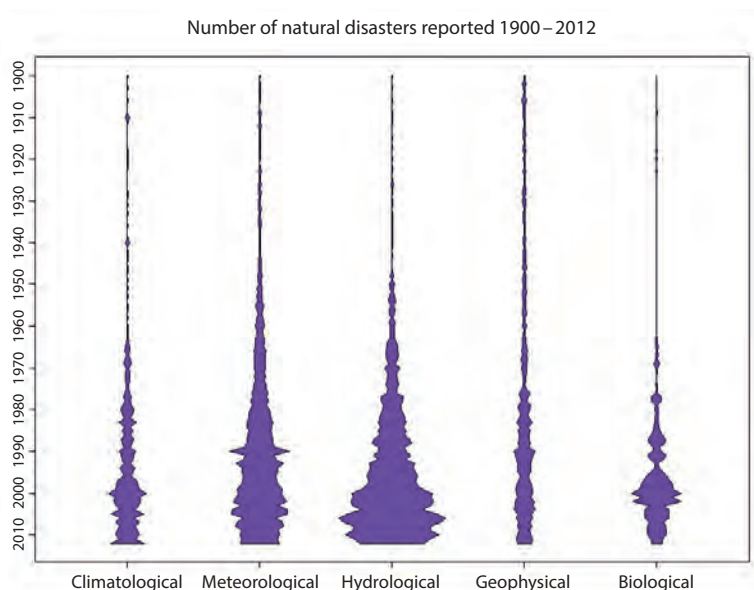
Krótkofalowe promieniowanie słoneczne przenika przez atmosferę ziemską i jest pochłaniane przez powierzchnię ziemi. Z kolei gazy szklarniowe obecne w atmosferze ziemskiej pochłaniają część długofalowego promieniowania emitowanego z powierzchni ziemi. Bez naturalnego efektu szklarniowego globalna temperatura powietrza kształtowałaby się na poziomie -18°C . Stopniowa industrializacja przyczynia się do tego, że człowiek jest coraz bardziej odpowiedzialny za zmiany w stężeniu niektórych gazów występujących w atmosferze ziemskiej. Spalanie paliw kopalnych oraz postępująca deforestacja przyczyniają się do wzrostu koncentracji dwutlenku węgla, którego stężenie wynosi obecnie około 400 ppm, przy 280 ppm w okresie przedindustrialnym.

Wyniki zaprezentowane w raportach IPCC wskazują, że wzrost temperatury powietrza w skali globalnej i regionalnej należy wiązać bezpośrednio z czynnikiem antropogenicznym (IPCC 2007, 2013). Emisja gazów cieplarnianych oraz aerozolu charakteryzuje się istotną statystycznie korelacją z obserwowanym globalnym wzrostem temperatury. Z kolei modele, które uwzględniają przede wszystkim czynniki naturalne nie są w stanie uzasadnić tak szybkiego wzrostu temperatury (Ryc. 3).

Ryc. 3

Anomalie średniej globalnej temperatury powietrza, przyjmując jako poziom wyjściowy rok 1901, wielkości zmierzone (czarna linia, HadCRUT3a) oraz uzyskane z symulacji uwzględniających czynniki o genezie tylko naturalnej (a). Gruba niebieska linia pokazuje wielkości uśrednione z wielu różnych modeli, a cienkie linie jasnoniebieskie odnoszą się do wskazań indywidualnych modeli. Pionowa szara linia wyznacza momenty ważnych erupcji wulkanicznych; (b) tak jak w przypadku (a), ale z uwzględnieniem czynników naturalnych i antropogenicznych, bez anomalii średniej globalnej temperatury powietrza. Gruba czerwona linia pokazuje wielkości uśrednione z kilku modeli, a cienkie i jasno-brązowe linie odnoszą się do wskazań indywidualnych modeli (IPCC 2007, Fig. 9.5)





Ryc. 4

Liczba klęsk żywiołowych wywołanych czynnikami naturalnymi w okresie 1900–2012 (EM-DATA: OFDA/CRED International Disaster Database, www.emdat.be – Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium)

Naturalne uwarunkowania tkwiące w strukturze systemu klimatycznego

Jednym z przykładów naturalnej zmienności klimatu jest zjawisko El Niño (z hiszp. dzieciątko Jezus), które występuje na Pacyfiku w strefie zwrotnikowej, u wybrzeży Ameryki Południowej. Powstaje, gdy słabnie wiejący ze wschodu pasat i następuje zahamowanie upwellingu. Skutkiem jest ponadprzeciętny wzrost temperatury na powierzchni wody. W regionach takich jak Peru, gdzie przeważnie jest dość sucho, pod wpływem El Niño notowane są wysokie sumy opadów. Natomiast w tym samym czasie w Australii występują długookresowe susze. Ponieważ istnieje związek pomiędzy El Niño i Oscylacją Południową, dlatego są często traktowane łącznie, jako zjawisko ENSO (LATIF 2003).

Na zmienność klimatu w północnej części Oceanu Atlantyckiego i Europy w dużej stopniu wpływa Oscylacja Północno-Atlantycka (NAO) (HURELL 1995, HURELL & VAN LOON 1997). Dodatnia wartość wskaźnika NAO (różnica ciśnienia atmosferycznego pomiędzy dwoma quasi-stacjonarnymi układami barycznymi – Wyżem Azorskim i Niżem Islandzkim) przekłada się na łagodne zimy w Europie i bardzo mroźne w północnej części Kanady (np. zima 2013/2014).

Zdarzenia ekstremalne

Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO 2014) liczba naturalnych klęsk żywiołowych na świecie nieu-

stannie rośnie, począwszy od roku 1900. Największy wzrost częstości ekstremalnych zjawisk meteorologicznych (huragany, gwałtowne burze) oraz hydrologicznych (np. powodzie) przypada na ostatnie 4 dekady (Ryc. 4).

Klęskami żywiołowymi, które na pograniczu Polski i Saksonii powodują największe straty materialne i społeczne oraz przyczyniają się do wielu negatywnych konsekwencji dla środowiska naturalnego, są powodzie oraz huraganowy wiatr. W Saksonii, od początku wieku XX, najbardziej tragiczne w skutkach były powodzie, które wystąpiły na Łabie w roku 2002 i 2013, natomiast w Polsce były to powodzie na Odrze w roku 1997 i 2010 (Tabela 1). Z kolei zimowy cyklon i jednocześnie huragan Cyryl z 18 stycznia 2007 roku, spowodował ogromne zniszczenia w Saksonii. W całej Europie zginęło 55 osób, w tym 13 osób w Niemczech i 6 w Polsce. Na terenie Niemiec żywioł spowodował zniszczenia w drzewostanie obejmujące około 37 mln m³ grubizny, natomiast w lasach Sudetów Zachodnich 1,1 mln m³. Znacznie mniejsze szkody poczynił huragan Paula (26/27 stycznia 2008 roku) oraz Emma (1/2 MARCA; PAWLIK 2012). Natomiast, fala upałów, która nawiedziła Europę w 2003 roku, w samych Niemczech spowodowała wzrost umieralności o 9355 osób (WMO 2014).

Tabela 1

Lista największych klęsk żywiołowych w Polsce i Niemczech w okresie 1900–2014, uporządkowanych według malejącej liczby poszkodowanych (źródło: EM-DATA: OFDA/CRED International Disaster Database, www.emdat.be – Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium)

Lp.	Niemcy		
	Klęska żywiołowa	Data	Liczba osób poszkodowanych
1	powódź	11.08.2002	330108
2	powódź	21.12.1993	100000
3	powódź	11.05.1999	100000
4	huragan	21.01.1995	30000
5	powódź	28.05.2013	6350
6	powódź	04.07.1997	5200
7	trzęsienie ziemi	13.04.1992	1525
8	powódź	28.03.2006	1000
9	epidemia	01.02.2002	600
10	powódź	10.07.2005	450

Lp.	Polska		
	Klęska żywiołowa	Data	Liczba osób poszkodowanych
1	powódź	03.07.1997	224500
2	powódź	17.05.2010	100000
3	powódź	Styczeń 82	16824
4	powódź	20.07.2001	15000
5	powódź	Czerwiec 1980	4500
6	powódź	17.03.2005	3600
7	powódź	23.07.1998	1200
8	huragan	01.03.2008	1060
9	powódź	04.08.1977	1000

Podstawy modelowania klimatu

Globalne i regionalne modele klimatyczne

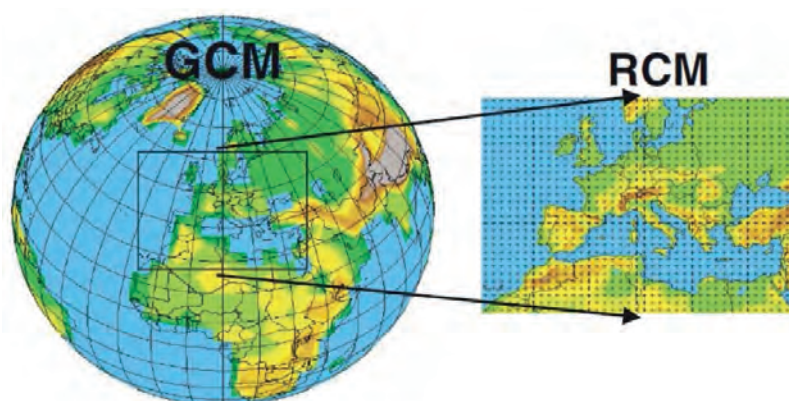
Do dzisiaj, nie wszystkie procesy, które są ważne dla funkcjonowania systemu klimatycznego oraz zależności pomiędzy ziemią, oceanem i atmosferą zostały odkryte i zrozumiane. Nawet najbardziej współczesne modele klimatyczne nie są w stanie całościowo ogarnąć system klimatyczny ze wszystkimi jego komponentami oraz procesami. Mimo tego dostarczają wartościowych informacji, ponieważ pozwalają dogłębnie zrozumieć wspomniane zależności oraz dostarczają istotnych informacji na temat naturalnych i antropogenicznych konsekwencji dla systemu klimatycznego. Bazując na fizyczno-matematycznych równaniach, modele próbują opisać system klimatyczny Ziemi. Poza istotnymi procesami zachodzącymi w atmosferze, oceanach oraz na powierzchni ziemi, uwzględniają także współzależności pomiędzy glebą, biosferą oraz kriosferą. Szczególnie, złożone globalne modele cyrkulacji (Global Circulation Models – GCM) są przykładem wykorzystania parametrów statystycznych do opisanego warunków przeciętnych oraz zmienności pogody (LfULG 2005). Modele klimatyczne mogą także pomagać w podejmowaniu ważnych decyzji o znaczeniu społecznym i politycznym, ukierunkowanych na ochronę klimatu oraz ograniczanie konsekwencji jego zmian.

Do opisanego regionalnego zróżnicowania zmian klimatu stosowane są modele globalne o rozdzielczości od 100 do 300 km, które w kolejnym kroku są uszczegóławiane przy użyciu regionalnych modeli klimatycznych (RCM). Jest to możliwe dzięki zastosowaniu metody skalowania (tzw. downscalingu), w

której wyniki modeli globalnych są reskalowane dla wybranego obszaru. Efektem końcowym jest m.in. informacja o przestrzennym zróżnicowaniu tendencji zmian klimatu (Ryc. 5). W modelowaniu klimatu w skali regionalnej stosuje się rozróżnienie na dwie metody: modele dynamiczne i statystyczne.

Dynamiczne modele klimatyczne

Dynamiczne modele klimatyczne są trójwymiarowymi modelami cyrkulacji, w których wielkoskalowe przepływy powietrza atmosferycznego są symulowane do przewidywania rozwoju warunków klimatycznych. Poza tym, bierze się pod uwagę lokalne cechy podłoża, takie jak udział powierzchni lądowych i morskich oraz użytkowanie terenu. Symulacje są wykonywane w zadanym kroku czasowym dla każdego węzła siatki przestrzennej z rozdzielczością horyzontalną od 2,5 do 50 km. Wśród danych wejściowych modele dynamiczne wymagają informacji brzegowych o cyrkulacji w ujęciu wielkoskalowym. Taka informacja może być pozyskiwana z modeli globalnych, reanaliz lub też symulacji wielkoskalowej cyrkulacji z modeli regionalnych. Wadą takiego szczegółowego podejścia jest to, że modele dynamiczne wymagają dużego obciążenia czasowego oraz obliczeniowego i są ograniczone do konkretnego obszaru (BERNHOFER et al. 2009). W Niemczech dość powszechnie stosowane są modele regionalne REMO z Instytutu Meteorologii Maxa Plancka (JACOB & PODZUN 1997) i COSMO-CLM (Climate Local Model).



Ryc. 5
Uproszczony schemat
procesu skalowania
(GCM – globalne modele
cyrkulacji, RCM – regionalne
modele klimatyczne;
GIORGI 2008)

Modele statystyczne

W odróżnieniu od podejścia dynamicznego modele statystyczne bazują na statystycznych współzależnościach występujących pomiędzy wielkoskalowymi układami atmosferycznymi oraz lokalnymi warunkami pogodowymi. Wyniki nie są prezentowane w węzłach regularnej siatki, ale nieregularnej sieci punktów (np. reprezentujących stacje pomiarowe, miasta itp.). Tak jak w przypadku modeli dynamicznych, wśród danych wejściowych wymagane są także dane brzegowe. W porównaniu z innymi metodami przewaga modeli statystycznych przejawia się większą efektywnością czasową oraz wymaga mniejszych nakładów finansowych. W Niemczech coraz powszechniej są stosowane modele STAR i WETTREG, wywodzące się z dwóch instytucji funkcjonujących w Poczdamie: Institute for Climate Impact Research (ORLOWSKY et al. 2007) oraz Climate & Environment Consulting.

W projekcie KLAPS do uzyskania informacji o klimacie w ujęciu regionalnym zastosowano statystyczny model WETTREG 2013 (patrz rozdział 3).

Scenariusze klimatyczne

Przy konstruowaniu scenariuszy zmian klimatu wymagane jest uwzględnienie różnych założeń oraz uwarunkowań dotyczących zakładanego poziomu rozwoju (dotyczy to m.in. procesów demograficznych, postępu technologicznego oraz ekonomicznego, rozwoju społecznego, działań proekologicznych, tempa konsumpcji bogactw naturalnych). Przyjęte założenia są wpisane w konkretne scenariusze klimatyczne, a określeniem ich ram zajmuje się Międzyrządowy Panel Zmian Klimatu (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate

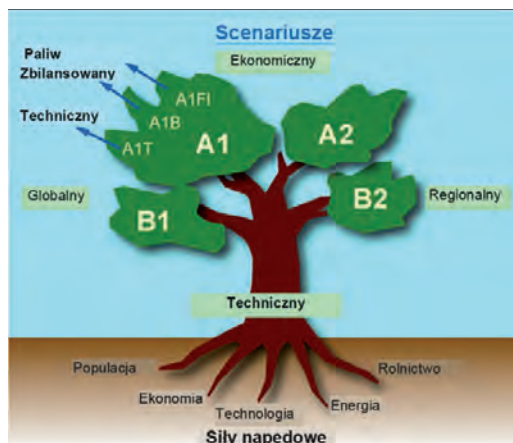
Change; IPCC 2007, 2013). Scenariusze klimatyczne, w przeciwieństwie do prognozy, przedstawiają możliwe warianty rozwoju klimatu. Dany scenariusz klimatyczny może być uwzględniony w modelach globalnych dopiero po przeprowadzeniu wielu obliczeń uwzględniających różne założenia co do zakładanego stężenia gazów szklarniowych.

W piątym raporcie IPCC (AR5) wyróżniono dwie rodziny scenariuszy. Pierwsza z nich tzw. scenariusze SRES (Special Report on Emission Scenarios, NAKICENOVIC & SWART 2000) bazuje na raportach IPCC z 2001 i 2007 roku. W scenariuszach SRES uwzględniono i oszacowano emisję gazów cieplarnianych, która jest wykorzystywana, jako główny czynnik wpływający na wynik modeli globalnych. Wszystkie scenariusze emisyjne (łącznie jest ich 40) są podzielone na cztery główne rodziny A1, A2, B1 i B2 (Ryc. 6).

W raporcie AR5 IPCC przyjęto nową filozofię podejścia do scenariuszy klimatycznych. Należy je rozumieć, jako ścieżki reprezentatywnych koncentracji (RCP – representative concentration pathway scenarios) odnoszące się do siły wymuszenia radiacyjnego. Są one podzielone na RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 i RCP8.5. Liczby odnoszą się do krotności wymuszenia radiacyjnego porównując rok 2100 z okresem przedindustrialnym – tj. połowa XIX wieku (Ryc. 7). W modelach klimatycznych wprowadzana jest emisja na takim poziomie, aby uzyskać określony poziom wymuszenia radiacyjnego. W następnym kroku możliwe jest oszacowanie współczesnej koncentracji gazów cieplarnianych. Zaletą scenariuszy RCP jest ich większa skuteczność, jako parametrów wejściowych do globalnych modeli klimatycznych. Są one także lepsze do szacowania

Ryc. 6

Schemat ilustrujący 4 scenariusze wg raportu IPCC (Special Report on Emission Scenarios; rycina zmodyfikowana, za NAKICENOVIC & SWART 2000)



Założenia dotyczące koncentracji gazów szklarniowych w przyszłości

Poziom koncentracji gazów szklarniowych ma istotny wpływ na wypracowywane scenariusze klimatyczne. Dla przykładu osiągnięcie celu w postaci „2-degree target” jest gwarantowane z 50% prawdopodobieństwem, tylko przy ograniczeniu koncentracji CO₂ do poziomu 450 ppm (RAHMSTORF & SCHELLNHUBER 2006). IPCC zakłada wzrost koncentracji CO₂, która do końca XXI wieku może być 3-krotnie większa niż obecnie (średnio-roczna koncentracja CO₂ w roku 2012 = 393,1 ppm, WMO 2013). Wraz z coraz bardziej odległym horyzontem czasowym, niepewność w zakładanym scenariuszu emisyjnym oraz koncentracji CO₂ ciągle wzrasta (HAWKINS & SUTTON 2009).

współczesnych tendencji w odniesieniu do emisji gazów szklarniowych (KREIENKAMP i in. 2013).

Niepewność

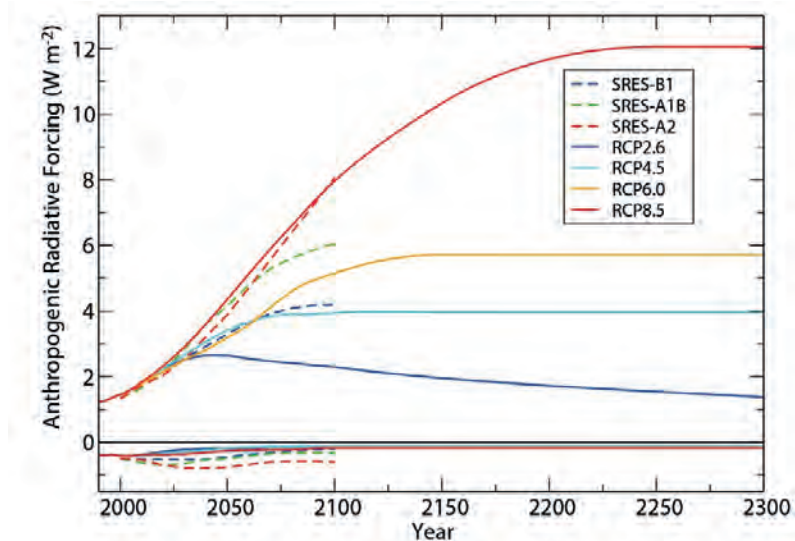
W związku z dużą złożonością systemu klimatycznego, dokładność oszacowania tempa zakładanego rozwoju oraz naturalnej zmienności klimatu, przekłada się na większą niepewność scenariusza klimatycznego. Poniżej zostało to wyjaśnione bardziej szczegółowo.

Złożoność systemu ziemskiego oraz ograniczenia w modelowaniu klimatu

Nie wszystkie procesy mające znaczenie dla klimatu oraz interakcje w systemie ziemskim zostały do dzisiaj rozpoznane i rozumiane. Wynika to po części z nieprecyzyjnych danych wejściowych, a po drugie braku pomiarów przeprowadzonych w różnych warstwach atmosfery. Sprzężenia zwrotne w procesach zachodzących w chmurach pozostają największym źródłem niepewności w modelach klimatycznych. Ponadto, w odniesieniu do ograniczonych możliwości przeliczeniowych, czasami nie jest możliwe rozpoznanie i matematyczne opisanie procesów, które należałoby uwzględnić w modelowaniu klimatu. To, czy realne środowisko jest dobrze reprezentowane w modelu, czy nie, jest

Ryc. 7

Wymuszenie radiacyjne w scenariuszach SRES i RCP do 2100 roku w odniesieniu do poziomu przedindustrialnego (MEINSHAUSEN i in., 2011a). (IPCC 2013, Fig. 12.3)





także zależne od rozdzielczości modelu, a z tym wiąże się ściśle problem mocy obliczeniowych.

Naturalne przyczyny zmienności klimatu

Kolejne trudności w skutecznym prognozowaniu zmian klimatu wynikają ze stosunkowo słabego poziomu rozpoznania naturalnych przyczyn zmienności klimatu (np. zmian w aktywności słonecznej), które są dodawane do czynników antropogenicznych. Aby rozpoznać i uzyskać informacje o naturalnych przyczynach zmienności klimatu pomocne są wyniki systematycznie prowadzonych obserwacji. Jednak, ze względu na wciąż bardzo krótkie serie danych historycznych, którymi dysponujemy, nasza wiedza jest wciąż ograniczona. Na przykład klęski żywiołowe, takie jak serie erupcji wulkanicznych, mają poważne konsekwencje w zmianach klimatycznych.

Aby minimalizować tę niepewność, uwzględnia się prawdopodobieństwo wystąpienia przyszłych zmian klimatu, co pozwala lepiej ocenić zakres ich zmienności. Dlatego też, stosowanie takiej metody umożliwia obliczanie zakresu zmienności prawdopodobnych warunków klimatycznych.

Baza danych i metody badawcze

Regionalny model klimatyczny WETTREG

Warunki pogodowe są generowane w skali regionalnej na podstawie modelu WETTREG, wywodzącego się z modelu WEREX (Weather Situations-Regionalization-Extremes), który został udoskonalony dla Saksonii. WETTREG jest rozwijany i operacyjne stosowany przez *Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH*¹. Ten statystyczny model został później zaadoptowany dla całego obszaru Niemiec. Od lat 2002/2003 WETTREG jest stosowany do analizowania zmian klimatu w skali regionalnej. Został on także rozszerzony i z czasem ulepszony poprzez uwzględnienie modeli WR06, WR10 i WR13_v02 (SPEKAT i in. 2007, KREIENKAMP i in. 2010, 2013). Ze względu na wymagania projektu KLAPS użyto wersji WR13_v02 (Tabela 2).

Regionalizacja jest wykonana w trzech etapach.

Warunki cyrkulacyjne

Punktem wyjścia jest założenie, że wzorce cyrkulacji są łącznikiem pomiędzy skalą wielkoobszarową i regionalną. W przypadku WETTREG określa się przedziały wartości określonego regionalnego parametru meteorologicznego. Analizuje się, jakie warunki pogodowe przynależą do poszczególnych

Model regionalny	WETTREG 2013 (WR13_v02)
operator	Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
typ	model statystyczny
globalny program	ECHAM5 MPI-OM, MPI ESM-LR
rozdzielczość przestrzenna	26 stacji klimatycznych
rozdzielczość czasowa	wielkości dobowe
okres kontrolny	1951–2000
czas projekcji	2001–2100
symulacje	5 (scenariuszy) x 10 (realizacji) x 26 (stacji klimatycznych) = 1300 symulacji

Tabela 2
Charakterystyka regionalnego modelu klimatycznego WETTREG

przedziałów wartości. W dalszej kolejności tworzy się przykładowo 12 różnych klas termicznych – od „zimnych” do „ciepłych” oraz 8 różnych klas wilgotności – od „suchych” do „obfitujących w opady”. Do zdefiniowania warunków pogodowych, charakterystycznych dla poszczególnych klas, korzysta się ze współczesnych danych klimatycznych. W następnym kroku ma miejsce przejście od danych klimatycznych do wyników z modeli klimatu. Są one dostępne w postaci dobowych „map pogodowych”. Następnie przeprowadza się obiektywne poszukiwanie podobieństw, aby w możliwie najlepszy sposób przyporządkować zasymulowane warunki atmosferyczne w określonym dniu w przyszłości do określonej klasy WETTREG.

Generator pogody

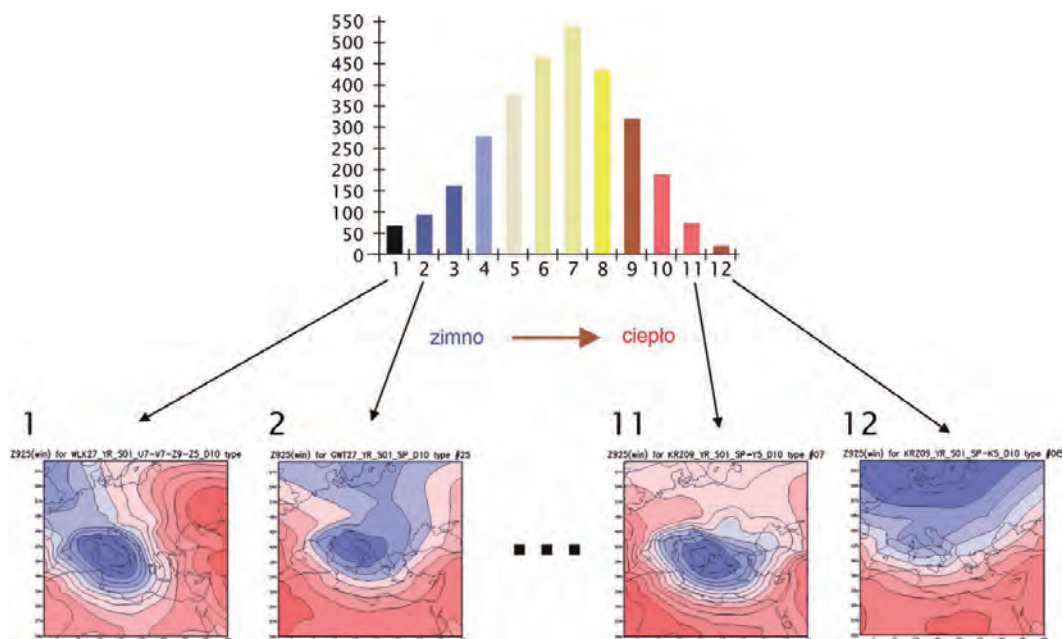
W następnym kroku stosując statystyczny generator pogody, lokalne współczesne serie czasowe niektórych parametrów meteorologicznych są składane do nowych serii czasowych. Do decyzji, czy dany segment ma zostać przyjęty, czy odrzucony, użyto częstości sytuacji cyrkulacyjnych. Na podstawie jednej projekcji klimatycznej i jednego scenariusza zmian stężenia gazów cieplarnianych, generowane są różne zmiany bieżącego klimatu przy użyciu statystycznego generatora pogody.

Oparta na regresji implementacja dalszych zmiennych z globalnego modelu klimatycznego

Zmieniająca się częstość określonych sytuacji cyrkulacyjnych wyznacza jedynie część przyszłych zmian klimatu. Zmiany parametrów fizycznych są obliczane wprost z symulacji modelu bazując na regresji statystycznej. Następnie czynniki korekcyjne mogą zostać wyciągnięte i wprowadzone jako dodatkowy element do zsynchronizowanej serii czasowej.

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

Ryc. 8
Zasada klasyfikacji
warunków cyrkulacyjnych



Dla lepszego oszacowania zmienności modelu, uznano za praktyczne wykonanie 10 realizacji WETTREG. Każda z 10 realizacji jest jednakowo prawdopodobna i może być analizowana z osobna. Dla uproszczenia, brana pod uwagę jest często średnia z dziesięciu realizacji, rozumiana, jako średnia arytmetyczna serii czasowych. Analizy dobowe wymagają osobnych obliczeń każdej z realizacji przed uśrednieniem wszystkich wyników. W analizach miesięcy, pół roku i rocznych, średnia arytmetyczna może być wyznaczona wprost.

Odmienne niż dynamiczne modele klimatyczne, model statystyczny WETTREG ma tą zaletę, że wymaga znacznie mniej czasu obliczeniowego. Co więcej, projekcje klimatyczne są generowane dla większego obszaru. Dodatkowo dane obserwacyjne są lepiej odtworzone przez spójny statystyczny opis obecnego i przyszłego klimatu. Dzięki wysokiej zgodności wyników symulacji kontrolnych z danymi obserwacyjnymi uważa się, że WETTREG jest przydatny do modelowania przyszłych warunków klimatycznych.

Wybrane scenariusze klimatyczne

W projekcie KLAPS uwzględniono scenariusz emisyjny A1B z rodziny A1. Zakłada on bardzo gwałtowny rozwój ekonomiczny, ciągły wzrost populacji do połowy XXI wieku i jej powolny spadek w drugiej połowie wieku, gwałtowny rozwój nowych techno-

logii przy zrównoważonym wykorzystaniu wszystkich źródeł energii. Jest to aktualnie najczęściej stosowany scenariusz klimatyczny. Dlatego uzyskane rezultaty mogą być porównywane z innymi pracami z zakresu zmian klimatu.

Wraz z opisaną rodziną scenariuszy SRES do opracowania włączono także dwa scenariusze – RCP2.6 oraz RCP8.5 (IPCC 2013). Zrobiono tak, aby nawiązać do aktualnie stosowanego podejścia, którego celem jest pokazanie przedziału rozbieżności przyszłych zmian. Podczas gdy scenariusz RCP8.5 zakłada trzy razy większy poziom konsumpcji energii niż współcześnie (równowartość 1370 ppm CO₂), to RCP2.6 (równowartość 490 ppm CO₂) określa warunki dotrzymania ograniczenia globalnego ocieplenia do końca XXI wieku poniżej 2 stopni, w odniesieniu do poziomu sprzed epoki przemysłowej (RANDALL 2010).

Podejście zespołowe

Modelując warunki klimatyczne na przyszłość, ze względu na stopień niepewności, w ostatnich latach coraz częściej stosowane jest podejście zespołowe. Integrując rezultaty kilku modeli, gwarantowana jest wyższa jakość oraz wiarygodność obliczeń, a poza tym możliwe jest bardziej prawdopodobne rozpoznanie całego, możliwego przedziału zmienności warunków klimatycznych (van der LINDEN & MITCHELL 2009). W projekcie KLAPS został



zastosowany tzw. „multi-model, multi-scenario-ensemble”. W podejściu tym uwzględnia się projekcje z dwóch modeli globalnych ECHAM5 MPI-OM i MPI-ESM-LR. Należy jednak podkreślić, że oba modele reprezentują różne generacje modeli. Pierwsze obliczenia modelu globalnego zostały przeprowadzone dla scenariuszy A1B i RCP2.6. Dla oszacowania wewnętrznej zmienności modelu przeprowadzono całą serię symulacji RCP8.5, których punkt startowy przypadają na różne okresy, począwszy od okresu przedindustrialnego (Ryc. 9).

Na koniec, należy stwierdzić, że do analizy została wybrana tylko niewielka próbka modeli i scenariuszy. Stąd, jest bardzo prawdopodobne, że całkowity zakres zmian w projekcjach klimatycznych nie jest opisany w sposób kompletny (PARKER 2011).

Przedział ufności

Aby stwierdzić, czy zachowanie się zmian określonej symulowanej zmiennej meteorologicznej przedstawia sygnał, czy też odpowiada naturalnej zmienności klimatu w teraźniejszości, należy określić przedziały ufności wartości średniej (TAUBENHEIM 1969, KREIENKAMP & SPEKAT 2013). Za pomocą odchylenia standardowego zmiennych w okresie referencyjnym 1971–2000, określa się przedziały ufności wartości średniej. Przedział ufności podany za pomocą zakresu prawdopodobieństwa błędu (w tym przypadku 10 %), który jeśli zostanie przekroczony przez czasową ewolucję określonej prognozowanej zmiennej klimatycznej, jest uznawany za wyraźny sygnał. Przedział ufności jest obliczony przy użyciu odchylenia standardowego dla wielolecia (1971–2000). Oczekiwana wielkość oblicza się za pomocą następującej formuły:

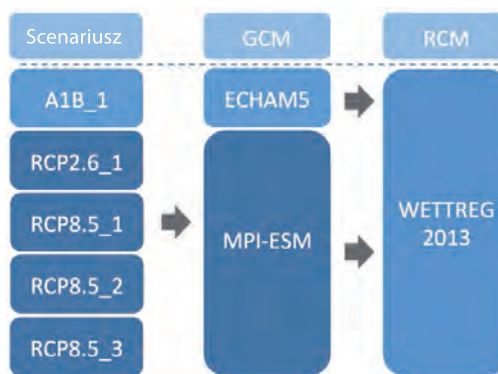
$$\mu = \bar{x} \pm t_{\beta}(n) * \frac{sd}{\sqrt{N}}$$

N : Liczba wartości, n : stopień swobody, β : prawdopodobieństwo błędu, $t_{\beta}(n)$: próg istotności t (test t -Studenta) zależny od stopnia swobody oraz prawdopodobieństwa błędu. Dla $n = 30$ i $\beta = 0.01$ (1 % prawdopodobieństwo błędu) $t = 2.750$.

Obliczone przedziały ufności dla określonych parametrów klimatycznych umożliwiają rozróżnienie pomiędzy sygnałem związanym ze zmianami klimatycznymi, a sygnałem wynikającym z naturalnej zmienności. W rozdziale 4 przedział ufności jest zaprezentowany linią przerywaną.

Analiza projekcji klimatu w skali regionalnej

W przypadku projektu KLAPS przygotowano pięć różnych scenariuszy klimatycznych dla 26 stanowisk (stacji meteorologicznych) na terenie Niemiec,



Ryc. 9
Klasyfikacja wybranych scenariuszy i modeli klimatycznych

Polski i Czech z wykorzystaniem regionalnego modelu klimatycznego WETTREG 2013 (KREIENKAMP et al. 2013). Dla kolejnych stacji, w okresie 1951–2100, wygenerowano po 10 realizacji dla każdego scenariusza klimatycznego dla uwypuklenia wewnętrznej zmienności modelu. Wszystkie uzyskane projekcje (1300) umożliwiają przeprowadzenie szczegółowej analizy klimatologicznej dla obszaru pogranicza Polski i Saksonii. W poniższych rozważaniach szczególną uwagę zwrócono na zagadnienia termiczne oraz bioklimatyczne dla okresu 1971–2100.

W pierwszym kroku symulowane dane klimatyczne zostały porównane z obserwacjami w okresie kontrolnym 1971–2000, dla oszacowania wiarygodności wskazań modelu WETTREG. Ponadto, projekcje klimatyczne zostały obliczone w dwóch przedziałach: nieodległa przyszłość 2021–2050 oraz dalsza przyszłość 2071–2100.

W celu uniknięcia systematycznego błędu w projekcjach klimatycznych, który mógłby wypaczyć rezultat, zmieniający się sygnał zestawiono z okresem referencyjnym 1971–2000. Zmiana sygnału jest definiowana, jako różnica pomiędzy konkretnymi przedziałami czasu lub średnimi rocznymi oraz odpowiednimi wielkościami w wieloleciu 1971–2000. Dodatkowo, scenariusz bazujący na zmienności modelu w odniesieniu do średniej został zilustrowany w postaci szarego cieniowania, na rycinach zamieszczonych w rozdziale „Wyniki”.

W projekcie KLAPS każdy z pięciu scenariuszy klimatycznych jest analizowany osobno. Dla uproszczenia wyniki dla scenariusza RCP8.5 zaprezentowano tylko jako średnią (dla trzech przebiegów). Dodatkowo w analizie umieszczono wykresy pudełkowe dla pokazania rozpiętości prognozowanych zmian pomiędzy kolejnymi scenariuszami.

Wyniki

Walidacja modelu

Walidacja modelu została wykonana na podstawie porównania danych obserwacyjnych oraz danych z symulacji. Zostały obliczone różnice między symulacjami z modelu a obserwacjami z 30-lecia 1971–2000.

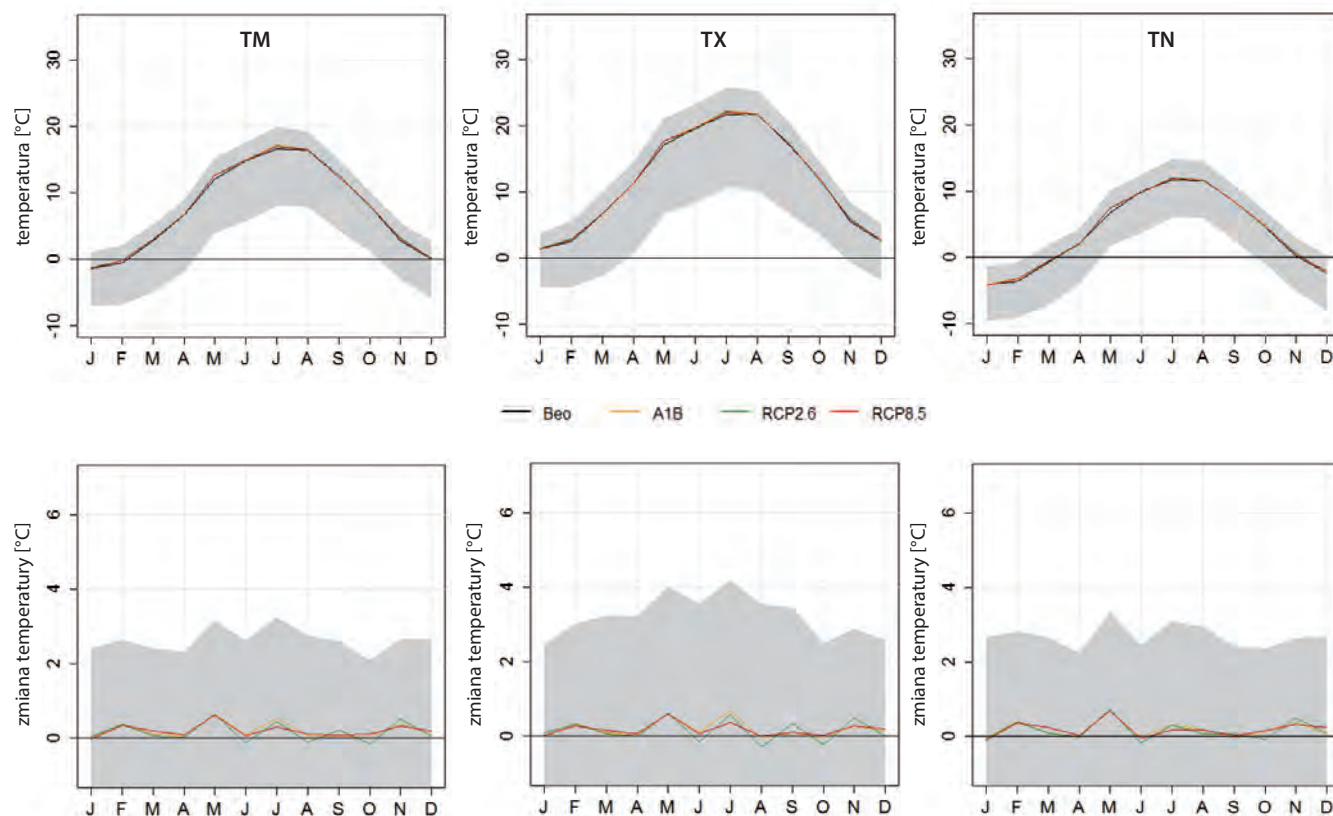
Typowy przebieg roczny temperatury powietrza w obszarze badań projektu został przedstawiony dla wszystkich scenariuszy klimatycznych (Ryc. 10, góra). Zasadniczo, przebieg roczny temperatury powietrza na podstawie symulacji jest zgodny z pomiarami, średni roczny błąd dla obszaru badań wynosi $+0,2^{\circ}\text{C}$ (Ryc. 10, dół). W ciągu roku niewielkie przeszacowania (w lutym, maju i listopadzie) wynoszą do $+0,7^{\circ}\text{C}$ (w przypadku temperatury minimalnej w maju), są one podobne dla wszystkich analizowanych scenariuszy klimatycznych. Obszar zaznaczony na szaro przedstawia scenariusz zmian określony na podstawie wszystkich 1300 realizacji wygenerowanych przy pomocy modeli klimatu dla całego obszaru badań.

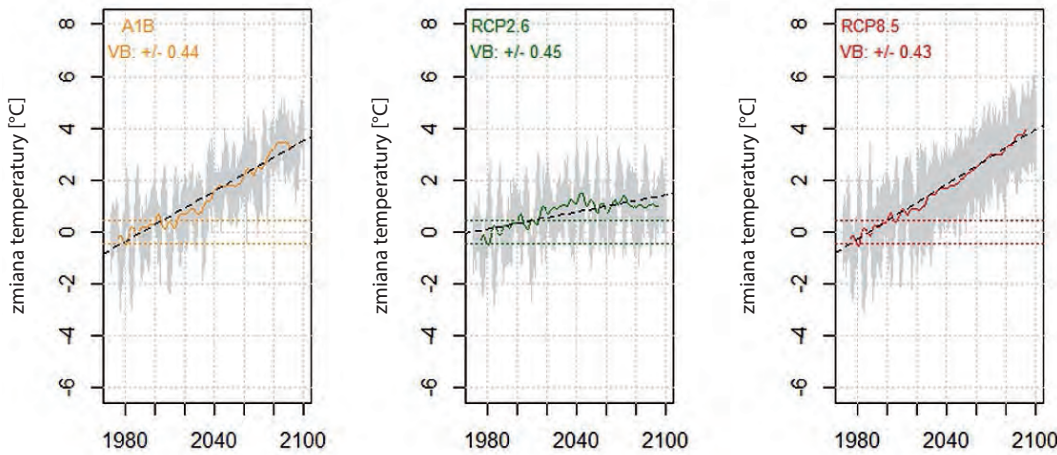
Otrzymane wyniki symulacji są oceniane za pomocą wyznaczonego przedziału ufności (rozdział 3.4). Zgodnie z tym kryterium odchylenie temperatury powietrza pomiędzy $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ (TM, TX) oraz $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ (TN) jest klasyfikowane jako naturalna zmienność (biały szum). Na tej podstawie można stwierdzić, że symulacje pokazują bardzo dobrą i dobrą zgodność z pomiarami temperatury powietrza w okresie 1971–2000, dla wszystkich scenariuszy (KREIENKAMP et al. 2013).

Temperatura powietrza

Obecnie średnia roczna temperatura powietrza w obszarze badań projektu wynosi około $7,5^{\circ}\text{C}$ (1971–2000). W XXI wieku wszystkie analizowane scenariusze zmian klimatu wskazują znaczący trend rosnący temperatury powietrza w regionie granicznym Polski-Saksonii (Ryc. 11). Jednak trend zmian temperatury powietrza w przyszłości jest różny, w zależności od rozpatrywanego scenariusza i modelu globalnego. Dlatego też, w obszarze badań projektu wzrost rocznej temperatury powietrza, określony na podstawie projekcji klimatycznych, może się zmieniać w zakresie od $+1$ (RCP2.6) do

Ryc. 10
Roczny przebieg temperatury powietrza [$^{\circ}\text{C}$] w okresie 1971–2000 (góra) oraz zmiana względem obserwacji 1971–2000 (dół) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 oraz pomiarów (Beo) w obszarze badań projektu; oznaczenia: TM – średnia, TX – maksymalna, TN – minimalna temperatura powietrza





Ryc. 11
Zmiana średniej rocznej temperatury powietrza [°C] 1971–2100 względem okresu 1971–2000 dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 w regionie badań projektu (linia przerywana/kropki – przedział ufności, linia przerywana – trend liniowy, linia ciągła – 11-letnia średnia kolejowa, szary obszar – zakres zmian dla wszystkich realizacji)

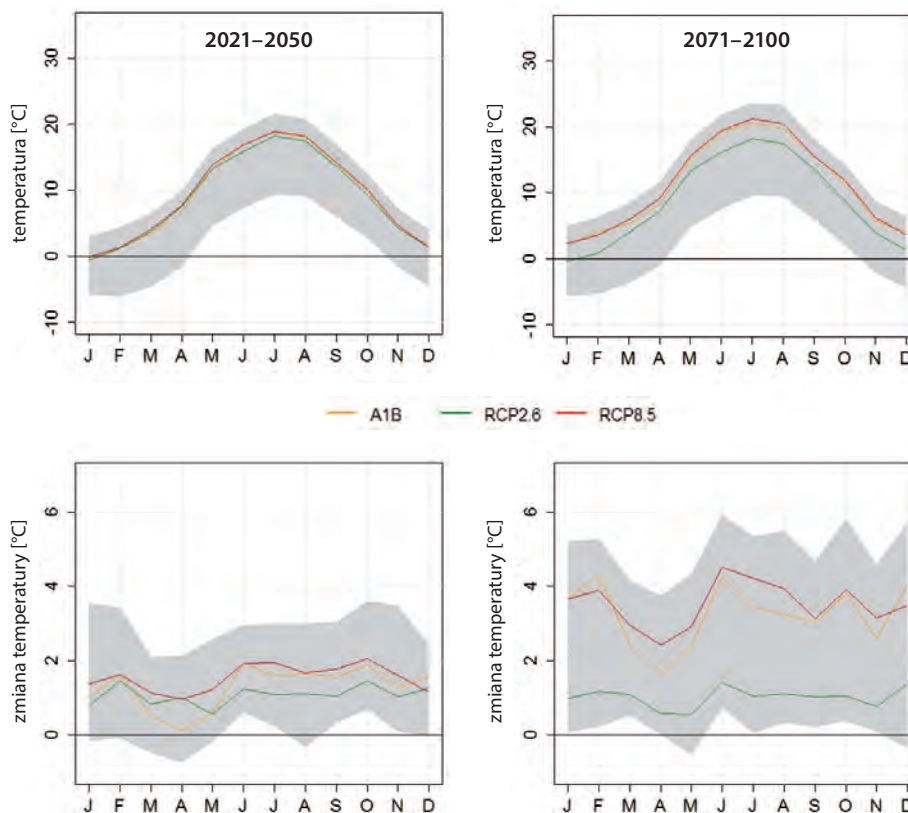
+4 °C (RCP8.5), w końcu XXI wieku. Stąd roczna temperatura powietrza może wynosić między 8,5 a 11,5 °C. Pomimo, że sygnał zmian pokazuje podobny poziom do połowy XXI wieku, to zakres zmian w obrębie scenariuszy jest dużo większy w horyzoncie czasowym do końca XXI wieku. Dla scenariusza „dwóch stopni” RCP2.6 stagnacja trendu rosnącego na poziomie +1 °C zaznacza się od połowy XXI wieku. Projekcje zmian temperatury powietrza dla scenariuszy A1B i RCP8.5 są dużo bardziej zróżnicowane.

Dekadowe wahania parametrów klimatu są przedstawione za pomocą średniej kolejowej 11-letniej (Ryc. 11). Naturalną zmienność temperatury powietrza można odróżnić od trwałego sygnału za pomocą obliczonego przedziału ufności. Od roku 2020 trend temperatury powietrza prze-

kracza ten przedział, co oznacza, że ocieplenie można określić jako trwały sygnał. Szary obszar w tle przedstawia średnie roczne wartości temperatury powietrza, ze wszystkich analizowanych symulacji. Wahania temperatury powietrza z roku na rok są dobrze zilustrowane, natomiast amplitudy z całego zbioru projekcji pokazują małe zmiany.

Rycina 12 przedstawia przebieg roczny średniej temperatury powietrza w okresach 2021–2050 i 2071–2100 oraz sygnał zmian w porównaniu do okresu 1971–2000. Szary obszar ilustruje zakres zmian między wszystkimi realizacjami. Odnosnie wartości średnich, wzrost temperatur miesięcznych powietrza w okresie 2021–2050 względem okresu 1971–2000 będzie wynosił od około +0,1 °C do +1,9 °C. Pomimo, że symulacje pokazują podobne zmiany w połowie XXI wieku, to zakres wartości

Ryc. 12
Przebieg roczny temperatury powietrza [°C] w okresie 2021–2050 (po lewej) i 2071–2100 (po prawej) oraz zmiana względem obserwacji z okresu 1971–2000 (dół) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 w obszarze badań projektu

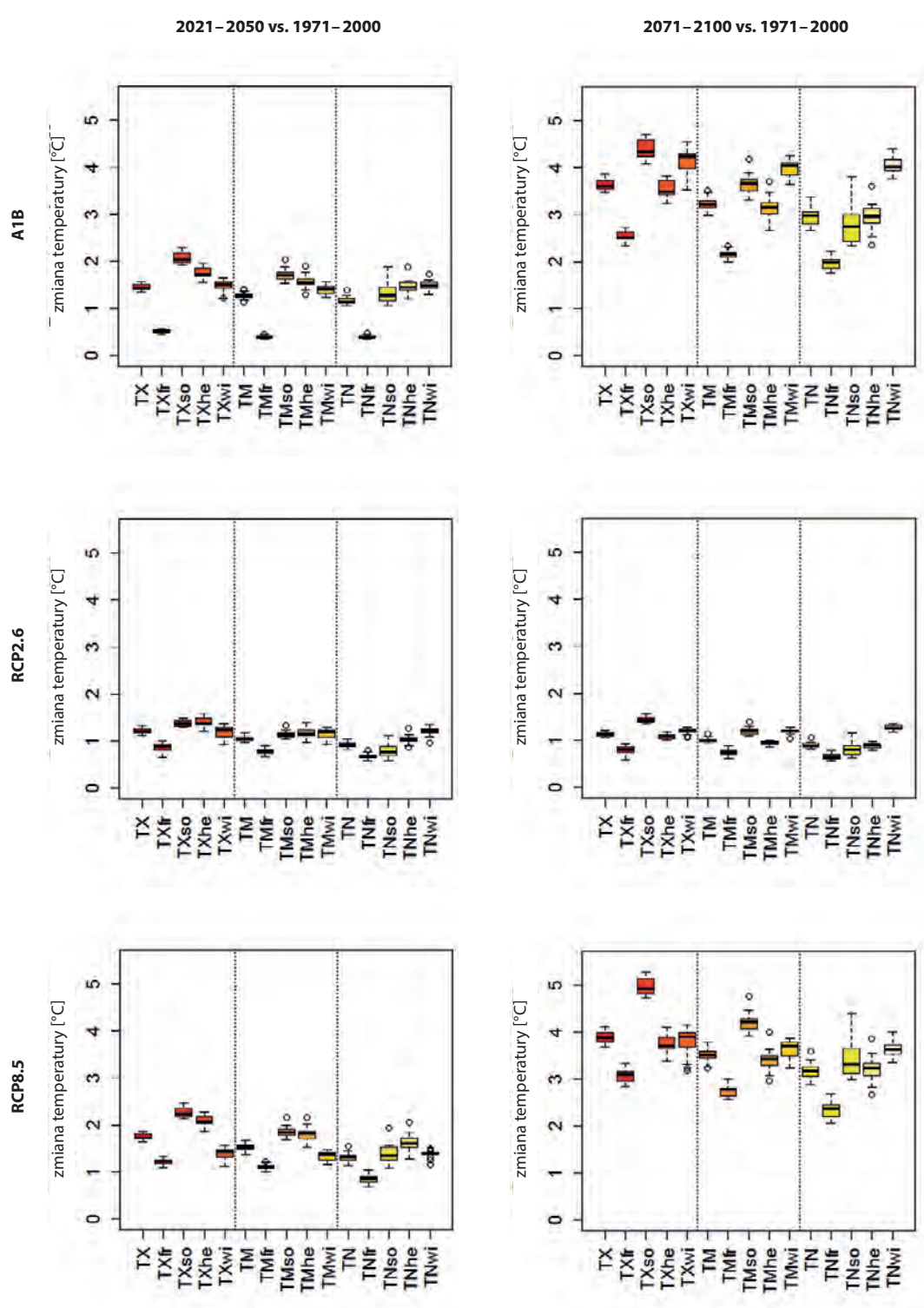


poniędzy scenariuszami klimatycznymi wzrasta w horyzoncie czasowym na koniec XXI wieku. Największe różnice występują między scenariuszem „optymistycznym” RCP2.6, a scenariuszami A1B i RCP8.5. W okresie 2071–2100 spodziewany jest wzrost miesięcznych wartości temperatury powietrza w zakresie pomiędzy +0,6 a +4,5 °C. Wiosną przewidywane jest umiarkowane ocieplenie dla obu rozpatrywanych horyzontów czasowych, w porównaniu do obserwowanego obecnie silnego wzrostu temperatury powietrza w tym sezonie.

Wykresy pudełkowe mogą być stosowane do przedstawienia wielkości i rozkładu zmian temperatury rocznej i sezonowej (Ryc. 13). Pod koniec XXI wieku przewidywany jest znacząco większy wzrost temperatury powietrza niż w połowie wieku. Najsilniejszy wzrost jest przewidywany w przypadku temperatury maksymalnej w sezonie letnim, będzie to miało istotny wpływ na występowanie dni gorących i upalnych. Natomiast największy wzrost minimalnej temperatury powietrza jest przewidywany zimą, co będzie miało wpływ na występowanie dni mroźnych. Niewielki trend ocieplenia (< +1 °C) jest symulowany dla wiosny, dla obu rozpatrywanych

horyzontów czasowych i wszystkich scenariuszy klimatycznych. Większy wzrost temperatury powietrza pod koniec XXI wieku w porównaniu do okresu 2021–2050 jest przewidywany zwłaszcza zimą. Natomiast największy zakres zmian może wystąpić w przypadku temperatury minimalnej latem. Jest to spowodowane czynnikami lokalnymi, takim jak rzeźba i pokrycie terenu, które wpływają na zróżnicowanie temperatury powietrza w skali mikro.

Regionalną zmienność warunków termicznych w obszarze pogranicza polsko-saksońskiego analizowano w zależności od wysokości bezwzględnej. Obszary górskie w południowej części obszaru badań będą wykazywały nieco silniejsze ocieplenie w porównaniu do niżej położonych regionów (Tabela 3). Największy sygnał zmian jest spodziewany w przypadku temperatury maksymalnej latem, w wyżej położonych regionach, gdzie wzrost w końcu XXI wieku będzie wynosił od ok. +1,5 do +5,2 °C. Zimą prawdopodobny wzrost temperatury powietrza będzie wynosił pomiędzy +1,2 a +4,0 °C ale w przewadze będzie występował w niżej położonych obszarach. Natomiast jesienią przewidywane ocieplenie będzie wynosiło między +0,9 a +3,8 °C,



Ryc. 13
 Rozkład rocznych i sezonowych zmian temperatury powietrza [°C] w okresach 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu 1971–2000 w obszarze badań projektu (gruba czarna linia – mediana, prostokąt – 50% danych, poziome linie poniżej i powyżej prostokąta – minimum/maksimum z serii czasowej, kropki – wartości odstające)

Tabela 3
Scenariusz zakresu zmian rocznej i sezonowej temperatury powietrza w okresie 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu 1971–2000 dla różnych przedziałów wysokościowych

	Przedział wysokościowy [m n.p.m.]	Wiosna	Lato	Jesień	Zima	Rok
2021–2050	Maksymalna temperatura powietrza					
	Niziny [<150]	0,5–1,2	1,3–2,2	1,4–2,0	1,3–1,5	1,2–1,7
	Równiny faliste [150–350]	0,5–1,2	1,3–2,2	1,4–2,1	1,3–1,4	1,2–1,8
	Pogórza [350–650]	0,5–1,3	1,4–2,4	1,4–2,1	1,2–1,3	1,2–1,8
	Góry [>=650]	0,5–1,2	1,4–2,3	1,5–2,1	1,0–1,2	1,2–1,7
	Średnia temperatura powietrza					
	Niziny [<150]	0,4–1,1	1,1–1,8	1,1–1,8	1,2–1,4	1,0–1,5
	Równiny faliste [150–350]	0,4–1,1	1,1–1,8	1,1–1,8	1,2–1,4	1,1–1,5
	Pogórza [350–650]	0,4–1,1	1,2–1,9	1,2–1,8	1,2–1,3	1,1–1,6
	Góry [>=650]	0,4–1,1	1,2–2,0	1,2–1,9	1,0–1,2	1,1–1,6
	Minimalna temperatura powietrza					
	Niziny [<150]	0,4–0,8	0,7–1,3	1,0–1,5	1,2–1,4	0,9–1,3
	Równiny faliste [150–350]	0,4–0,8	0,8–1,4	1,0–1,6	1,2–1,4	0,9–1,3
	Pogórza [350–650]	0,4–0,9	0,8–1,3	1,0–1,7	1,3–1,4	1,0–1,3
	Góry [>=650]	0,4–0,9	0,9–1,6	1,1–1,8	1,1–1,3	1,0–1,4
	2071–2100	Maksymalna temperatura powietrza				
Niziny [<150]		0,7–3,0	1,4–4,8	1,1–3,7	1,2–4,0	1,1–3,9
Równiny faliste [150–350]		0,8–3,1	1,4–4,9	1,1–3,7	1,2–3,9	1,1–3,9
Pogórza [350–650]		0,8–3,2	1,5–5,2	1,1–3,8	1,2–3,8	1,2–4,0
Góry [>=650]		0,9–3,1	1,5–5,1	1,1–3,8	1,2–3,4	1,1–3,9
Średnia temperatura powietrza						
Niziny [<150]		0,7–2,7	1,1–4,1	1,0–3,3	1,2–3,8	1,0–3,5
Równiny faliste [150–350]		0,7–2,7	1,2–4,2	0,9–3,3	1,2–3,6	1,0–3,5
Pogórza [350–650]		0,8–2,8	1,2–4,3	1,0–3,4	1,2–3,6	1,0–3,5
Góry [>=650]		0,8–2,8	1,3–4,4	1,0–3,6	1,2–3,5	1,1–3,6
Minimalna temperatura powietrza						
Niziny [<150]		0,6–2,3	0,8–3,2	0,9–3,0	1,2–3,6	0,9–3,0
Równiny faliste [150–350]		0,6–2,3	0,8–3,3	0,9–3,2	1,3–3,7	0,9–3,1
Pogórza [350–650]		0,7–2,4	0,8–3,3	0,9–3,2	1,3–3,8	0,9–3,2
Góry [>=650]		0,8–2,5	1,0–3,9	0,9–3,5	1,3–3,5	1,0–3,4



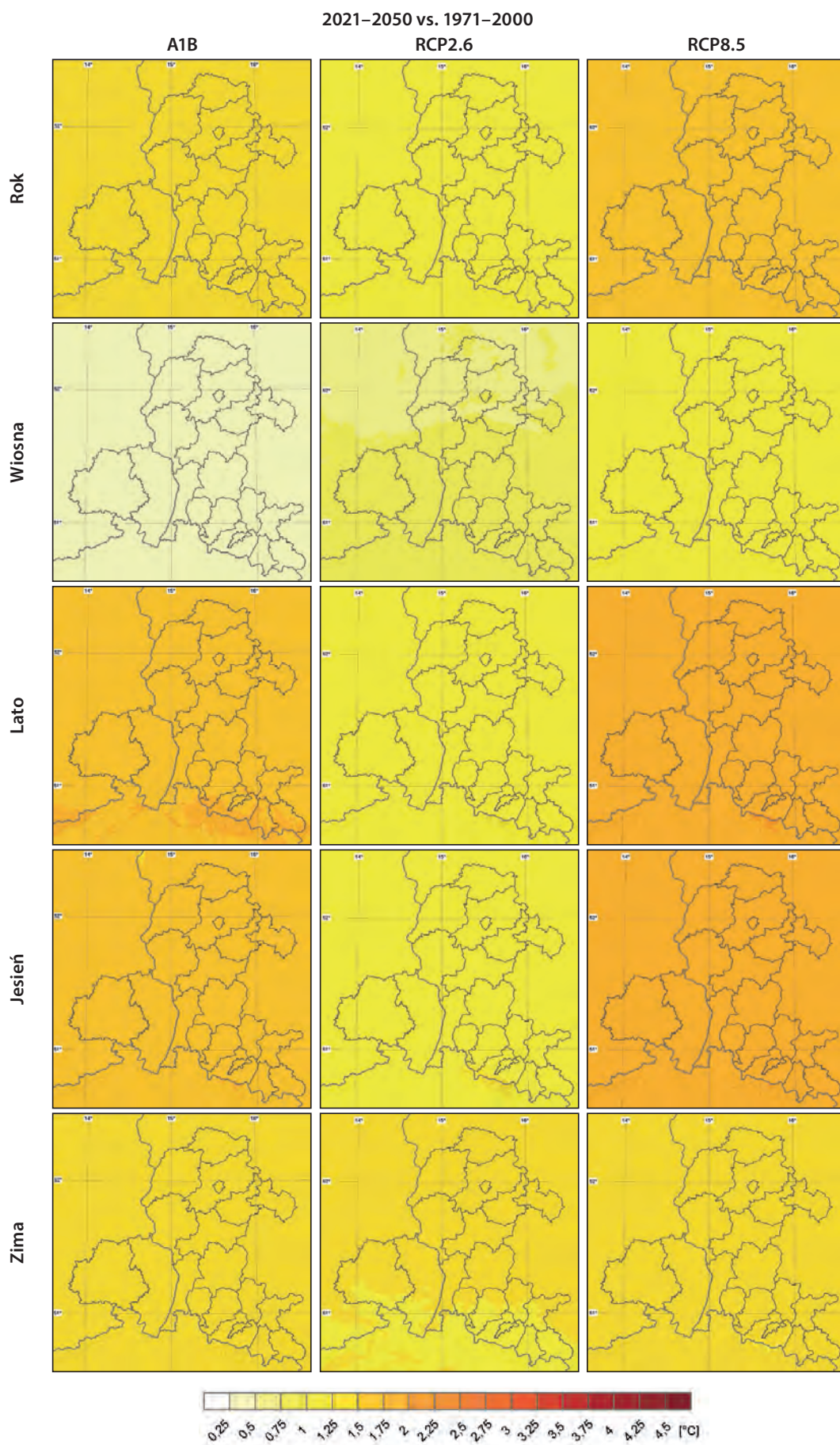
podczas gdy mniejszy wzrost temperatury powietrza będzie wiosną, wyniesie on około +0,6 do +3,2 °C w okresie 2071–2100 w porównaniu do 1971–2000.

Zmienność przestrzenna

Na rycinie 14 przedstawiono rozkład przestrzenny symulowanego sygnału zmian temperatury rocznej i sezonowej dla okresów 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000. Opis zastosowanej metody interpolacji znajduje się w pracy SZYMANOWSKIEGO & KRYZY (2012) oraz raporcie „Zmiany klimatu w regionie granicznym Polski i Saksonii” (MEHLER i in. 2014). Do połowy XXI wieku przewidywane jest niewielkie przestrzenne zróżnicowanie zmian temperatury powietrza. Natomiast w końcu wieku, większe ocieplenie jest przewidywane w obszarach górskich niż na nizinach. W przypadku scenariuszy A1B i RCP8.5, w sezonie zimowym rozkład przestrzenny ocieplenia jest odwrotny tj. przewidywane ocieplenie będzie większe w regionach nizinnych.



Ryc. 14
 Zmiana średniej rocznej i sezonowej temperatury powietrza [°C] w wieloletniu 2021–2050 oraz 2071–2100 w porównaniu do okresu 1971–2000 dla scenariuszy A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5 (przebieg 1,2,3) w obszarze badań projektu



2071–2100 vs. 1971–2000

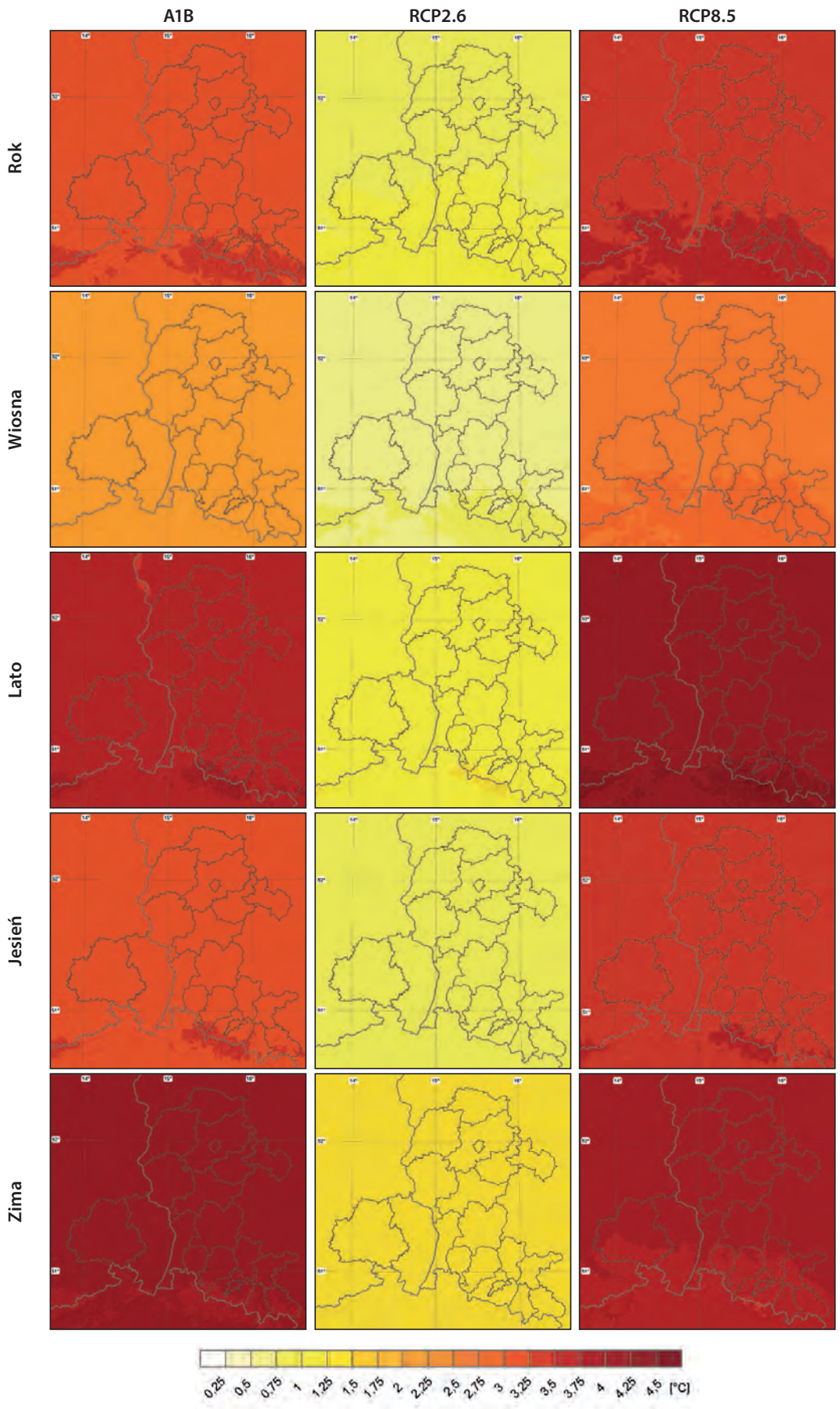


Tabela 4
Średnia liczba dni charakterystycznych pod względem termicznym w wieloletniu 1971–2000 (dane z modelu)

	Przedział wysokościowy	Dni gorące (TX > 25°C) [dni]			Dni upalne (TX > 30°C) [dni]			Noce gorące (TN > 20°C) [dni]			Dni przymrozkowe (TN < 0°C) [dni]			Dni mroźne (TX < 0°C) [dni]		
		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	Niziny	45	43	45	10	10	10	0,6	0,6	0,6	84	84	84	22	21	22
	Równiny faliste	33	32	33	6	6	6	0,7	0,7	0,7	96	97	97	29	30	30
	Pogórza	30	29	30	5	5	5	0,5	0,5	0,5	101	102	101	28	28	28
	Góry	5	4	5	0	0	0	0,1	0,1	0,1	144	145	144	81	80	81

Wskaźniki temperatury powietrza

W tabeli 4 zestawiono średnią liczbę dni charakterystycznych pod względem termicznym w okresie 1971–2000 (dane z modelu).

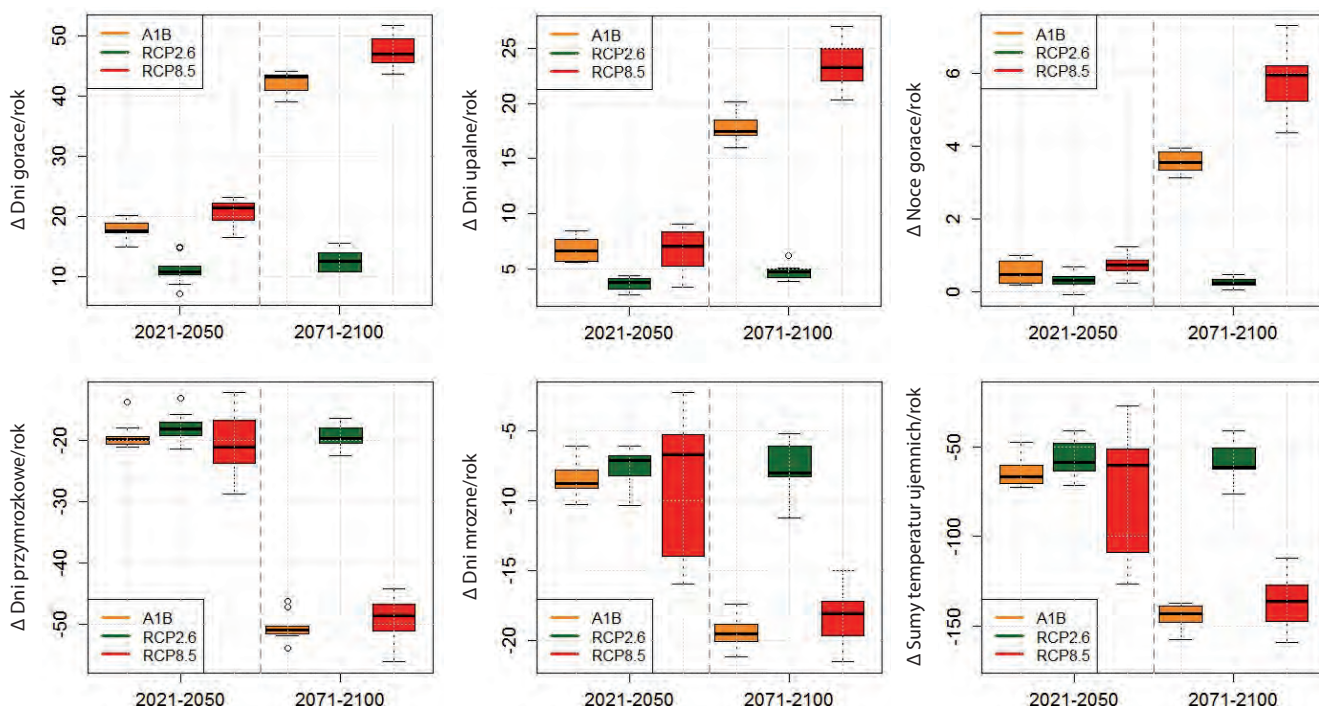
zacji. Dlatego też, w ocenie wyników modelu musi to być uwzględnione. Przebiegi scenariusza RCP8.5 różnią się znacznie między sobą, zwłaszcza dla okresu 2021–2050. Natomiast dla okresu 2071–2100 wszystkie trzy przebiegi są podobne.

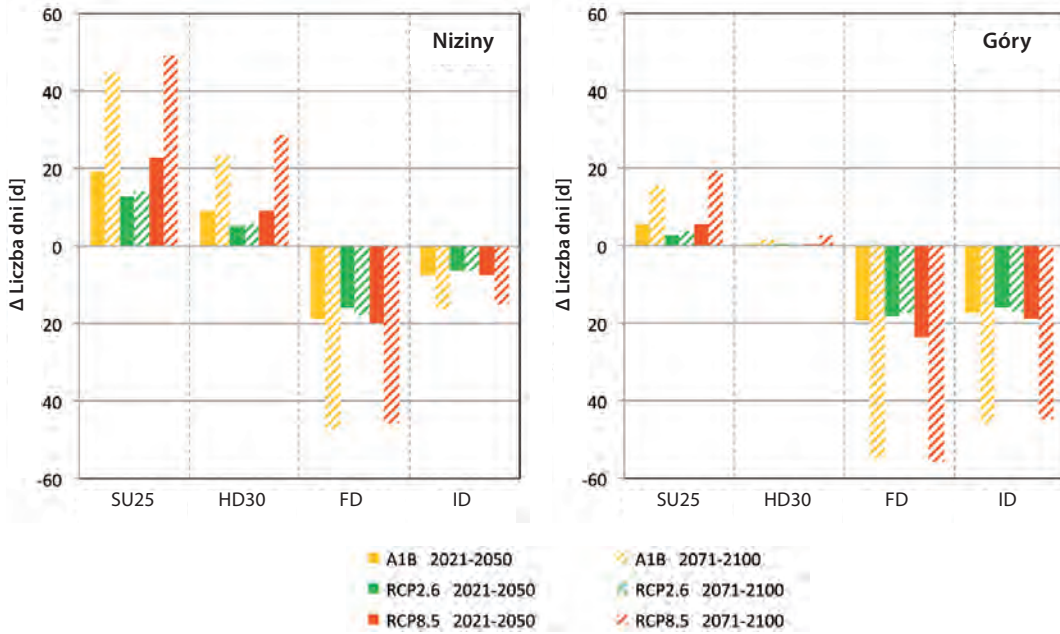
Ryc. 15

Zakres symulowanych zmian liczby dni charakterystycznych i sumy chłodu w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 dla stacji Goerlitz, dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 (przebiegi 1,2,3) (gruba czarna linia – mediana, prostokąt – 50 % danych, poziome linie poniżej i powyżej prostokąta – minimum/maksimum z serii czasowej, kropki – wartości odstające)

Na rycinie 15 przedstawiony został sygnał zmian liczby dni charakterystycznych oraz sumy chłodu dla stacji Goerlitz w okresach 2021–2050 i 2071–2100, w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000. Wykresy pudełkowe przedstawiają rozkład sygnału zmian dla 10 (A1B, RCP2.6) i 30 (RCP8.5) realizacji symulowanych przez model WETTREG2013. Ponadto, zaznaczona jest zmienność wewnętrzna modelu. Największy zakres zmian jest widoczny dla scenariusza RCP8.5, dla którego wykonano 3 przebiegi modelu, każdy przebieg obejmował 10 reali-

Przewidywane zmiany częstości występowania dni gorących (TX > 25°C) analizowano na przykładzie stacji Goerlitz, dla której możliwy jest wzrost ich frekwencji do połowy XXI wieku. W tym czasie sygnał zmian klimatu wykazuje podobny poziom, podczas gdy w końcu wieku zakres zmian między rozpatrywanymi scenariuszami staje się coraz większy. W przypadku scenariuszy A1B i RCP8.5 symulowana jest znacząco większa frekwencja dni gorących niż dla scenariusza RCP2.6 określanego





Ryc. 16
Zmiana liczby dni charakterystycznych w okresach 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu 1971–2000 w obszarach nizinnych (po lewej) oraz w górach (po prawej) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 (przebiegi 1,2,3), gdzie SU25 – dni gorące, HD30 – dni upalne, TN20 – noce gorące, FD – dni przymrozkowe, ID – dni mroźne

jako „two degree target”. Natomiast częstość dni przymrozkowych ($TN < 0^{\circ}C$) będzie się zmniejszała, zwłaszcza w okresie 2071–2100.

Dla obszaru badań projektu analizowano zależność występowania dni charakterystycznych od wysokości bezwzględnej. W tabeli 5 zamieszczono zmiany występowania określonych dni charakterystycznych w ujęciu regionalnym. W całym obszarze badań, w XXI wieku spodziewany jest wzrost frekwencji dni gorących ($TX > 25^{\circ}C$), podobnie jak dni upalnych ($TX > 30^{\circ}C$). W okresie 2021–2050 w obszarze nizinnych regionu przewidywany jest wzrost frekwencji dni gorących o 13–23 dni, w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000. W przypadku scenariuszy A1B i RCP8.5 liczba dni gorących może się podwoić, a w końcu wieku ich frekwencja może wzrosnąć od 45–49 dni. W górach, symulowany jest ich wzrost o 3–6 dni (2021–2050), a w okresie 2071–2100 o 4–20 dni (Ryc. 16).

Bardzo prawdopodobna jest większa frekwencja dni upalnych ($TX > 30^{\circ}C$), o 5–9 dni w okresie 2021–2050 oraz o 6–29 dni w okresie 2071–2100, w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000. W górach dni gorące występują rzadko, jednak w końcu XXI wieku spodziewany jest wzrost ich frekwencji o 3 dni. Podobnie, występowanie nocy gorących ($TN > 20^{\circ}C$) jest zjawiskiem rzadkim w obszarze badań projektu. Jednak w okresie 2071–2100 noce gorące mogą występować częściej, zwłaszcza w

obszarze nizinnych. Dni przymrozkowe ($TN < 0^{\circ}C$) będą wykazywały podobny trend zmian w regionach nizinnych oraz wyżej położonych. W okresie 2021–2050 frekwencja dni przymrozkowych zmniejszy się od 16–20 dni w porównaniu do okresu 1971–2000. W końcu wieku roczna liczba dni przymrozkowych będzie mniejsza o 17–56 dni. Przewiduje się znaczny spadek liczby dni mroźnych ($TX < 0^{\circ}C$) o 16–19 dni w okresie 2021–2050 oraz o 17–46 dni pod koniec wieku (2071–2100). W obszarze nizinnych dni mroźne będą występowały rzadziej, przewidywane jest zmniejszenie ich frekwencji w okresie 2021–2050 o 6–8 dni oraz o 6–16 dni w okresie 2071–2100, względem okresu referencyjnego 1971–2000. Tabela 5 zawiera przewidywane regionalne różnice zmian frekwencji dni charakterystycznych pod względem termicznym w obszarze granicznym Polski-Saksonii.

Tabela 5
Zmiany częstości występowania dni charakterystycznych pod względem termicznym w zależności od wysokości bezwzględnej w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000

	Przedział wysokościowy	Dni gorące (TX > 25°C) [dni]			Dni upalne (TX > 30°C) [dni]			Noce gorące (TN > 20°C) [dni]			Dni przymrozkowe (TN < 0°C) [dni]			Dni mroźne (TX < 0°C) [dni]		
		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	Niziny	19	13	23	9	5	9	1	0	1	-19	-16	-20	-8	-6	-8
	Równiny faliste	19	12	21	7	4	7	1	1	1	-19	-18	-22	-9	-7	-9
	Pogórza	18	12	21	7	3	6	1	1	1	-19	-18	-22	-9	-8	-9
	Góry	5	3	6	0	0	0	0	0	0	-19	-18	-23	-17	-16	-19
2071–2100	Niziny	45	14	49	23	6	29	3	0	5	-47	-18	-46	-16	-6	-15
	Równiny faliste	43	13	48	19	5	25	5	1	8	-49	-18	-47	-19	-8	-18
	Pogórza	42	12	46	18	4	23	4	1	6	-53	-19	-51	-21	-8	-20
	Góry	15	4	20	2	0	3	1	0	1	-55	-17	-56	-46	-17	-45

Tabela 6
Klasyfikacja surowości zim (SMUL 2008)

Suma chłodu [°C]	Klasyfikacja zim
< 100	Bardzo łagodna
100 – 200	Zima w normie
201 – 300	Umiarkowanie chłodna
301 – 400	Chłodna
> 400	Bardzo chłodna

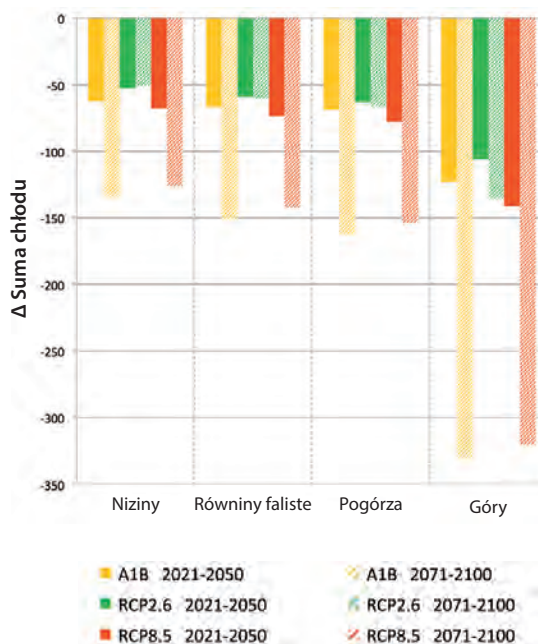
Przewidywany wzrost średniej temperatury powietrza spowoduje zmniejszenie sum chłodu we wszystkich analizowanych przedziałach wysokościowych, dla wszystkich scenariuszy klimatycznych w całym obszarze badań projektu. Wyniki przedstawione w tabeli 7 oraz symulowane zmiany wskaźnika sumy chłodu wskazują na znaczną zmianę warunków termicznych sezonu zimowego w obszarze pogranicza Polski i Saksonii.

Tabela 7
Zmiany wskaźnika sumy chłodu w zależności od wysokości bezwzględnej w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 oraz średnia suma chłodu [°C] w okresie 1971–2000 (dane z modelu)

Przedział wysokościowy	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
Niziny	167	161	167	-62	-53	-68	-134	-51	-126
Równiny faliste	192	190	192	-66	-59	-74	-151	-60	-142
Pogórza	210	209	210	-69	-63	-78	-162	-66	-154
Góry	528	529	529	-123	-106	-141	-330	-135	-320

W obszarze nizinnym regionu, bardzo łagodne termicznie sezony zimowe są spodziewane w bliższej (2021–2050) i dalszej (2071–2100) przyszłości (Ryc. 17). Podobnie, na obszarze równin falistych warunki zimowe klasyfikowane jako „zima w normie” są symulowane tylko w połowie XXI wieku. Im bliżej końca wieku tym surowość zim będzie się zmniejszała. Na obszarze pogórzy, gdzie obecnie występują „umiarkowanie chłodne zimy”, warunki termiczne będą odpowiadały „zimie w normie” (2021–2050) oraz warunkom „bardzo łagodnej zimy” (2071–2100). Obecnie warunki termiczne w górach umożliwiają uprawianie sportów zimowych.

W przyszłości pokrywa śnieżna może być zjawiskiem rzadkim, również w obszarach wyżej położonych. W górach obecnie są obserwowane warunki termiczne odpowiadające warunkom „bardzo chłodnej zimy”, natomiast w przyszłości w wyżej położonych obszarach sezony zimowe mogą być dużo bardziej łagodne. W okresie 2071–2100 w przypadku scenariuszy A1B i RCP8.5 spodziewane są sezony zimowe odpowiadające warunkom „umiarkowanie chłodnej zimy”



Ryc. 17
Zmiany wskaźnika sum chłodu w zależności od wysokości bezwzględnej w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 dla scenariuszy A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5 (przebieg 1,2,3)

Czas trwania

W tabeli 8 zestawiono zmianę frekwencji fal ciepła (jeśli przez co najmniej 6 kolejnych dni TX jest powyżej 90-tego percentyla z okresu 1971–2000) oraz średni czas trwania okresu z przymrozkami i bezprzymrozkowego w okresach: 2021–2050 oraz 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000.

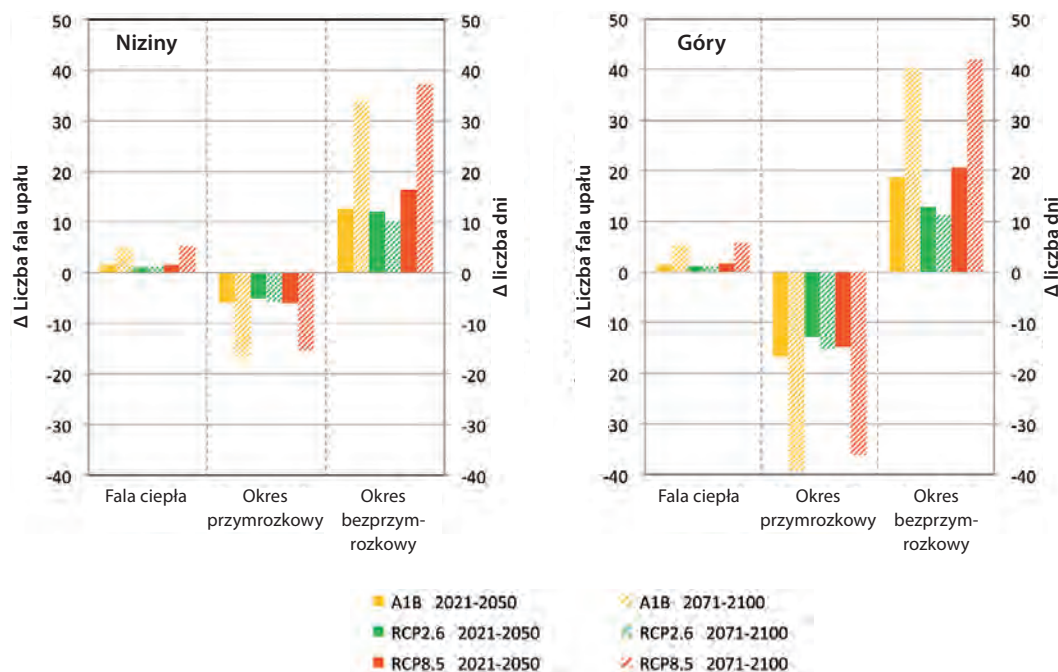
W obszarze badań projektu fale ciepła występują obecnie z frekwencją jednego zdarzenia w roku,

symulacje wskazują, że w połowie XXI wieku te zdarzenia mogą pojawiać się nawet dwa razy częściej. W końcu wieku w przypadku scenariusza RCP2.6 zmiany nie wystąpią, natomiast dla scenariuszy A1B oraz RCP8.5 symulowane zmiany wskazują, że będzie występowało 5–6 zdarzeń więcej. Przewidywana zmiana czasu trwania okresu z przymrozkami będzie większa w obszarach górskich niż na nizinach (Ryc. 18). Szczególnie w okresie 2071–2100 okres przymrozkowy w górach ulegnie skróceniu o 15–39 dni, a na nizinach będzie krótszy o 7–14 dni.

	Przedział wysokościowy	Fale ciepła [liczba epizodów]			Okres przymrozkowy [dni]			Okres bezprzymrozkowy [dni]		
		A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5	A1B	RCP 2.6	RCP 8.5
1971–2000	Niziny	1	1	1	27	28	27	185	183	185
	Równiny faliste	1	1	1	35	37	35	182	180	182
	Pogórza	1	1	1	36	37	36	180	178	180
	Góry	1	1	1	59	60	59	149	148	149
2021–2050	Niziny	2	1	2	-6	-5	-6	13	12	16
	Równiny faliste	2	1	2	-8	-7	-8	13	12	17
	Pogórza	2	1	2	-8	-8	-8	12	12	16
	Góry	2	1	2	-17	-13	-15	19	13	21
2071–2100	Niziny	5	1	5	-16	-6	-15	34	10	37
	Równiny faliste	5	1	6	-21	-8	-19	36	9	39
	Pogórza	5	1	6	-22	-9	-21	33	10	36
	Góry	5	1	6	-39	-15	-36	40	11	42

Tabela 8
Zmiana częstości występowania fal ciepła oraz czasu trwania okresu przymrozkowego i bezprzymrozkowego w zależności od wysokości bezwzględnej w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 oraz wartości średnie dla okresu 1971–2000 (dane z modelu) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5 (przebieg 1,2,3)

Ryc. 18
Zmiana częstości występowania fal ciepła oraz czasu trwania okresu przymrozkowego i bezprzymrozkowego w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 dla obszarów nizinnych (lewy) oraz dla gór (prawy) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 oraz RCP85 (przebieg 1,2,3)



Zgodnie z przewidywanym wzrostem temperatury powietrza, średnia długość okresu bezprzymrozkowego wydłuży się o dwa do trzech tygodni w okresie 2021–2050. Natomiast w okresie 2071–2100 spodziewane jest wydłużenie okresu bezprzymrozkowego o 9–42 dni.

Wskaźniki agroklimatyczne

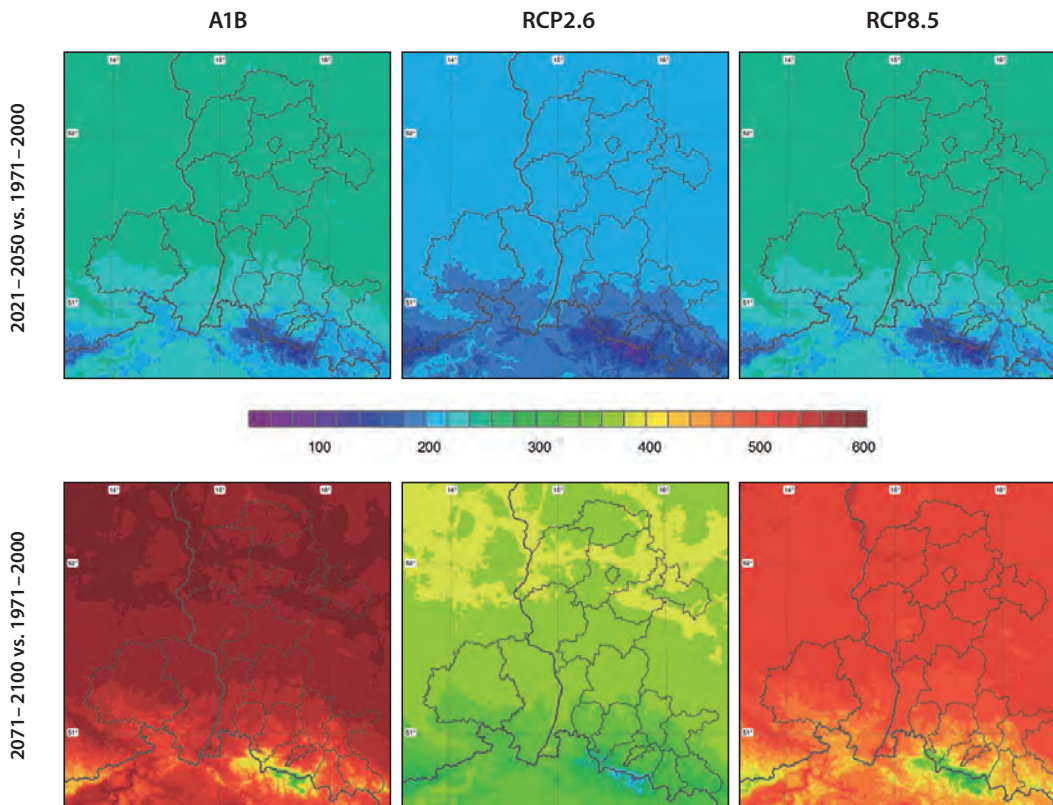
Stopniodni okresu wegetacyjnego (GDD – Growing degree-days)

Wskaźnik stopniodni okresu wegetacyjnego (GDD) opisuje strumień energii cieplnej, który w danym czasie jest niezbędny do wzrostu określonych upraw (EEA 2012).

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

W okresie referencyjnym, tj. w latach 1971–2000, na obszarze objętym analizą, średnia wartość wskaźnika GDD zmieniała się w zakresie od około 100 na stacji Śnieżka w Karkonoszach, do ponad 1100 w Cottbus, Dreźnie i Lindenbergu. W rozkładzie przestrzennym charakterystyczna jest silna zależność GDD od wysokości nad poziomem morza, a dokładniej odwrotnie proporcjonalna zależność temperatury powietrza od wysokości.

Zgodnie ze wszystkimi trzema wybranymi scenariuszami globalnych zmian klimatu (SRES A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5), zakłada się stopniowy wzrost temperatury powietrza, na całym obszarze domeny projektu KLAPS. W konsekwencji, we wszystkich przypadkach, przekłada się to na stopniowy wzrost wielkości wskaźnika GDD w perspektywie do roku 2100. W stosunku do wspomnianego okresu referencyjnego (1971–2000), GDD wzrasta najbardziej w przypadku scenariusza SRES A1B. Według tego scenariusza, w latach 2021–2050 oraz 2071–2100 wielkość wskaźnika wzrośnie odpowiednio o 250–270 i 560–580 GDD na obszarze nizinnym oraz odpowiednio 40–50 i 300–320 GDD w najwyższych partiach Sudetów (Ryc. 19). Według scenariusza RCP8.5 wzrost GDD na obszarze całej domeny w latach 2021–2050 będzie dość podobny do SRES A1B, natomiast nieco słabszy w ostatnich trzech dekadach XXI wieku i wyniesie wtedy maksymalnie 520–540 w północnej, nizinnej części regionu i 280–300 na wierzchołkach Karkonoszy. Najmniejszy wzrost temperatury powietrza, a co za tym idzie także wskaźnika GDD, zakłada scenariusz RCP2.6, który związany jest z wymuszeniem radiacyjnym na poziomie 2,6 W·m⁻². Według niego GDD w latach 2021–2050 wzrośnie o około 200 na obszarach nizinnych i tylko 50 GDD w najwyższych partiach domeny modelu KLAPS. Z kolei w latach 2071–2100 ten wzrost wyniesie 380–400 GDD w północnej części regionu oraz 180–200 w najwyższych partiach gór.



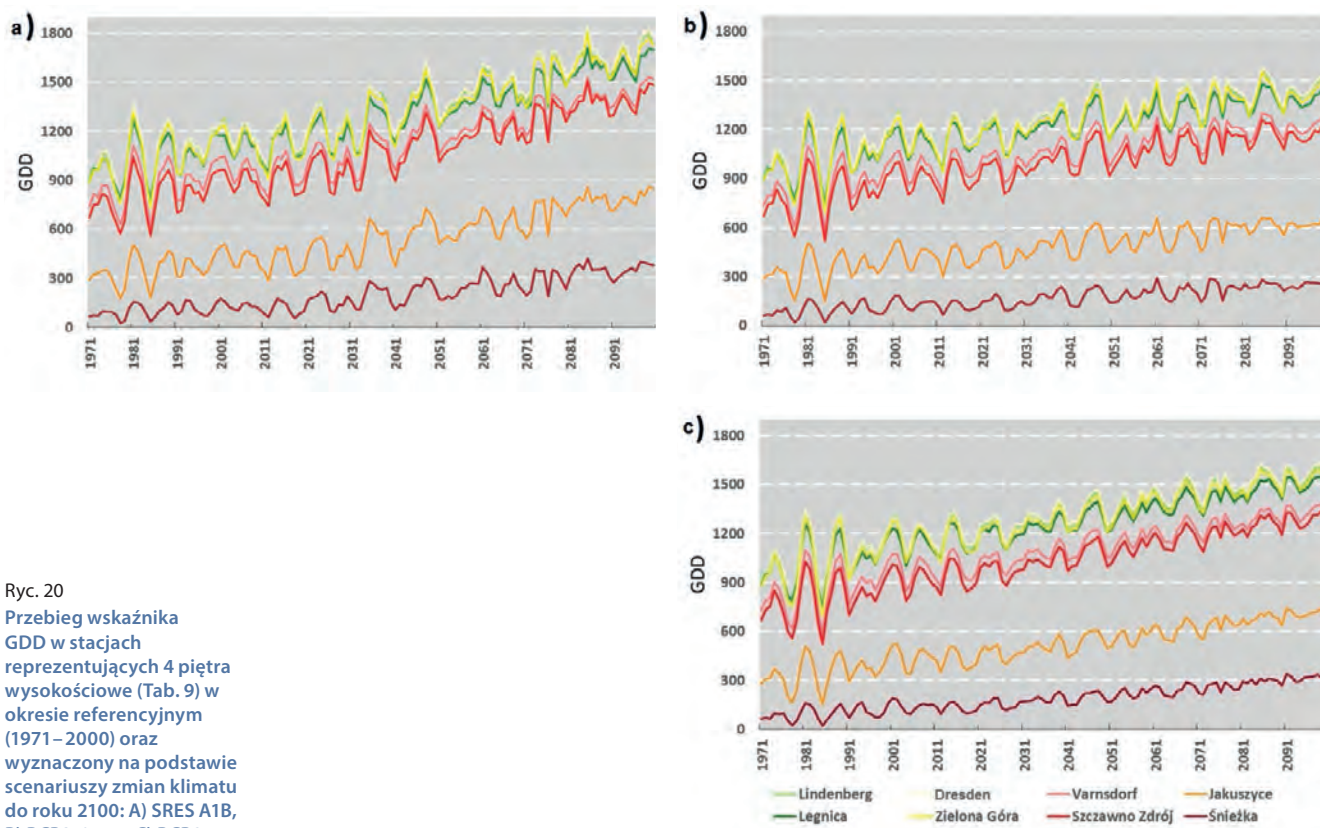
Ryc. 19
Różnice wskaźnika GDD pomiędzy okresem referencyjnym (1971–2000) oraz scenariuszami na lata 2021–2050 i 2071–2100 (odpowiednio: SRES A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5)

Zaprezentowane wyniki wskazują, że zgodnie z przyjętymi scenariuszami, większy wzrost GDD jest charakterystyczny dla terenów nizinnych i mniejszy w stacjach reprezentujących piętro górskie (Tabela 9, Ryc. 20). O ile w przypadku scenariuszy SRES A1B oraz RCP8.5 wyraźna tendencja wzrostowa GDD utrzymuje się do końca XXI wieku, o tyle w scenariuszu RCP2.6 słabnie w ostatnim 30-leciu. Poza tym, w porównaniu z okresem referencyjnym, wszystkie scenariusze zakładają mniejszą skalę wahań wartości omawianego wskaźnika z roku na rok. Jest to szczególnie charakterystyczne dla stacji górskich, w końcowym okresie analizy, tj. dla okresu 2071–2100.

Wielkość wskaźnika GDD wzrasta najbardziej przy uwzględnieniu scenariusza SRES A1B (Ryc. 20). Na obszarze nizinnym, tj. w północnej części domeny projektu KLAPS, GDD zmienia się od poziomu 1000–1200 w okresie referencyjnym do 1300–1400 w latach 2021–2050 oraz 1700–1800 w trzech ostatnich dekadach XXI w. W piętrze górskim (grzbietowe partie Karkonoszy) są to wartości odpowiednio: 100, 150–200 i 300–350 GDD. Zgodnie z wcześniejszą oceną, najmniejszy wzrost temperatury i wskaźnika GDD dotyczy scenariusza RCP2.6, ponieważ na terenach nizinnych, w latach 2071–2100, GDD wzrasta maksymalnie do 1400–1500.

Przedział wysokościowy	Wysokość [m n.p.m.]	Stacje meteorologiczne
Niziny	< 150	Legnica (122 m n.p.m.); Lindenberg (98 m n.p.m.)
Równiny faliste	150–350	Zielona Góra (192 m n.p.m.); Drezno (227 m n.p.m.)
Pogórza	350–650	Szczawno Zdrój (430 m n.p.m.); Varnsdorf (365 m n.p.m.)
Góry	>= 650	Jakuszyce (860 m n.p.m.); Śnieżka (1602 m n.p.m.)

Tabela 9
Stacje reprezentujące poszczególne piętra wysokościowe



Ryc. 20
Przebieg wskaźnika
GDD w stacjach
reprezentujących 4 piętra
wysokościowe (Tab. 9) w
okresie referencyjnym
(1971–2000) oraz
wyznaczony na podstawie
scenariuszy zmian klimatu
do roku 2100: A) SRES A1B,
B) RCP2.6 oraz C) RCP8.5

Suma temperatur aktywnych (Sum of Active Temperatures SAT)

Suma temperatur aktywnych (SAT) to suma średnich dobowych temperatur z okresu od 1 IV do 31 X, które są równe lub przekraczają wartość progową 10°C.

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

W okresie referencyjnym (1971–2000), wielkość tego wskaźnika mieściła się w dość szerokim zakresie, tj. od około 500 SAT na Śnieżce w Karkonoszach (1602 m n.p.m.) do 2829 w Cottbus. Tak jak w przypadku wskaźnika GDD, o przestrzennej zmienności SAT, decyduje przede wszystkim wysokość nad poziomem morza, a dokładnie odwrotnie proporcjonalna zależność temperatury powietrza od wysokości.

Tak jak w przypadku GDD, wszystkie trzy scenariusze zmian klimatu do roku 2100 (SRES A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5), zakładają wzrost wielkości SAT na całym obszarze domeny projektu KLAPS.

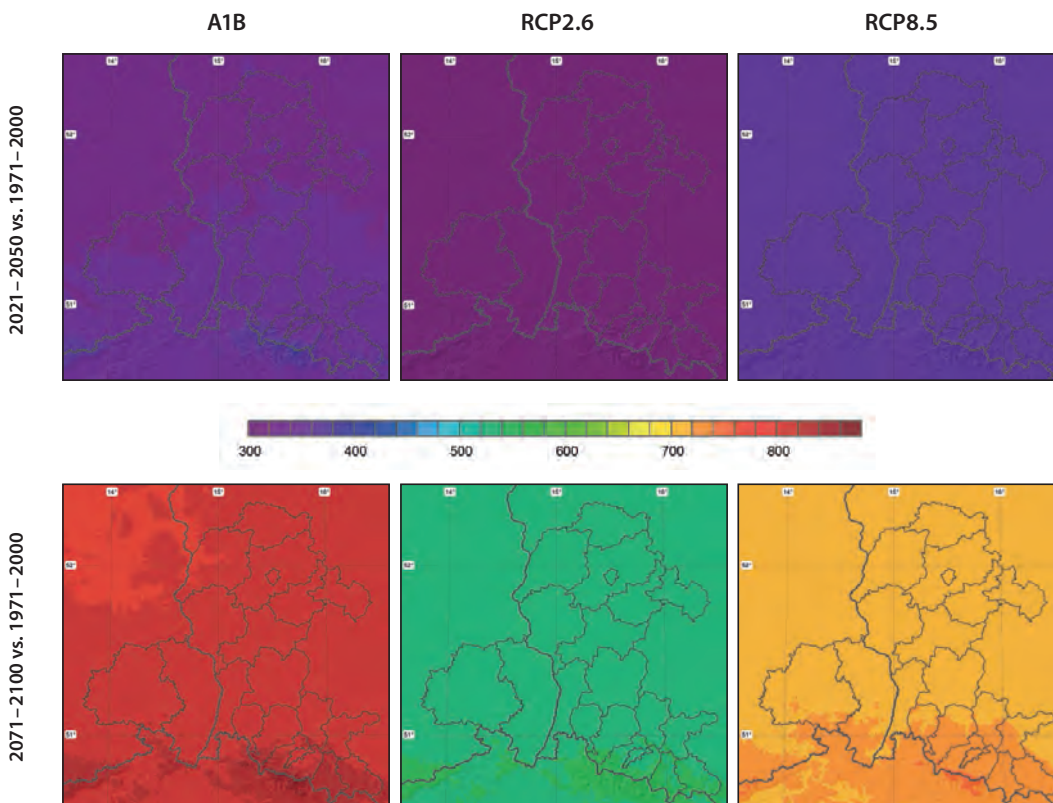
Patrząc jednak na skalę tych zmian, w porównaniu z okresem referencyjnym (1971–2000), prezentują zupełnie odmienny rozkład przestrzenny w porównaniu z GDD. Otóż największe zmiany wskaźnika SAT spodziewane są na terenach górskich, natomiast najmniejsze na obszarze nizinnym (Ryc. 21). Różnica wynika z nieco odmiennego konstrukcji wskaźnika SAT, który oblicza się sumując średnie dobowe temperatury przekraczające próg 10°C. To oznacza, że dość duży wpływ na wielkość SAT, poza wzrastającą średnią dobową temperaturą powietrza, ma także liczba dni z przekroczonym progiem termicznym. Okazuje się zatem, że zakładany wzrost temperatury powietrza, ma większe znaczenie dla SAT notowanego w górach, poprzez przyrost liczby dni z przekroczonym progiem 10°C, niż wzrost średniej dobowej temperatury ponad 10°C na obszarze nizinnym. Te zależności są najbardziej jaskrawe (różnice na poziomie 100 SAT) przy uwzględnieniu scenariusza SRES A1B, który zakłada największy wzrost temperatury. Według niego w latach 2021–2050 oraz 2071–2100 wielkość wskaźnika SAT wzrośnie odpowiednio o 390–400 i 860–880 SAT w najwyższych partiach Sudetów



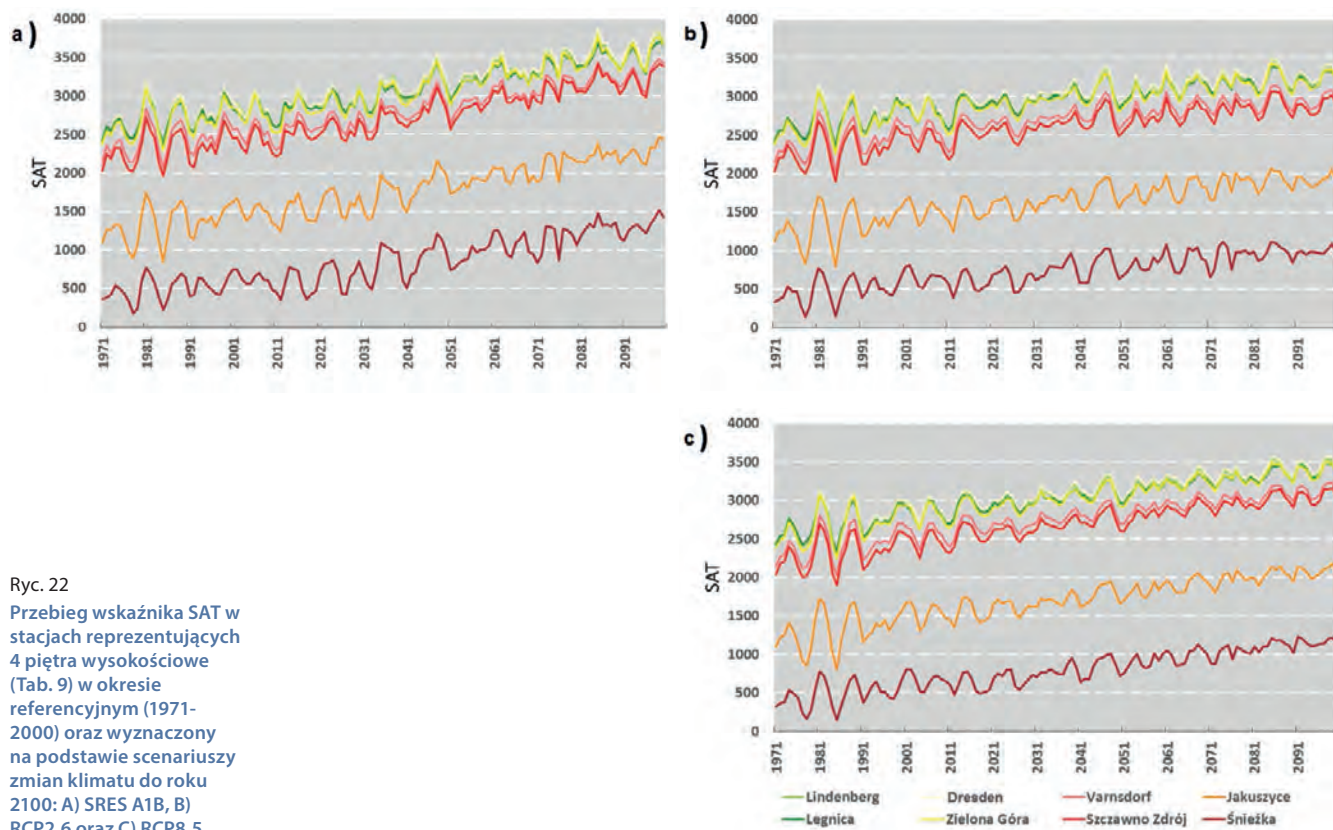
(Ryc. 21). Omawiana przewaga obszarów górskich we wzroście wskaźnika SAT jest znacznie mniejsza przy uwzględnieniu dwóch kolejnych scenariuszy zmian klimatu – RCP2.6 i RCP8.5. W obu przypadkach, w wieloletnim okresie 2021–2050, wzrost wskaźnika SAT w porównaniu z okresem referencyjnym jest bardzo podobny dla całej domeny projektu KLAPS, ponieważ przewaga najwyższych partii górskich to jedynie 20–30 SAT. Nieco większe różnice pojawiają się w okresie 2071–2100, odpowiednio 30–40 SAT dla RCP2.6 i 60–70 SAT dla RCP8.5.

Biorąc pod uwagę scenariusz SRES A1B, w północnej, nizinnej części domeny SAT zmienia się od poziomu 2800–3000 w okresie referencyjnym do 3100–3400 w latach 2021–2050 oraz 3600–3800 w trzech ostatnich dekadach XXI w. Jednak największe zmiany dokonują się w piętrze górskim. Na Śnieżce, SAT wzrasta odpowiednio, od około 500 SAT w okresie referencyjnym do 1400 pod koniec XXI w. Najmniejszy wzrost wskaźnika SAT dotyczy scenariusza RCP2.6, ponieważ na terenach nizinnych, w latach 1971–2100 osiąga on 3400–3500.

SAT, podobnie do GDD, wykazuje wyraźną tendencję wzrostową przez cały XXI w., przy uwzględnieniu scenariuszy SRES A1B oraz RCP8.5, natomiast scenariusz RCP2.6 zakłada osłabienie tej tendencji w ostatnim 30-leciu i jest ono wyraźniejsze dla stacji górskich (Ryc. 22). Wraz z upływem kolejnych dekad scenariusze zakładają także stopniowo zmniejszającą się amplitudę wahań SAT z roku na rok, co jest bardziej charakterystyczne dla dwóch ostatnich dekad XXI w. oraz przede wszystkim stacji reprezentujących piętro górskie.



Ryc. 21
Różnice wskaźnika SAT pomiędzy okresem referencyjnym (1971–2000) oraz scenariuszami na lata 2021–2050 i 2071–2100 (odpowiednio: SRES A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5)



Ryc. 22
Przebieg wskaźnika SAT w stacjach reprezentujących 4 piętra wysokościowe (Tab. 9) w okresie referencyjnym (1971-2000) oraz wyznaczony na podstawie scenariuszy zmian klimatu do roku 2100: A) SRES A1B, B) RCP2.6 oraz C) RCP8.5

Wskaźnik hydrotermiczny Selianinowa (HTC)

Na wskaźnik hydrotermiczny Selianinowa (Selianinov hydrothermal coefficient – HTC) w równej mierze wpływają opady atmosferyczne jak i temperatura powietrza. Rosnąca temperatura lub malejące opady obniżają wartość wskaźnika natomiast wzrost sumy opadów lub spadek temperatury wywołują przyrost wartości wskaźnika.

W okresie 1971–2010 przeciętne sezonowe minimum HTC wyraźnie rosło z wysokością bezwzględną i wynosiło od 0,3 w stacjach regionu nizinnego (poniżej 150 m n.p.m.) do ponad 3,0 w stacjach regionu górskiego (powyżej 650 m n.p.m.). W okresie referencyjnym występowała też duża zmienność wartości HTC pomiędzy kolejnymi latami, w około połowie lat na co najmniej jednej stacji pojawiały się warunki charakterystyczne dla suszy gdy wartość HTC obniżała się poniżej 0,5. Granicę pomiędzy warunkami niedoboru opadów a wystarczającym uwilgotnieniem stanowi wartość HTC równa 1,0.

Uśrednione wartości rocznego minimum wskaźnika HTC dla wszystkich trzech wariantów projekcji 2021–2050 obniżają się w stosunku do okresu refe-

rencyjnego 1971–2000 w całym obszarze opracowania. Spadek ten jest najmniejszy w przypadku scenariusza RCP2.6, nieco większy w scenariuszu RCP8.5 i największy w scenariuszu A1B. Nawet w tym ostatnim scenariuszu zmiany nie są zbyt duże i wynoszą od około -0,05 do -0,1 w regionie nizin, około -0,1 w regionie falistych równin, -0,2 do -0,4 w regionie pogórzy i do mniej niż -0,4 a w regionie górskim osiągając największy spadek ok. -0,95 w najwyższych partiach Karkonoszy. W przypadku scenariusza A1B oznacza to rozszerzenie się strefy z warunkami niedoboru opadów ($HTC < 1,0$) w części okresu wegetacyjnego z całych nizin i większości równin w okresie odniesienia do całego piętra nizin, całego piętra równin i najniższej strefy piętra pogórza. W przypadku scenariusza RCP8.5 ten zasięg jest niemal identyczny i nieco mniejszy w scenariuszu RCP2.5, gdzie granica niedoboru opadów przebiega w pobliżu wysokości 350 m n.p.m. czyli wzdłuż granicy pięter równin i pogórzy. Tylko w przypadku scenariusza A1B pojawiają się niewielkie obszary o wartości wskaźnika HTC poniżej 0,5 czyli kryterium suszy ale są ograniczone do doliny dolnej Odry nieco na północ od granicy obszaru projektu.



W tym samym kierunku zachodzą zmiany HTC dla wszystkich wariantów projekcji 2071–2100 w stosunku do okresu 1971–2000 i także dotyczy to całego obszaru opracowania. Relacje pomiędzy odpowiednimi wariantami są podobne ale spadek HTC jest bardziej intensywny. W scenariuszu A1B zmiany są największe i wynoszą od około -0,1 do -0,2 w regionie nizin, około -0,2 do -0,4 w regionie falistych równin, -0,3 do -0,8 w regionie pogórzy i poniżej -0,8 w regionie górskim z maksymalnym spadkiem ok. -1,6 w najwyższych partiach Karkonoszy. Tym samym w scenariuszu AB1 strefa z niedoborem opadów ($HTC < 1,0$) w części okresu wegetacyjnego obejmuje w całości piętra nizin, falistych równin i pogórza, miejscami wkraczając także w najniższe części piętra gór. W przypadku scenariusza RCP8.5 ten zasięg przebiega na wysokości około 550 m n.p.m. czyli nieco poniżej granicy pięter pogórza i gór a w scenariuszu RCP2.5 niedobór opadów zaznacza się poniżej wysokości 450 m n.p.m. Bardzo wyraźnie w scenariuszu A1B rozszerzają się obszary o wartości wskaźnika HTC poniżej 0,5 oznaczającego suszę i obejmują większość regionu nizin. W scenariuszu RCP8.5 wartości HTC poniżej 0,5 wkraczają w najniższą część obszaru opracowania w rejonie ujścia Nysy Łużyckiej do Odry i obejmują pas ciągnący się na

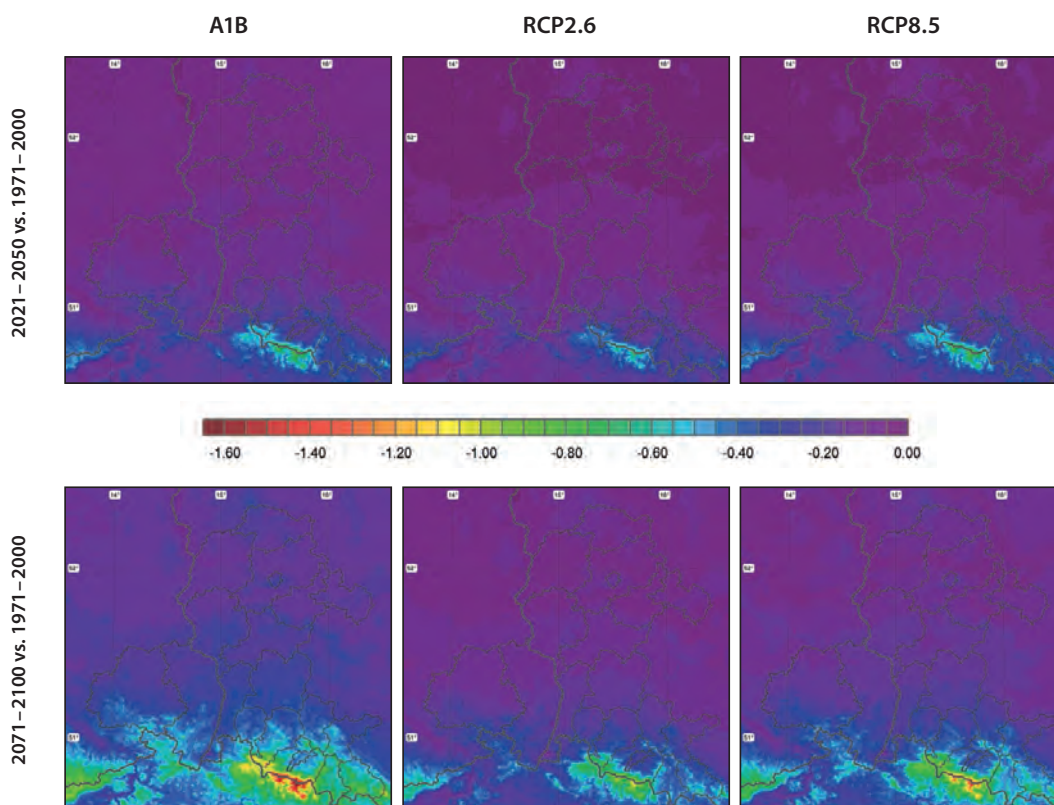
HTC	Opis
0,4–0,7	bardzo sucho
0,7–1,0	sucho
1,0–1,3	umiarkowanie sucho
> 1,3	wilgotno

Tabela 10
Charakterystyczne przedziały wartości wskaźnika HTC

wschód od tego miejsca aż do granicy z Wielkopolską; w odniesieniu do projekcji w scenariuszu RCP2.6 jest to jedynie mały fragment doliny Odry od Krosna Odrzańskiego po ujście Nysy Łużyckiej.

Wskaźniki bioklimatyczne i turystyczne

Warunki klimatyczne są jednym z ważniejszych czynników oddziałujących na turystykę. Jest to szczególnie widoczne w obszarach górskich, gdzie obserwowane są zarówno specyficzne warunki klimatyczne, jak i duże natężenie ruchu turystycznego. Największy wpływ na turystykę mają takie elementy jak: temperatura i wilgotność powietrza, prędkość wiatru, zachmurzenie, opady atmosferyczne i pokrywa śnieżna. Odgrywają one również ważną rolę w klimatoterapii, w przypadku której wymagane są określone warunki pogodowe dla leczenia pacjentów ośrodków sanatoryjnych.



Ryc. 23
Sygnał różnic wskaźnika HTC w obszarze projektu w horyzoncie czasowym 2021–2050 oraz 2071–2100 w scenariuszach emisyjnych: A1B (lewa strona), RCP2.6 (środek) i RCP8.5 (prawa strona)

Wartości wybranych wskaźników biotermicznych i turystycznych obliczono na podstawie danych z projekcji dla okresu 1971–2010. Ocena warunków bioklimatycznych w przyszłości oraz użyteczność pogody dla klimatoterapii, turystyki i rekreacji została określona dla bliższej (2021–2050) i dalszej (2071–2100) przyszłości, przy uwzględnieniu scenariuszy: A1B, RCP2.6 i RCP8.5. Dane z projekcji dla okresu 1971–2100 obejmowały zarówno wartości dobowe (temperatura maksymalna i minimalna powietrza, opad atmosferyczny), jak i dane z terminu obserwacyjnego 12 UTC (temperatura powietrza, wilgotność względna powietrza, prężność pary wodnej, zachmurzenie, prędkość wiatru). Ponadto wykorzystano również dane dotyczące wysokości Słońca nad horyzontem, które posłużyły do oceny warunków radiacyjnych.

Warunki bioklimatyczne regionu zostały określone przy wykorzystaniu wybranych wskaźników biotermicznych i turystycznych. Szczegółowe informacje dotyczące wszystkich uwzględnionych wskaźników można znaleźć w pierwszej publikacji projektu KLAPS: „Zmiany klimatu w regionie granicznym Polski i Saksonii” (MEHLER i in. 2014). Obciążenia cieplne organizmu zostały określone przy pomocy wskaźnika UTCI (Universal Thermal

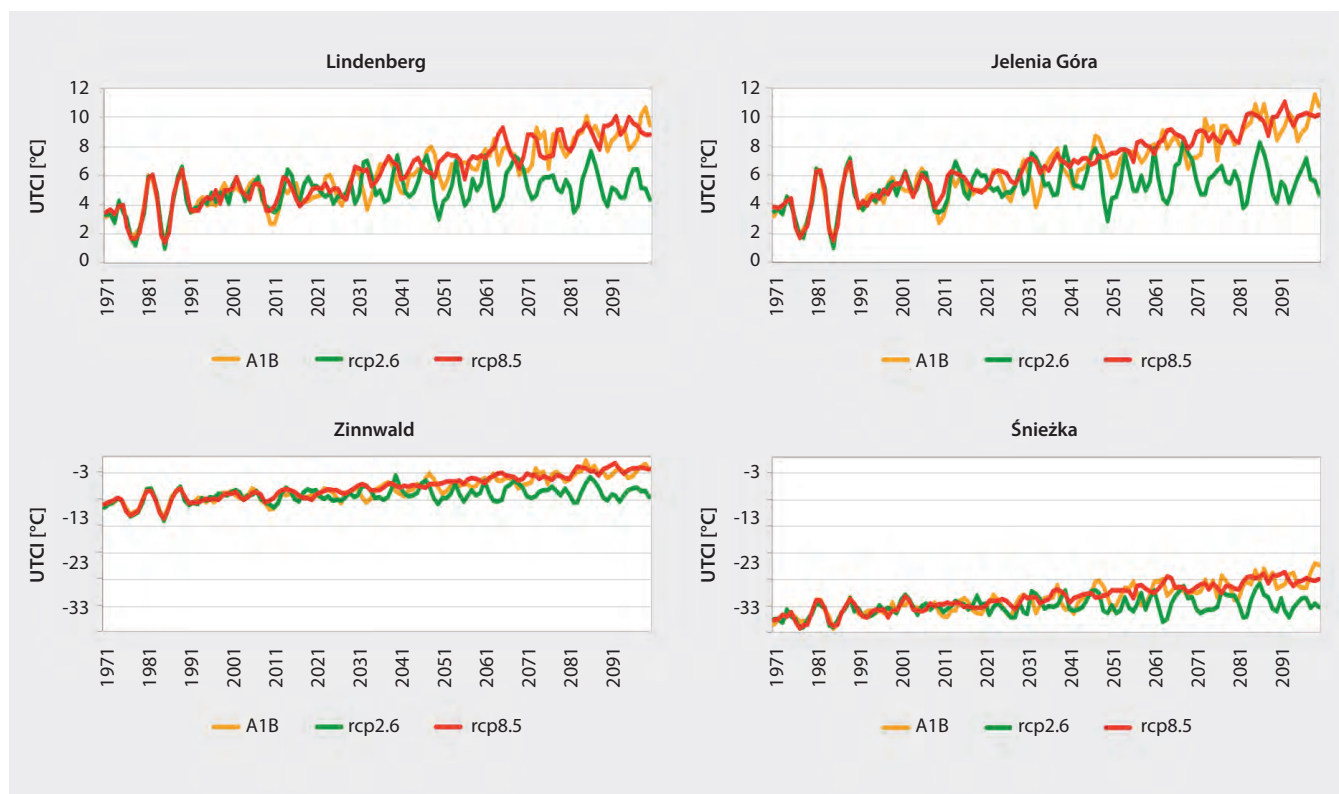
Climate Index), którego wartości są grupowane w dziesięciu klasach obciążeń cieplnych, od „nieznośnego stresu zimna” do „nieznośnego stresu gorąca”. Natomiast oddziaływanie warunków pogodowych na klimatoterapię i turystykę zostało przedstawione w oparciu o wskaźnik użyteczności warunków pogodowych WSI (Weather Suitability Index) oraz diagram informacji klimatyczno-turystycznej CTIS (Climate Tourism Information Scheme).

Wskaźnik UTCI obliczono dla czterech stacji, reprezentujących niziny (Lindenberg 98 m n.p.m.), przedgórze (Jelenia Góra 342 m n.p.m.), góry (Zinnwald 877 m n.p.m.) i szczytową partię gór (Śnieżka 1603 m n.p.m.). Z kolei charakterystyki WSI zostały opracowane dla stacji Goerlitz (niżej położone obszary regionu) i dla Śnieżki (szczytowa partia gór), natomiast w analizach dotyczących CTIS wykorzystano dane z Lindenbergu (obszar nizinny regionu) oraz Śnieżki.

Warunki biotermiczne

Prognozowane średnie roczne wartości wskaźnika UTCI dla okresu 1971–2100 wskazują na ich znaczne zróżnicowanie w zależności od przyjętego scenariusza (Ryc. 24). Każda z uwzględnionych stacji odznacza się wyraźnym wzrostem wartości UTCI

Ryc. 24
Przebieg prognozowanych średnich rocznych wartości UTCI dla lat 1971–2100 dla scenariuszy: A1B, RCP2.6 i RCP8.5 na wybranych stacjach meteorologicznych



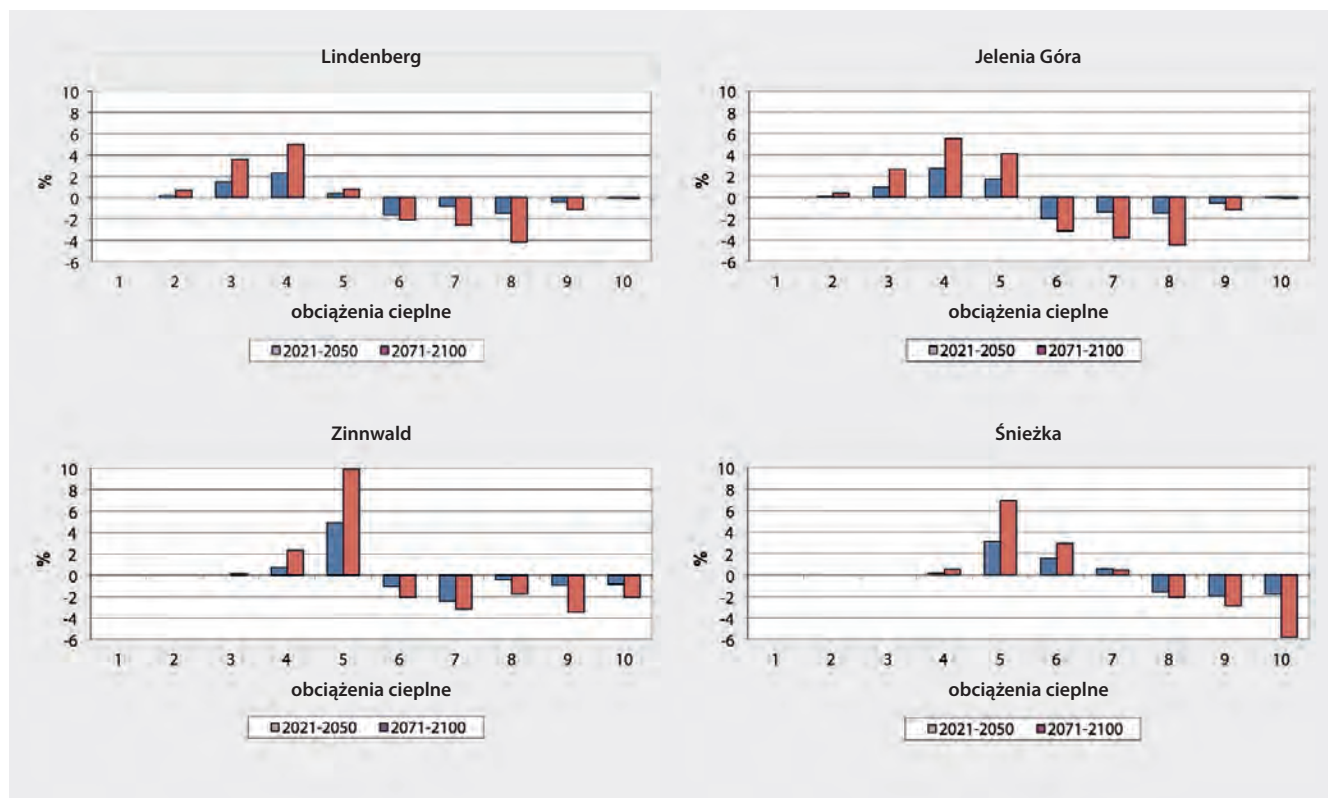


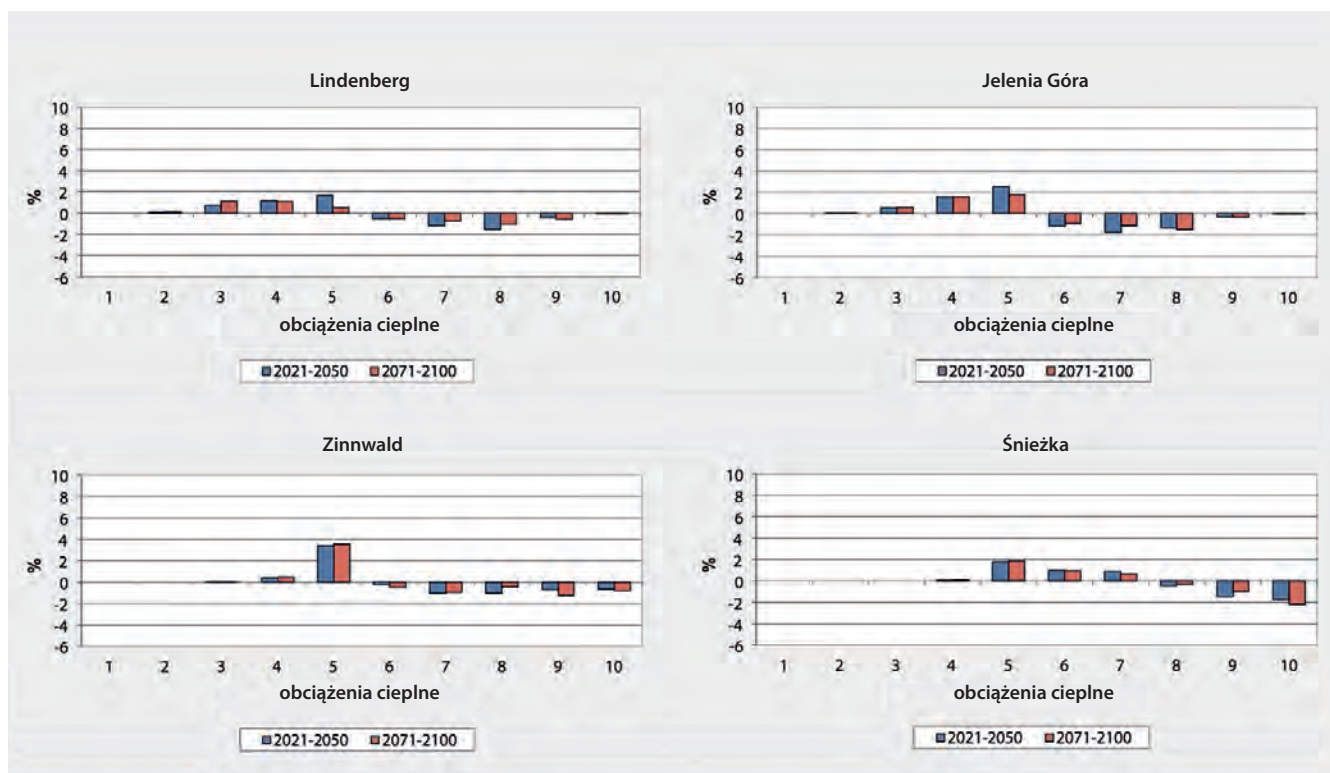
dla scenariuszy A1B i RCP8.5. Natomiast w świetle scenariusza RCP2.6 przebieg UTCI jest znacznie łagodniejszy i nie wskazuje wyraźnej tendencji zmian. W ostatnich latach XXI w. wartości UTCI dla A1B i RCP8.5 będą zdecydowanie wyższe niż dla RCP2.6. Zróżnicowanie wartości UTCI w przypadku każdej z rozpatrywanych stacji może zatem również spowodować znaczną różnorodność w częstości występowania dni z poszczególnymi rodzajami obciążeń cieplnych.

Zmiany częstości występowania poszczególnych rodzajów obciążeń cieplnych wg UTCI są ściśle uzależnione od scenariusza zmian klimatu. W przypadku scenariuszy A1B i RCP8.5 niżej położone regiony (Lindenberg i Jelenia Góra) będą odznaczały się spadkiem częstości występowania dni ze stresem zimna. Dodatkowo przewidywany jest również wzrost częstości sytuacji pogodowych związanych ze stresem gorąca. Zmiany częstości występowania obciążeń zimna/gorąca wynoszą kilka procent w stosunku do wartości dla okresu referencyjnego i są większe dla okresu dalszej przyszłości tj. w horyzoncie czasowym końca XXI wieku (Ryc. 25 – 27). W obszarach górskich (Zinnwald, Śnieżka) spodziewany jest spadek liczby dni ze stresem zimna. W przypadku stacji Zinnwald

dotyczy to wszystkich klas ze stresem zimna, natomiast dla Śnieżki przewidywany jest znaczny spadek częstości dni z ekstremalnym stresem zimna („silny stres zimna”, „bardzo silny stres zimna”, „nieznośny stres zimna”). Nieznaczny spadek przewidywany jest również dla stresu zimna z klas „łagodny” i „umiarkowany”, wzrosnąć może natomiast częstość pogody z brakiem obciążeń cieplnych. Jest to widoczne zwłaszcza w przypadku Zinnwald, gdzie różnica pod względem średniej rocznej częstości dni z warunkami termoneutralnymi pomiędzy dalszą przyszłością (2071 – 2100) a okresem referencyjnym (1971 – 2000) wynosi 10%.

Ryc. 25
Zmiana częstości występowania dni z poszczególnymi obciążeniami cieplnymi dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000) dla scenariusza A1B; obciążenia cieplne: (1-nieznośny stres gorąca, 2-bardzo silny stres gorąca, 3-silny stres gorąca, 4-umiarkowany stres gorąca, 5-brak obciążeń cieplnych, 6-łagodny stres zimna, 7-umiarkowany stres zimna, 8-silny stres zimna, 9-bardzo silny stres zimna, 10-nieznośny stres zimna

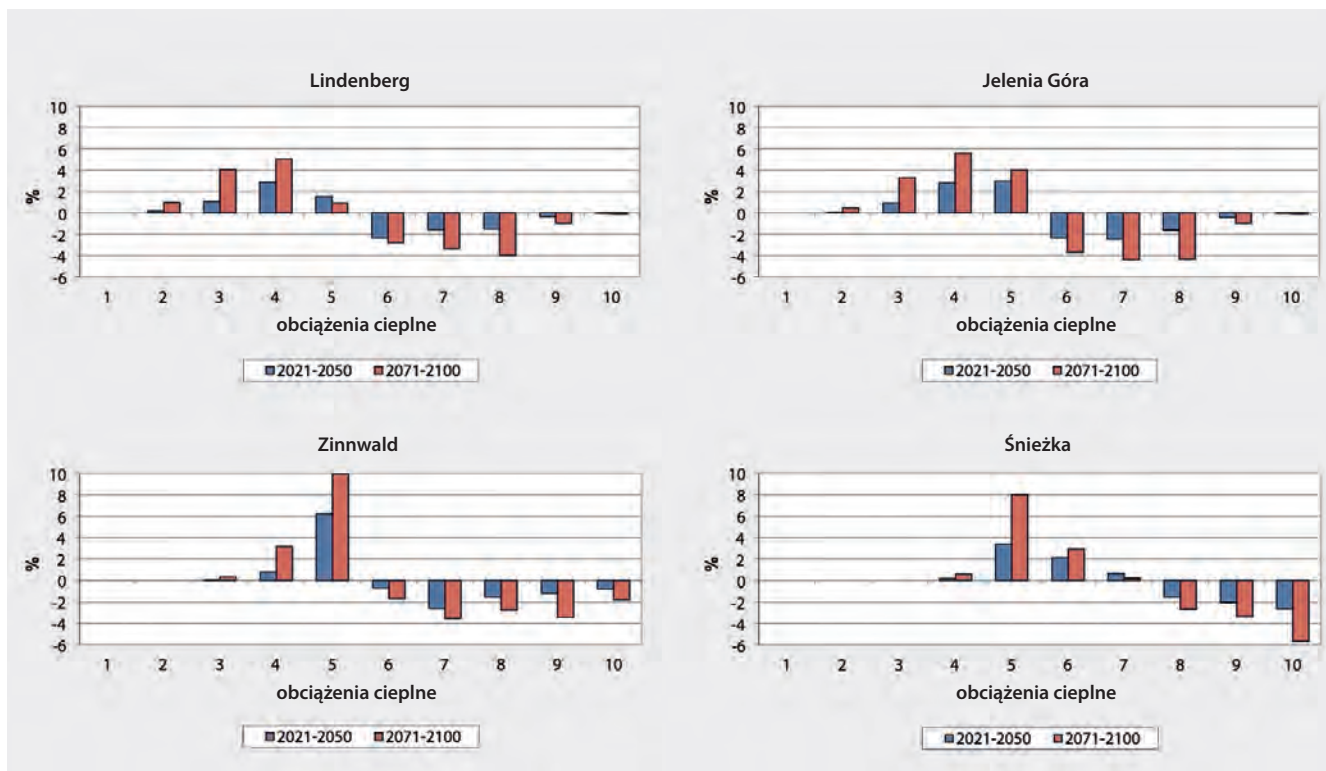




Ryc. 26

Zmiana częstości występowania dni z poszczególnymi obciążeniami cieplnymi dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000) dla scenariusza RCP2.6 (objaśnienia klas obciążeń cieplnych – patrz ryc. 25)

W przypadku scenariusza RCP2.6, tendencje zmian częstości występowania obciążeń cieplnych są porównywalne ze scenariuszem A1B, jednakże charakteryzują się one zdecydowanie mniejszą intensywnością. Dla całego regionu spodziewane jest zmniejszenie frekwencji dni ze stresem zimna. Największe natężenie zmian obserwowane będzie dla warunków termoneutralnych w Zinnwald, gdzie ich częstość występowania może być kilka procent wyższa w porównaniu do scenariusza A1B (Ryc. 26).



Ryc. 27
Zmiana częstości występowania dni z poszczególnymi obciążeniami cieplnymi dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000) dla scenariusza RCP8.5 (objaśnienia klas obciążeń cieplnych – patrz ryc. 25)

Wskaźniki turystyczne

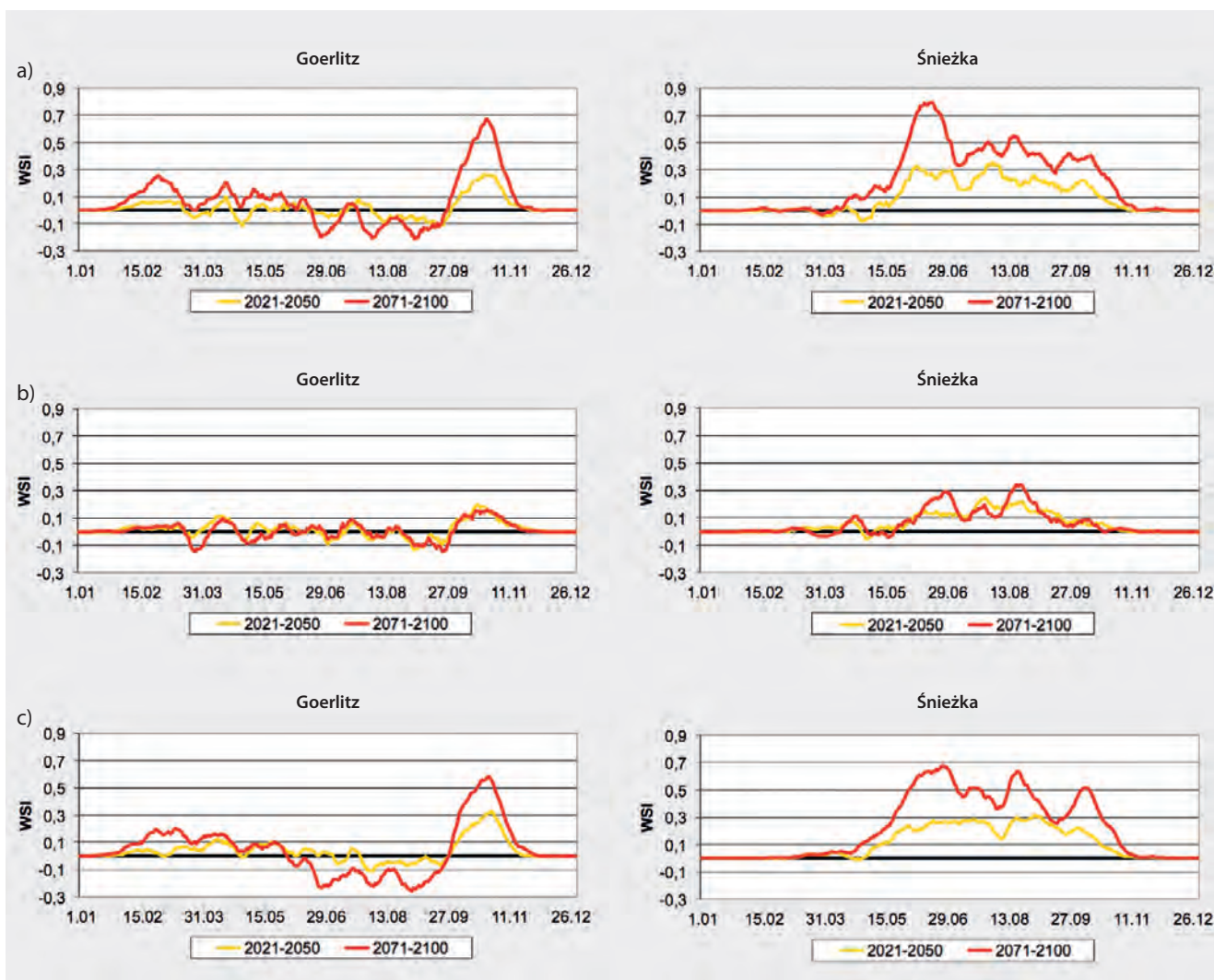
W niniejszym opracowaniu w sposób szczególnie uwzględniony został aspekt użyteczności warunków pogodowych dla poszczególnych form klimatoterapii, turystyki i rekreacji. Wykorzystano w tym celu wskaźnik użyteczności warunków pogodowych dla turystyki WSI (BŁĄŻEJCZYK 2004) oraz diagram informacji klimatyczno-turystycznej CTIS (MATZARAKIS 2007).

Wskaźnik użyteczności warunków pogodowych dla turystyki (WSI)

Kąpiele słoneczne. Tego rodzaju forma klimatoterapii jest ściśle uzależniona od promieniowania słonecznego. Z tego względu najważniejszym czynnikiem w tym przypadku jest radiacja, jednakże na użyteczność pogody dla kąpiei słonecznych mają wpływ również inne elementy meteorologiczne, jak temperatura powietrza czy prędkość wiatru. Porównując przebieg roczny wartości WSI dla niżej położonych obszarów (Goerlitz) i regionów górskich (Śnieżka), można zauważyć znaczne różnice pomiędzy tymi regionami. Okres, w którym możliwe jest korzystanie z tej formy klimatoterapii na nizinach obserwowany jest od kwietnia do października („warunki umiarkowanie korzystne”), z maksimum przypadającym na przełom maja i września.

W przypadku danych z projekcji, dla obszarów nizinnych przewidywane są znaczne różnice pomiędzy WSI dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości, a okresem referencyjnym (1971 – 2000). Dotyczy to zwłaszcza scenariuszy A1B i RCP8.5, podczas gdy dla RCP2.6 wartości dla okresów przyszłych są bardziej zbliżone do okresu 1971 – 2000 (Ryc. 28). Największe różnice są symulowane dla miesięcy wrzesień–październik. Zarówno w bliższej, jak dalszej przyszłości spodziewane jest wydłużenie okresu, w którym możliwe będzie korzystanie z kąpiei słonecznych. W okresie 2071 – 2100 optimum dla tej formy klimatoterapii może zostać przesunięte z września na październik, z uwagi na wzrost częstości występowania stresu gorąca w okresie letnim. Dla okresu wiosenno-jesiennego spodziewany jest wzrost wartości WSI, spowodowany głównie potencjalnym wzrostem temperatury powietrza, co wpłynie pozytywnie na użyteczność pogody dla kąpiei słonecznych. W półroczu ciepłym wzrost natężenia stresu gorąca może spowodować obniżenie wartości WSI w stosunku do warunków obecnych.

W obszarach górskich z uwagi na przewidywane zmiany wartości poszczególnych elementów meteorologicznych wg scenariuszy A1B i RCP8.5, spodziewany jest również wzrost wartości wskaź-



Ryc. 28

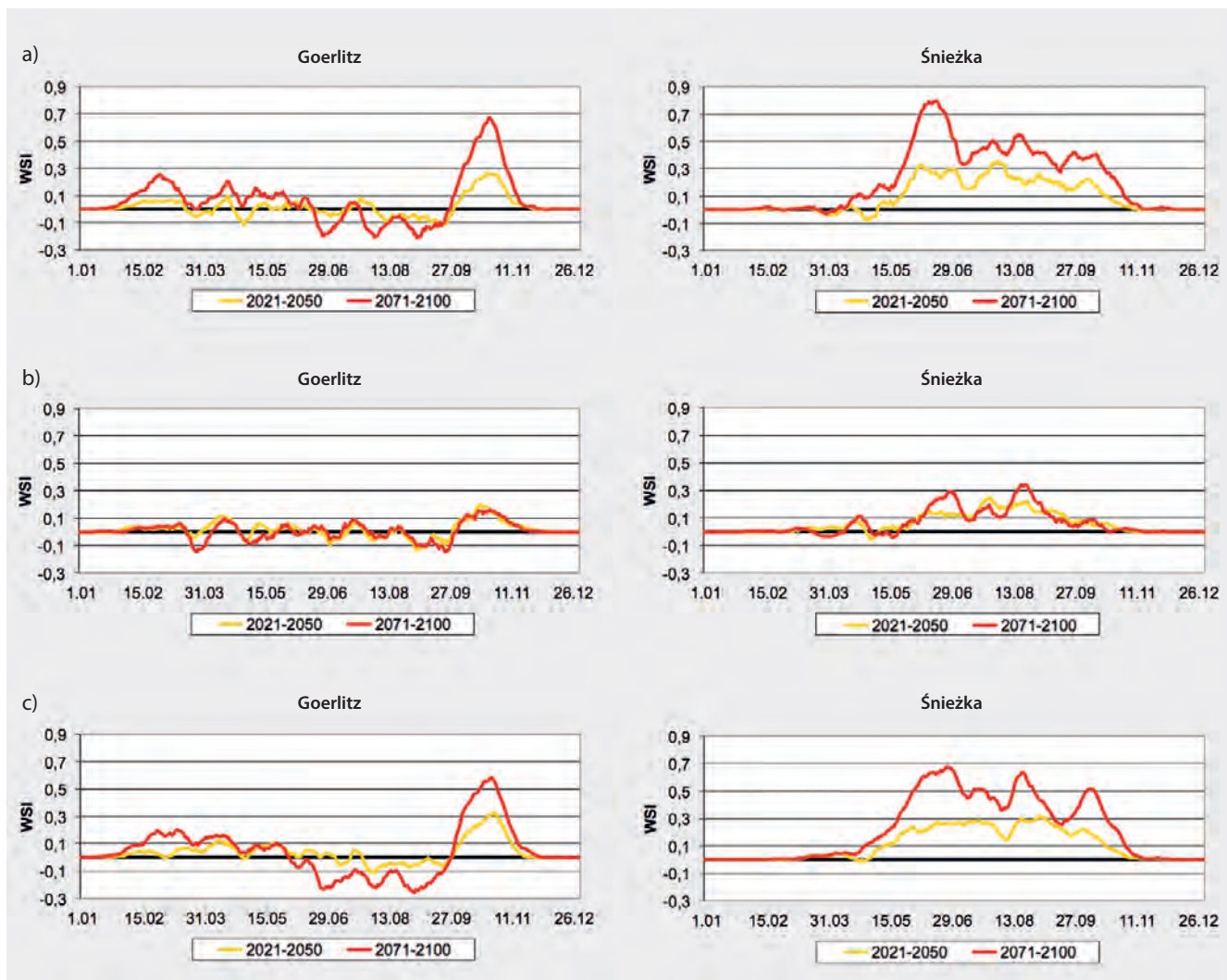
Zmiana wartości wskaźnika WSI dla kąpiei słonecznych w Goerlitz (238 m n.p.m.) i na Śnieżce (1603 m n.p.m.) dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000), dla scenariuszy: a) A1B, b) RCP2.6, c) RCP8.5

nika WSI. Przewidywane jest, że czas trwania warunków „umiarkowanie korzystnych” dla kąpiei słonecznych w okresach 2021 – 2050 i 2071 – 2100 może ulec wydłużeniu. W bliższej przyszłości (2021 – 2050) jego początek jest porównywalny ze stanem obecnym, koniec zaś może ulec przesunięciu na III dekadę września. Dla całego półrocza ciepłego symulowany jest znaczny wzrost WSI w porównaniu do okresu referencyjnego. W latach 2071 – 2100 spodziewane jest zarówno wydłużenie okresu z „umiarkowanie korzystnymi warunkami” (od maja do połowy października), jak i wzrost samych wartości WSI. Dodatkowo, w przypadku większości dni sierpnia oraz w pojedynczych dniach czerwca wartości WSI dla kąpiei słonecznych będą mogły odpowiadać nawet „warunkom korzystnym”. W pozostałej części roku wartości wskaźnika WSI symulowane dla okresów przyszłych nie są niższe od notowanych dla okresu referencyjnego.

Można zatem stwierdzić, że w świetle przyjętych scenariuszy warunki pogodowe obszarów górskich w aspekcie ich oddziaływania na kąpiele słoneczne mogą w przyszłości ulec znacznej poprawie.

W przypadku scenariusza RCP2.6, w regionach niżej położonych zmiana wartości wskaźnika WSI dla bliższej i dalszej przyszłości względem okresu referencyjnego będzie niewielka. Nieco większe odchylenia są symulowane dla gór, zwłaszcza dla sezonu letniego. W odróżnieniu od A1B i RCP8.5, w świetle scenariusza RCP2.6 symulowane wartości WSI w żadnym okresie nie przekraczają progu klasy „warunków korzystnych”.

Kąpiele powietrzne. Kąpiele powietrzne są formą klimatoterapii polegającą na przebywaniu w miejscach zacienionych, bez wykonywania aktywności fizycznej, która mogłaby zwiększyć



Ryc. 29
Zmiana wartości wskaźnika WSI dla kąpiei słonecznych w Goerlitz (238 m n.p.m.) i na Śnieżce (1603 m n.p.m.) dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000), dla scenariuszy: a) A1B, b) RCP2.6, c) RCP8.5

produkcję ciepła metabolicznego. Na podstawie danych dla okresu referencyjnego można stwierdzić, że w niższej położonych regionach (Goerlitz) warunki pogodowe „umiarkowanie korzystne” i lepsze trwają od połowy marca do drugiej dekady października (Ryc. 29). Podobnie jak w przypadku kąpiei słonecznych, okres letni odznacza się nieco gorszymi warunkami z uwagi na częściej pojawiający się stres gorąca.

Prognozowane zmiany klimatu w XXI w. (A1B, RCP8.5) będą mogły również wpłynąć na użyteczność warunków pogodowych dla kąpiei powietrznych. Początek okresu z „umiarkowanie korzystnymi warunkami” w bliższej przyszłości (2021 – 2050) będzie przypadać na podobną porę roku jak w przypadku okresu referencyjnego, natomiast w dalszej przyszłości (2071 – 2100) jest spodziewany w pierwszej dekadzie marca. Koniec okresu z „umiarko-

wanie korzystnymi warunkami” będzie prawdopodobnie przesunięty na początek (dla bliższej przyszłości) i połowę (dla dalszej przyszłości) listopada. Podobnie jak w przypadku kąpiei słonecznych, sezony letnie w okresach 2021 – 2050 i 2071 – 2100 mogą charakteryzować się obniżeniem użyteczności pogody wskutek intensywniejszego oddziaływania stresu gorąca.

Szczytowe partie gór odznaczają się innym w porównaniu do nizin przebiegiem wartości WSI dla kąpiei powietrznych. Obecnie ta forma klimatoterapii w przypadku Śnieżki jest możliwa od początku maja do końca sierpnia („warunki umiarkowanie korzystne”), ze znacznym obniżeniem użyteczności pogody w połowie czerwca („warunki niekorzystne”). Jednocześnie czynnikiem wpływającym na dobre warunki pogodowe dla kąpiei powietrznych w górach jest brak występowania w ich szczytowej

partii dni ze stresem gorąca. W przypadku danych prognozowanych (A1B, RCP8.5), zaobserwować można potencjalny wzrost użyteczności warunków pogodowych dla kąpeli powietrznych zarówno dla bliższej, jak i dalszej przyszłości. Różnice te są szczególnie zauważalne zwłaszcza w półroczu ciepłym. W bliższej przyszłości (2021 – 2050) wartości WSI w sierpniu mogą często przekraczać wartość 1,2, co jest równoznaczne z klasą „warunków korzystnych”. Spodziewane jest również wydłużenie okresu, w którym możliwe są kąpiele powietrzne. Przewidywany początek okresu („warunki umiarkowanie korzystne” i lepsze) nie zmieni się, ale może trwać do końca września. W okresie 2071 – 2100 czas trwania tego typu warunków jest prognozowany na okres od początku maja do drugiej dekady października. Można zatem stwierdzić, że w świetle scenariuszy A1B i RCP2.6 szczytowe partie gór w przyszłości będą odznaczały się lepszymi, w porównaniu do obecnych, warunkami pogodowymi dla kąpeli powietrznych.

Przewidywane wartości wskaźnika WSI dla kąpeli powietrznych, dla niżej położonych obszarów, uzyskane na podstawie scenariusza RCP2.6, będą się charakteryzowały niewielkimi różnicami w horyzoncie czasowym bliższej i dalszej przyszłości. W górach będą one nieco większe, podobnie jak w przypadku A1B i RCP8.5 zwłaszcza w półroczu ciepłym. Dla żadnego z przyszłych okresów, nie stwierdzono wskaźnika WSI o wartościach odpowiadających „warunkom korzystnym”. Początek okresu z warunkami „umiarkowanie korzystnymi”, w przypadku bliższej i dalszej przyszłości, przypada na podobny termin, zaś jego zakończenie może być przesunięte na trzecią dekadę września.

Łagodne formy rekreacji. Poszczególne formy turystyki i rekreacji charakteryzuje różny stopień metabolicznej produkcji ciepła, który jest uzależniony od intensywności wysiłku fizycznego. W zależności od wielkości metabolizmu wyróżnia się łagodne i intensywne formy turystyki i rekreacji. Formy łagodne (np. spacer) są związane z aktywnością, która nie powoduje znacznego zwiększenia stopnia metabolizmu.

Niżej położone obszary odznaczają się przeważnie dobrymi warunkami pogodowymi w ciągu całego roku w odniesieniu do łagodnych form. Największe wartości WSI w przebiegu rocznym notowane są w drugiej połowie kwietnia i we wrześniu, optimum zatem przypada na podobny okres jak w przypadku kąpeli słonecznych i powietrznych. Podczas lata wskaźnik użyteczność warunków pogodowych jest obniżony wskutek zwiększonej intensywności

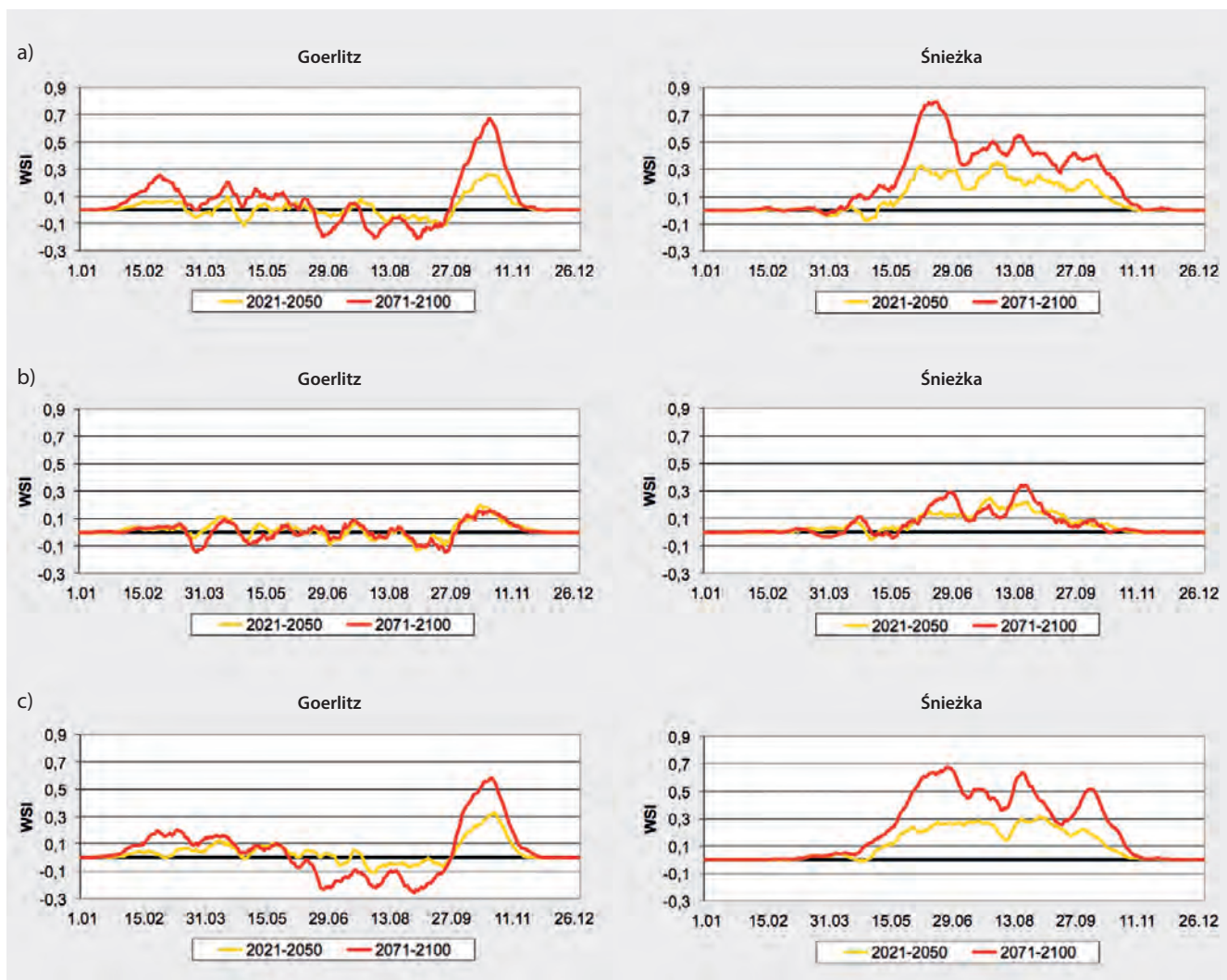
stresu gorąca, natomiast w półroczu chłodnym na wartości WSI negatywnie wpływa większa liczba dni z opadem, większa prędkość wiatru, zachmurzenie oraz niższe wartości temperatury powietrza.

W przyszłości na podstawie danych z projekcji, można stwierdzić, że największe zmiany w odniesieniu do warunków obecnych mogą być obserwowane dla scenariuszy A1B i RCP8.5 (Ryc. 30). Brak jest natomiast większych różnic dla okresu półroczu chłodnego. W półroczu ciepłym, zwłaszcza w sezonie letnim, różnice te mogą być dość znaczne, WSI odznacza się wyraźnie niższymi wartościami niż w okresie referencyjnym. W przypadku bliższej przyszłości największy ich spadek notowany będzie dla sierpnia. W pierwszej dekadzie miesiąca użyteczność warunków pogodowych może być ograniczona nawet do klasy „warunków umiarkowanie korzystnych”. Wartości WSI symulowane dla okresu dalszej przyszłości są jeszcze niższe. W trzeciej dekadzie lipca oraz przez większość dni sierpnia użyteczność warunków pogodowych dla łagodnych form rekreacji może być obniżona do „warunków umiarkowanie korzystnych”. Podobnie jak w przypadku kąpeli słonecznych i powietrznych, optymalny okres dla uprawiania łagodnych form rekreacji może być przesunięty z września na połowę października, kiedy prognozowane wartości WSI odpowiadają klasie „warunków bardzo korzystnych”.

W strefie szczytowej gór przewidywane zmiany wartości poszczególnych elementów meteorologicznych w świetle scenariuszy A1B i RCP8.5, mogą również wpłynąć na wzrost wartości WSI dla łagodnych form rekreacji. Dla bliższej przyszłości (2021 – 2050) wzrost ten jest symulowany w okresie od połowy maja do połowy września. W przypadku dalszej przyszłości (2071 – 2100), spodziewane są większe wartości WSI niż w okresie 2021 – 2050, jednakże nie osiągają klasy „warunków bardzo korzystnych”.

W świetle scenariusza RCP2.6, dla obszarów nizinnych, w bliższej i dalszej przyszłości, przewidywany jest nieznaczny spadek wartości WSI, zwłaszcza w okresie letnim. Jednakże w przypadku tego scenariusza natężenie spadku WSI jest zdecydowanie mniejsze w porównaniu do scenariuszy A1B i RCP8.5. Dla szczytowej części gór prognozowany jest niewielki wzrost wartości WSI w półroczu ciepłym w porównaniu do okresu referencyjnego, jednakże również na tym obszarze intensywność zmian jest wyraźnie mniejsza niż dla scenariuszy A1B i RCP8.5.

Intensywne formy rekreacji. Uprawianie intensywnych form rekreacji (np. bieganie, jazda na rowerze, trekking, itp.) wiąże się ze znacznym wzrostem



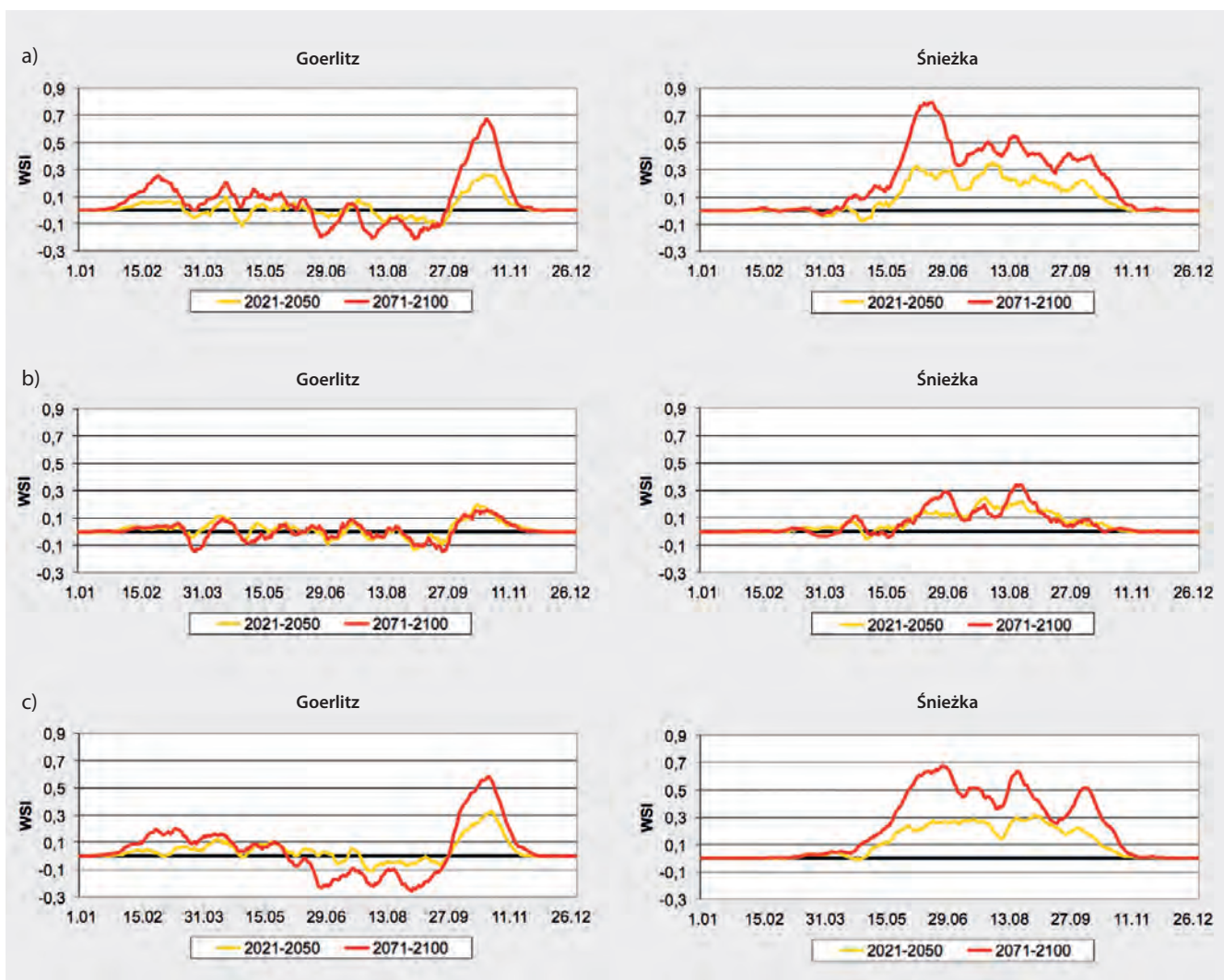
Ryc. 30
Zmiana wartości wskaźnika WSI dla łagodnych form rekreacji w Goerlitz (238 m n.p.m.) i na Śnieżce (1603 m n.p.m.) dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000), dla scenariuszy: a) A1B, b) RCP2.6, c) RCP8.5

metabolicznej produkcji ciepła. Z tego względu oddziaływanie stresu zimna w czasie ich uprawiania nie wpływa na organizm człowieka w takim stopniu, jak w przypadku wcześniej opisanych form klimatoterapii i rekreacji. Z kolei występowanie stresu gorąca w sezonie letnim znacząco potęguje obciążenia cieplne organizmu, co sprawia, że użyteczność warunków pogodowych dla tych form rekreacji, z punktu widzenia warunków biotermicznych, jest w okresie lata dość niska.

W niżej położonych regionach (Goerlitz) największe wartości wskaźnika WSI dla intensywnych form turystyki i rekreacji są obserwowane w półroczu chłodnym (Ryc. 31), zwłaszcza od połowy września do końca lutego. Latem użyteczność warunków pogodowych dla intensywnych form rekreacji jest obniżona, z uwagi na wspomniany wcześniej często

pojawiający się stres gorąca. Najmniej korzystne warunki są obserwowane w pierwszej dekadzie sierpnia, aczkolwiek nawet wówczas wartości WSI wciąż utrzymują się w klasie „warunków korzystnych”.

Prognozowane warunki klimatyczne (scenariusze A1B i RCP8.5) wskazują na pogorszenie się użyteczności pogody dla tych form w bliższej i dalszej przyszłości na obszarach nizinnych. Pomimo braku wyraźniejszych odchyień w stosunku do okresu referencyjnego dla półroczu chłodnego, w przypadku lata spodziewany jest znaczny spadek wartości WSI dla tych form aktywności. W bliższej przyszłości najintensywniejszy spadek WSI prognozowany jest na sierpień, kiedy symulowane wartości WSI wskazują na występowanie „warunków umiarkowanie korzystnych”. W pozostałej części półroczu ciepłego wartości WSI w stosunku do



Ryc. 31
Zmiana wartości wskaźnika WSI dla intensywnych form rekreacji w Goerlitz (238 m n.p.m.) i na Śnieżce (1603 m n.p.m.) dla bliższej (2021–2050) i dalszej (2071–2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971–2000), dla scenariuszy: a) A1B, b) RCP2.6, c) RCP8.5

okresu referencyjnego są niższe, jednakże wciąż odpowiadają „warunkom korzystnym”. Dalsza przyszłość odznacza się większym spadkiem użyteczności warunków pogodowych dla półrocza ciepłego. Przewiduje się, że okres z warunkami „umiarkowanie korzystnymi” może trwać dłużej, od początku czerwca aż do końca sierpnia. Dla całego półrocza ciepłego, w przypadku dalszej przyszłości, WSI przyjmuje wartości mniejsze niż modelowane dla okresu referencyjnego i bliższej przyszłości.

Szczytowa strefa gór, reprezentowana przez Śnieżkę, charakteryzuje się bardziej wyrównanym przebiegiem rocznym wartości WSI w porównaniu do nizin. Obecnie, najlepsze warunki („warunki bardzo korzystne”) dla intensywnych form rekreacji są notowane w okresie od trzeciej dekady kwietnia do początku czerwca oraz od trzeciej dekady sierpnia do połowy listopada.

Projekcje dla scenariusza A1B, nie wskazują większych zmian w stosunku do okresu referencyjnego 1971–2000. Optymalny okres dla uprawiania intensywnych form aktywności jest zbliżony do obecnego, jedynym wyjątkiem jest druga dekada lutego, kiedy wskutek nieznacznego wzrostu WSI kilka dni może odznaczać się występowaniem „warunków bardzo korzystnych” (okres 2071–2100). W przypadku scenariusza RCP8.5 i podobnie A1B przewidywane jest wydłużenie optymalnego okresu dla uprawiania intensywnych form rekreacji. „Warunki bardzo korzystne” mogą występować przez niemal całe półrocze ciepłe, z wyjątkiem trzeciej dekady lipca i dwóch pierwszych dekad sierpnia („warunki korzystne”) w bliższej przyszłości, podczas gdy w przypadku okresu 2071–2100 warunki „korzystne” zaczynają się nieco wcześniej (koniec czerwca) i mogą trwać dłużej, do połowy grudnia.

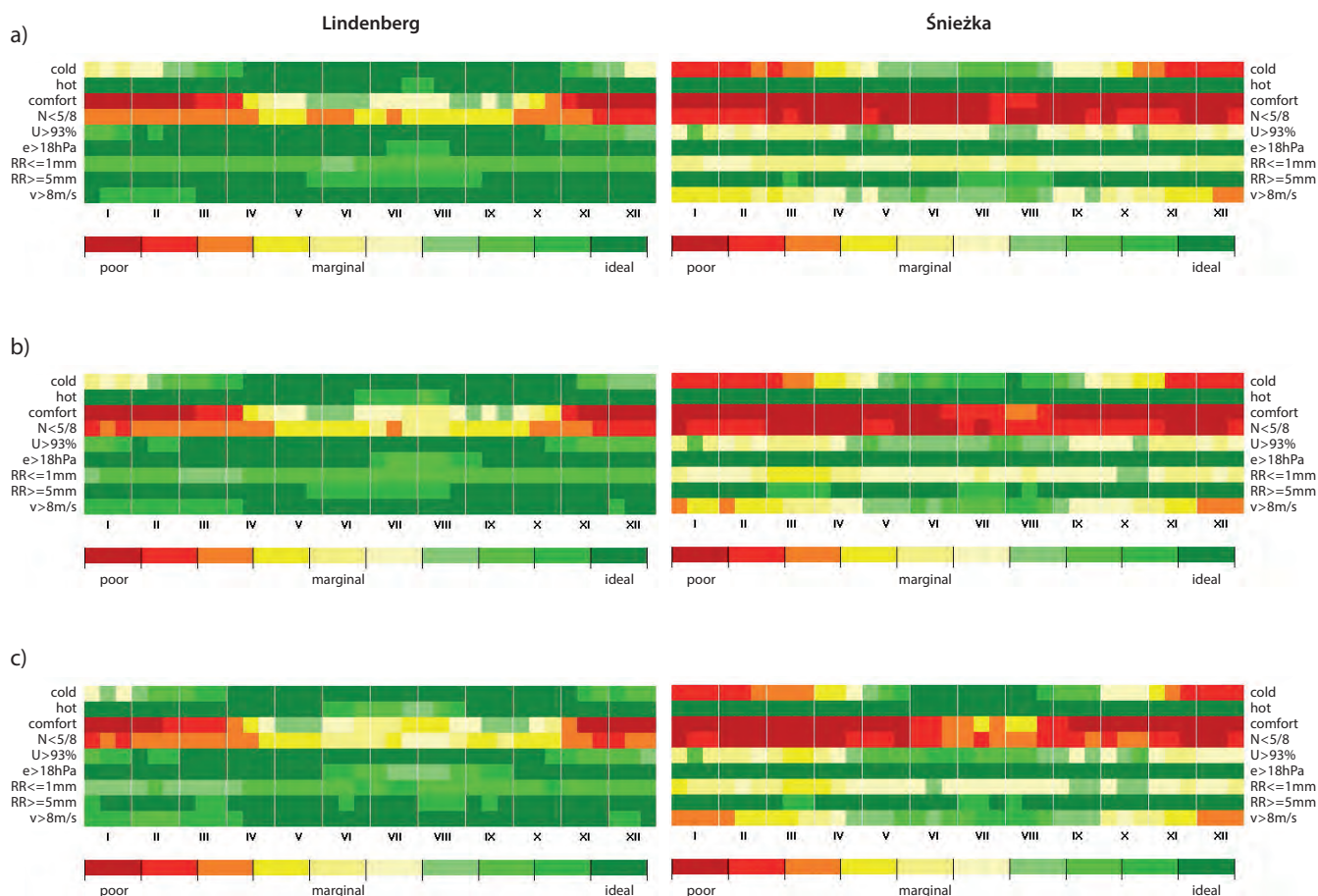


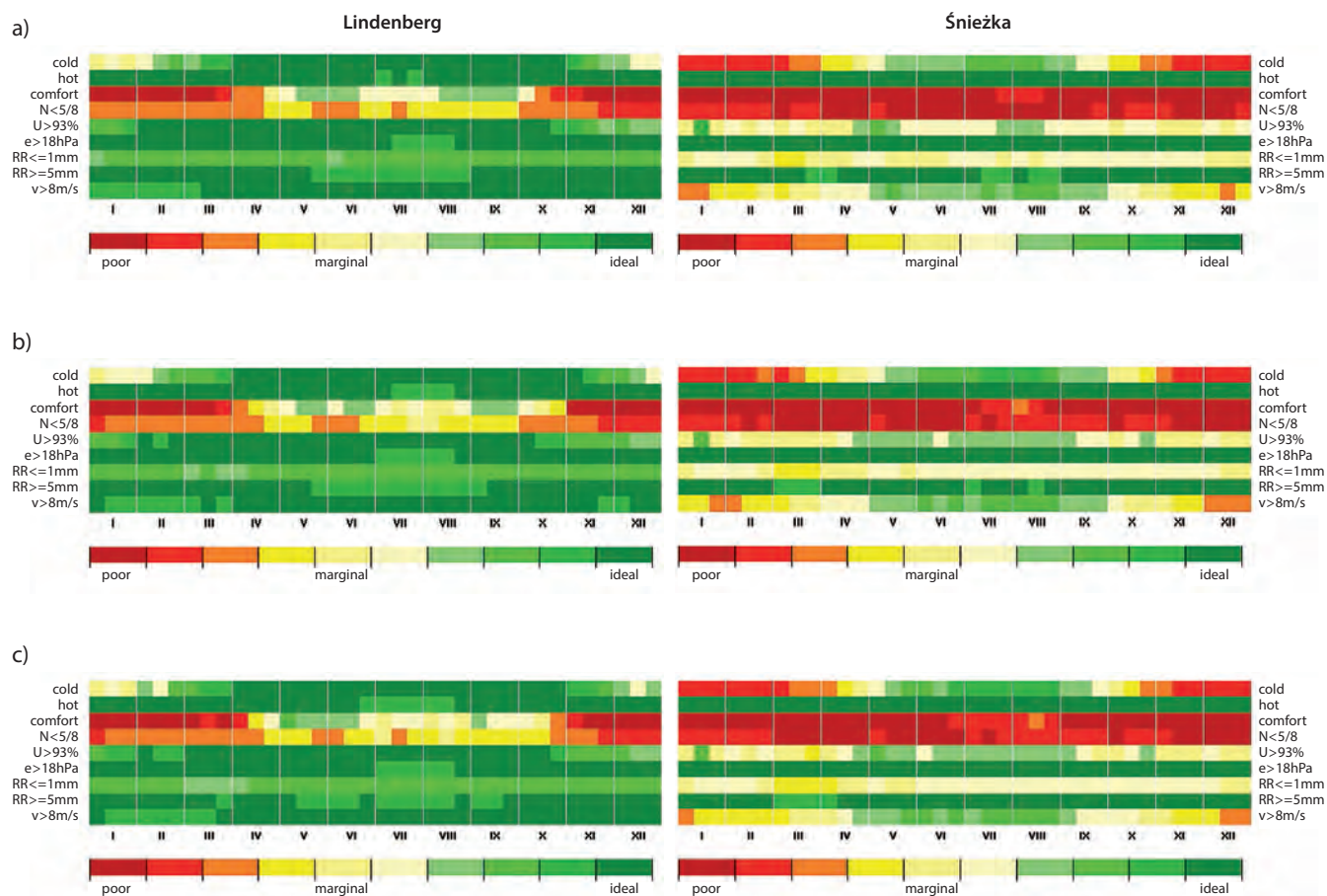
Użyteczność warunków pogodowych określana w oparciu o scenariusz RCP2.6 jest porównywalna jak w przypadku scenariuszy A1B i RCP8.5. W niżej położonych regionach najlepsze warunki będą obserwowane w półroczu chłodnym, natomiast miesiące letnie będą odznaczały się znacznym spadkiem WSI dla bliższej i dalszej przyszłości. Jednakże prognozuje się, że wartości WSI dla okresu lata nie spadną do przedziału „warunków umiarkowanie korzystnych”, jak w przypadku dwóch innych scenariuszy, a wciąż będą odpowiadać „warunkom korzystnym”. W przypadku obszarów górskich, warunki prognozowane przy uwzględnieniu scenariusza RCP2.6 nie odbiegają znacząco od wyników otrzymanych na podstawie scenariuszy A1B i RCP8.5.

Diagram informacji klimatyczno-turystycznej (CTIS) Diagram informacji klimatyczno-turystycznej (CTIS) został opracowany dla stacji Lindenberg i Śnieżka, jako obszarów reprezentujących odpowiednio regiony nizinne i górskie.

W przypadku scenariuszy A1B i RCP8.5 dla Śnieżki, warunki biotermiczne będą odznaczały się brakiem występowania stresu gorąca (Ryc. 32 i 34). W przypadku stresu zimna najlepsze warunki w szczytowej części gór będą obserwowane w lecie, z uwagi na stosunkowo wysoką temperaturę powietrza oraz niskie wartości wilgotności, prędkości wiatru, zachmurzenia i zmniejszoną liczbę dni z opadem. W regionach górskich, w bliższej i dalszej przyszłości spodziewany jest wzrost użyteczności pogody dla turystyki w półroczu ciepły, w porównaniu do lat 1971 – 2000. Okres z dobrymi warunkami pogodowymi może w przyszłości trwać dłużej, a dla sezonu letniego prognozowany jest znaczący spadek częstości występowania stresu zimna. W szczytowej strefie gór, w lipcu i sierpniu prognozowany jest znaczny wzrost dni z komfortem termicznym zarówno dla bliższej jak i dalszej przyszłości. Podobna tendencja jest obserwowana również w niższych regionach górskich (np. Zinnwald). Zmiany warunków biotermicznych są również symulowane dla obszarów nizinnych, jednakże odznaczają się one mniejszym zakresem zmian niż obszary górskie.

Ryc. 32
CTIS dla Lindenbergu (po lewej) i Śnieżki (po prawej) dla scenariusza A1B, na podstawie projekcji; od góry: a) okres referencyjny, dane z modelu (1971 – 2000); b) bliższa przyszłość (2021 – 2050); c) dalsza przyszłość (2071 – 2100) (objaśnienia kryteriów: cold – stres zimna, hot – stres gorąca, comfort – warunki termoneutralne, N < 5/8 – zachmurzenie mniejsze niż 5/8, U > 93% – wilgotność względna większa niż 93%, e > 18hPa – dni parne, RR <= 1mm – dni suche, RR > 5mm – dni wilgotne, v > 8m/s – dni wietrzne poor – warunki niekorzystne, marginal – warunki przeciętne, ideal – warunki korzystne)





Ryc. 33

CTIS dla Lindenbergu (po lewej) i Śnieżki (po prawej) dla: a) okresu referencyjnego, dane z modelu (1971 – 2000), b) bliższej (2021 – 2050) i c) dalszej (2071 – 2100) przyszłości dla scenariusza RCP2.6 (objaśnienia kryteriów – patrz. ryc. 32)

W okresach przyszłych, zarówno dla stacji górskich jak i nizinnych, spodziewany jest wzrost liczby dni z małym zachmurzeniem. Dotyczy to zwłaszcza sezonu letniego, aczkolwiek wzrost ich frekwencji przewidywany jest również dla okresu jesiennego. Ocenia się, że w przyszłości sytuacje pogodowe z małym zachmurzeniem będą pojawiać się podczas 30 % dni na Śnieżce i ponad 50 % w Lindenbergu. Korzystna tendencja jest również symulowana dla wilgotności względnej powietrza, zwłaszcza w sezonie letnim na Śnieżce, gdzie spodziewany jest spadek liczby dni z dużymi wartościami wilgotności względnej powietrza. W przypadku dni parnych, podobnie jak w okresie referencyjnym, przewidywany jest brak ich występowania w szczytowej części gór. W regionach nizinnych liczba dni parnych w okresie letnim może wzrosnąć, nie są przewidywane natomiast znaczące zmiany w zakresie warunków dotyczących wilgotności względnej powietrza. W kontekście warunków opadowych (dni suche z $RR \leq 1\text{mm}$) spodziewany jest nieznaczny

wzrost użyteczności pogody dla turystyki. W górach częstość dni suchych może wzrosnąć głównie w okresie marzec-kwiecień i wrzesień-październik, podczas gdy w niższych partiach wzrost ten prognozowany jest na marzec i początek czerwca. W dalszej przyszłości ich częstość może również dodatkowo zwiększyć się w drugiej dekadzie czerwca (Śnieżka) oraz w sezonie letnim i październiku (Lindenberg). Na nizinach wzrost ten może być również odnotowany w miesiącach zimowych. W przypadku dni wilgotnych ($RR > 5\text{mm}$) dla okresu referencyjnego notowane są dość dobre warunki pogodowe w odniesieniu do turystyki. W bliższej i dalszej przyszłości dla obszarów górskich większe zmiany w tym zakresie nie są przewidywane. Na nizinach (Lindenberg) częstość dni wilgotnych może się zwiększyć w latach 2071 – 2100, zwłaszcza w lipcu i sierpniu. Specyficzna tendencja jest natomiast spodziewana w przypadku warunków wietrznych. Na podstawie projekcji można stwierdzić, że w przyszłości w sezonie letnim częstość dni

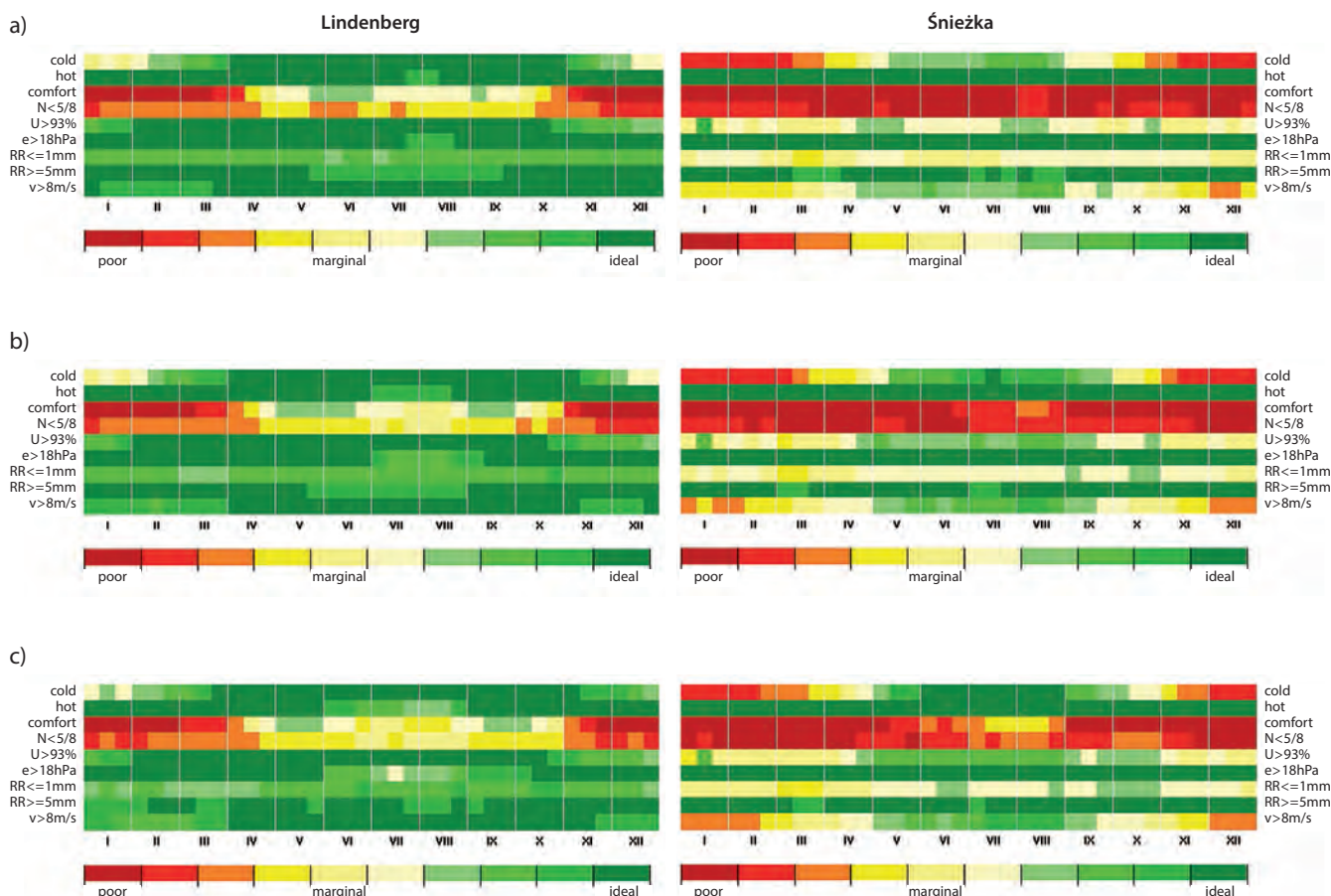


wietrznych może nieco się zmniejszyć, natomiast wzrost ich częstości spodziewany jest dla półroczia chłodnego, zwłaszcza dla miesięcy zimowych.

Podobną do omówionych strukturą cechuje się również diagram CTIS dla scenariusza RCP2.6 (Ryc. 33). W tym przypadku jednak zmiany poszczególnych jego składowych, zwłaszcza dla gór, zarówno dla bliższej jak i dalszej przyszłości, odznaczają się mniejszą intensywnością w porównaniu do scenariuszy A1B i RCP8.5. W przyszłości spodziewany jest wzrost użyteczności pogody dla turystyki pod względem warunków biotermicznych, dni z małym zachmurzeniem oraz dni suchych. W przypadku niektórych elementów (np. prędkość wiatru w zimie) największe zmiany są przewidywane dla bliższej przyszłości, podczas gdy dla dalszej przyszłości prognozowane są warunki zbliżone do obecnie występujących.

Przedstawione na diagramach CTIS charakterystyki użyteczności warunków pogodowych dla turystyki i rekreacji wykazują na ich zróżnicowanie przestrzenne oraz czasowe. Największe różnice pomiędzy szczytową strefą gór a nizinami będą notowane dla warunków biotermicznych, w przypadku których dla obszarów górskich spodziewane jest ich polepszenie w aspekcie oddziaływania na organizm człowieka. W regionach nizinnych nastąpić może jednak ich pogorszenie, związane ze wzrostem częstości dni ze stresem gorąca i równoczesnym spadkiem frekwencji dni z warunkami termoneutralnymi w okresie lata. Należy również zaznaczyć, że w świetle większości elementów uwzględnionych w CTIS, większa intensywność zmian w przyszłości jest prognozowana dla obszarów górskich.

Ryc. 34
 CTIS dla Lindenbergu (po lewej) i Śnieżki (po prawej) dla a) okresu referencyjnego, dane z modelu (1971 – 2000), b) bliższej (2021 – 2050) i c) dalszej (2071 – 2100) przyszłości dla scenariusza RCP8.5 (objaśnienia kryteriów – patrz. ryc. 32)



Podsumowanie

Temperatura powietrza

Na podstawie projekcji klimatu można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że notowany obecnie trend ocieplenia w regionie granicznym Polski i Saksonii będzie również obserwowany w przyszłości. Pomimo tego, że nie ma dużego zróżnicowania pomiędzy poszczególnymi scenariuszami w połowie XXI w., to ocenia się, że w końcu stulecia, w porównaniu do lat 1971 – 2000, temperatura powietrza może wzrosnąć o +1 do +4°C.

Analizy dla poszczególnych pór roku wykazują silny trend rosnący temperatury powietrza w okresie lata, jesieni i zimy. Natomiast dla wiosny, w przeciwieństwie do wyników dla lat 1971 – 2010, przewidywany jest łagodny trend ocieplający. Analizy przestrzenne pokazują również, że obszary górskie wraz z ich strefą szczytową będą się charakteryzowały nieco silniejszym, w porównaniu do nizin, trendem wzrostowym temperatury powietrza w horyzoncie czasowym na koniec XXI wieku.

Charakterystyki oparte na wskaźnikach termicznych, takich jak liczba dni upalnych i gorących, pokazują, że możliwy jest wzrost ich częstości. W przypadku nizin spodziewany jest wzrost dni gorących o 13 – 23 dni w ciągu roku. Pod koniec obecnego stulecia, w świetle scenariuszy A1B i RCP8.5, sygnał zmian może ulec dwukrotnemu zwiększeniu w porównaniu do okresu 2021 – 2050. Jeśli zostanie osiągnięty cel „dwóch stopni” zakładany przez scenariusz RCP2.6, wówczas należy spodziewać się mniejszych zmian wartości temperatury powietrza. W przypadku dni przymrozkowych prognozowany jest spadek ich częstości. W szczytowej części gór, dla okresu 2071 – 2100, spodziewany jest spadek dni mroźnych o 17 – 56 dni. Jest to istotne zwłaszcza dla uprawiania sportów zimowych, w przypadku których tego typu zmiany mogą przynieść negatywne skutki.

Agroklimat

Podsumowując należy stwierdzić, że trzy uwzględnione scenariusze zmian klimatu, zakładają stopniowy wzrost wielkości wskaźnika GDD i SAT do końca XXI w., choć ta tendencja nieco słabnie w dwóch, trzech ostatnich dekadach. Poszczególne scenariusze różnią się między sobą skalą tych wzrostów. Zakładając zrównoważony rozwój wszystkich dostępnych dzisiaj źródeł energii i nie uwzględniając bieżących i przyszłych ograniczeń w emisji gazów cieplarnianych (scenariusz SRES A1B), należy spodziewać się największych zmian. Z kolei przyjmując wielkość wymuszenia radia-

cyjnego przez gazy cieplarniane w roku 2100 na poziomie 2,6 W/m², wielkość analizowanych wskaźników zmieni się w najmniejszym stopniu. Warto tutaj także zwrócić uwagę na odwrotną tendencję, która zaznaczyła się na przykładzie omawianego wskaźnika SAT. Dotyczy ona większych wzrostów wartości SAT na obszarach górskich niż na nizinie, co wiąże się z wzrastającą częstością przekraczania prognozy średniej dobowej temperatury powietrza > 10°C. Wpływ na to ma zapewne skracanie się sezonu zimowego i wydłużanie termicznej wiosny i jesieni (DEMIDOWICZ i in. 1999; EEA, 2012; MICHALSKA 2011; MIGAŁA 2005, KĘDZIORA 2008; ŻMUDZKA 2012). Analiza rozkładu przestrzennego wskaźnika Sieliana HTc wykazała konsekwentną tendencję do wzrostu ryzyka suszy, tym większą im większe jest zakładane wymuszenie radiacyjne w ramach danego scenariusza i im bardziej odległy jest jego horyzont czasowy.

Przedstawione zmiany będą miały swoje bezpośrednie i pośrednie konsekwencje w produkcji roślinnej (NIERÓBCA, 2009; ŻMUDZKA, 2012):

- wprowadzanie nowych odmian roślin uprawnych lub poszerzenie różnorodności gatunkowej;
- wprowadzanie roślin o większych wymaganiach cieplnych (np. soja, proso, winorośl) i poszerzanie areалу upraw;
- wcześniejsze zasiewy roślin oraz wcześniejsze rozpoczynanie prac agrotechnicznych;
- uprawy międzyplonów i poplonów ścierniskowych;
- zmniejszanie produktywności niektórych upraw z powodu stresu gorąca oraz niekorzystnego bilansu wodnego;
- rozwój chwastów ciepłolubnych oraz szkodników i chorób roślin.

Bioklimat

Warunki bioklimatyczne regionu projektu KLAPS odznaczają się znacznym zróżnicowaniem czasowym i przestrzennym.

Na podstawie trzech scenariuszy zmian klimatu uwzględnionych w projekcie (A1B, RCP8.5, RCP2.6), w regionie projektu KLAPS spodziewana jest duża zmienność warunków bioklimatycznych. Wyniki otrzymane w oparciu o scenariusze A1B i RCP8.5 charakteryzują się dużym podobieństwem dla okresów bliższej (2021 – 2050) i dalszej przyszłości (2071 – 2100). Jednakże przewidywane zmiany mogą w konsekwencji spowodować również zmianę użyteczności pogody dla turystyki. W regi-



onach nizinnych spodziewany jest wzrost częstości dni ze stresem gorąca, spowodowany przede wszystkim wzrostem temperatury powietrza. Może to spowodować pogorszenie się warunków pogodowych dla różnych form klimatoterapii, turystyki i rekreacji, zwłaszcza w półroczu ciepłym. Dla obszaru gór prognozowana jest większa liczba dni z warunkami termoneutralnymi, przy zmniejszeniu częstości dni ze stresem zimna. Może to przyczynić się do wzrostu użyteczności warunków pogodowych dla turystyki, zwłaszcza podczas lata (wartości wskaźniki WSI oraz CTIS). Natomiast w okresie zimowym, w obszarach górskich, gdzie najważniejszym elementem oddziałującym na użyteczność pogody dla turystyki, a tym samym na funkcjonowanie ośrodków narciarskich, jest pokrywa śnieżna, można się spodziewać, że wzrost temperatury powietrza spowoduje zmniejszenie wysokości i długości czasu występowania pokrywy śnieżnej w regionie. Sytuacja taka skłania do podjęcia działań adaptacyjnych m.in. skierowanych na podjęcie innych form aktywności, niezależnych od warunków śnieżnych.

Warunki bioklimatyczne określone na podstawie scenariusza RCP2.6 odznaczają się dość dużymi różnicami w porównaniu do otrzymanych na podstawie scenariuszy A1B i RCP8.5. Zmiany warunków bioklimatycznych będą charakteryzowały się mniejszą intensywnością, co w przypadku realizacji tego scenariusza nie powinno spowodować znaczącego wpływu na użyteczności warunków pogodowych dla klimatoterapii, turystyki i rekreacji.



B

Modelowanie zanieczyszczeń powietrza





Wprowadzenie do zagadnień modelowania zanieczyszczeń

Modele transportu zanieczyszczeń są bardzo pożytecznymi narzędziami wspomagającymi ocenę stanu jakości powietrza na danym obszarze. Są one używane zarówno w badaniach naukowych, jak i zarządzaniu środowiskiem. Modele dostarczają podstawową informację o składzie chemicznym atmosfery: ile zanieczyszczeń znajduje się w powietrzu atmosferycznym (stężenie zanieczyszczeń w atmosferze) oraz jaka ilość zanieczyszczeń została z niego usunięta i zdeponowana w ekosystemach. Depozycja zanieczyszczeń, która zachodzi na powierzchni receptorów, może przebiegać przy współdziałaniu hydrometeorów, np. deszczu (mokra depozycja) jak i bez ich udziału, jako tzw. sucha depozycja.

Przestrzenna informacja o stężeniach i depozycji zanieczyszczeń atmosferycznych jest bardzo ważna do określenia zagrożenia dla ekosystemów. W projekcie KLAPS szczególny nacisk jest położony na związki siarki (S) i azotu (N). Obydwa zanieczyszczenia mogą mieć istotne negatywne skutki środowiskowe. Wysoka depozycja związków siarki i azotu może prowadzić do zakwaszenia ekosystemów. Negatywne skutki tego zjawiska są obserwowane w obszarze objętym projektem KLAPS od lat siedemdziesiątych XX wieku. Z powodu intensywnej eksploatacji i spalania węgla brunatnego oraz rozwiniętego przemysłu chemicznego, obszar ten był nazywany Czarnym Trójkątem, ze znacznymi obszarami lasów uszkodzonych lub wymarłych, np. w Karkonoszach, z powodu zakwaszenia. Po roku 1990 nastąpiła znaczna redukcja emisji ze spalania węgla. Jej powodem były m.in. zmiany w świadomości ekologicznej, ale także zmiany polityczne i ekonomiczne w Europie Środkowej. Ograniczenie emisji dotyczyło szczególnie siarki i, w mniejszym wymiarze, tlenków azotu (NO_x).

Depozycja azotu do ekosystemów może prowadzić do eutrofizacji i zmian składu gatunkowego, z dużą konkurencją ze strony gatunków inwazyjnych. To może prowadzić do utraty bioróżnorodności. Azot do ekosystemów dostaje się w dwóch formach, jako tlenki azotu i azot amonowy (NH_x). Głównym źródłem NO_x jest spalanie paliw, zarówno w przemyśle, źródłach komunalno-bytowych, jak i transporcie. W przypadku NH_x , główne źródło to emisja amoniaku (NH_3), za który odpowiedzialne jest głównie rolnictwo. W ostatnich dekadach obserwowane jest zmniejszenie emisji tlenków azotu. Z kolei emisja amoniaku pozostaje na mniej więcej

stałym poziomie, i staje się głównym czynnikiem eutrofizującym w różnych regionach Europy, np. w Wielkiej Brytanii czy w Holandii (ASMAN et al. 1998, FLETCHARD et al. 2011).

Głównym celem tej części pracy jest przygotowanie informacji o przestrzennej i czasowej zmienności depozycji związków siarki i azotu na obszarze objętym projektem KLAPS. Głównym narzędziem badawczym jest model Fine Resolution Atmospheric Multi-pollutant Exchange (FRAME). Model został skonfigurowany tak, aby dostarczyć informację o historycznej, aktualnej i przyszłej depozycji związków siarki i azotu w wysokiej rozdzielczości przestrzennej 1 km x 1 km. Wyniki pracy modelu FRAME zostały użyte do obliczenia przekroczeń ładunków krytycznych zakwaszenia i eutrofizacji (część C raportu).



Ryc. 35

Las w Karkonoszach zniszczony w wyniku nadmiernej depozycji związków zakwaszających (autor: MAREK BŁAS, 2.10.2013)

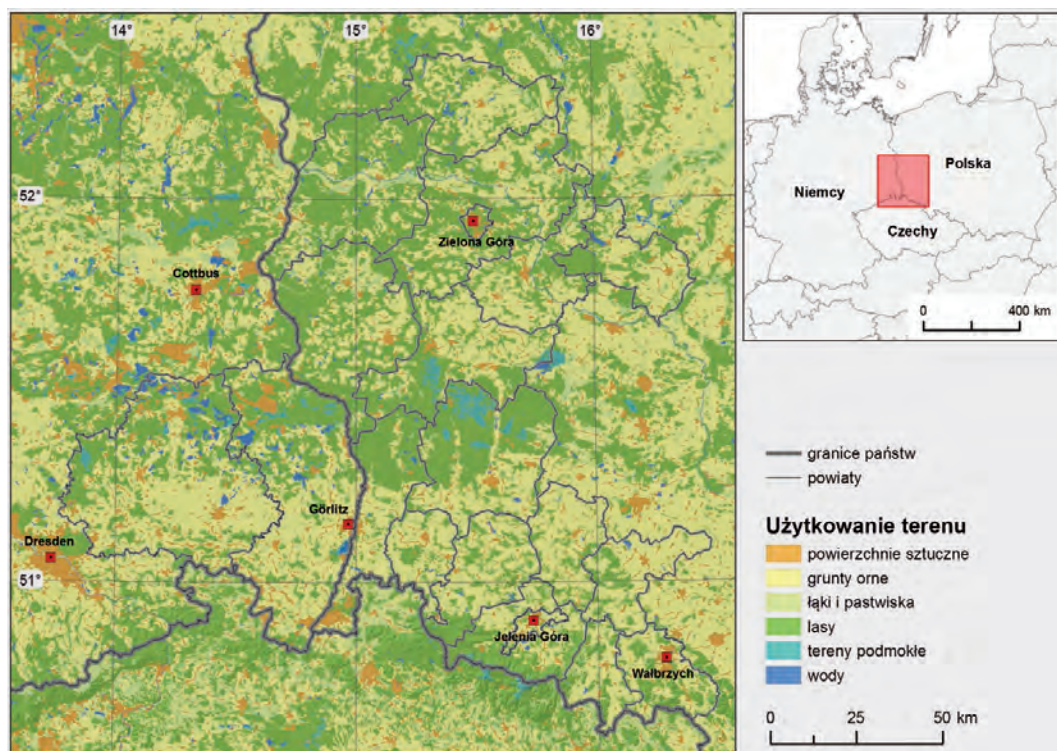
Dane i metody

Model FRAME

Regionalny model transportu zanieczyszczeń FRAME dostarcza informacji o średniorocznych stężeniach i rocznej depozycji związków siarki i azotu. Główne zalety modelu FRAME to wysoka rozdzielczość przestrzenna (1 km x 1 km) i pionowa, dobra zgodność modelowanych stężeń i depozycji z obserwacjami oraz relatywnie niskie koszty obliczeniowe. Szczegółowy opis modelu FRAME zawierają prace SINGLES et al. (1998), FOURNIER et al. (2004) oraz DORE et al. (2006). Szczegóły dotyczące konfiguracji modelu dla Polski znajdują się w pracach KRYZY et al. (2010, 2012). FRAME jest statystycznym modelem typu Lagrangea, opisującym

Ryc. 36

Domena modelu FRAME dla projektu KLAPS i klasy użytkowania terenu zastosowane w modelu



główne procesy atmosferyczne zachodzące w kolumnie powietrza poruszającej się wzdłuż prostoliniowych trajektorii, wyznaczonych dla wybranych kierunków wiatru. Model w pionie ma 33 warstwy o zmiennej miąższości, zmieniającej się od 1m przy powierzchni gruntu do 100m przy górnej granicy domeny modelu. Trajektorie są wyznaczone co 1° , z wykorzystaniem róży prędkości i kierunku wiatru. Dyfuzja pionowa gazów i aerozoli jest opisana z wykorzystaniem teorii K i rozwiązywana z wykorzystaniem metody objętości skończonych. Dyfuzja pionowa (K_z) rośnie liniowo do określonej wysokości (H_z), powyżej której pozostaje stała (K_{max}) do górnej granicy warstwy granicznej. W ciągu dnia H_z jest określona na 200m a K_{max} jest funkcją miąższości warstwy granicznej i prędkości wiatru geostroficznego. W nocy, wielkości zależą od klas stabilności Pasquilla. Schemat chemiczny modelu jest zbliżony do używanego w Lagrangeowskim modelu EMEP (The European Monitoring and Evaluation Programme; BARRET and SELAND, 1995). Schemat chemiczny uwzględnia przemiany w fazie gazowej i wodnej utlenionej siarki i azotu oraz konwersję NH_3 do siarczanu amonowego i azotanu amonowego (aerozole).

Sucha depozycja jest określana poprzez prędkości depozycji (V_d), przypisanym indywidualnie

różnym klasom użytkowania terenu i związkom chemicznym. Mokra depozycja jest obliczana z zastosowaniem współczynników wymywania i podejścia określonego jako „constant drizzle”, z wykorzystaniem informacji o rocznej sumie opadu. Mokra depozycja jest określana dla całej objętości hipotetycznej kolumny powietrza, przy założeniu że cały opad ma charakter deszczu. W modelu nie ma rozróżnienia między wymywaniem wewnątrz i podchmurowym, i używana jest jedna wartość wskaźnika wymywania Δ_i . Współczynnik wymywania λ_i jest obliczony na podstawie Δ_i , intensywności opadów atmosferycznych i miąższości warstwy mieszania. Model uwzględni zwiększone wymywanie zanieczyszczeń nad obszarami górskimi, wynikające z efektu seeder-feeder. Współczynnik wymywania dla opadu orograficznego jest dwukrotnie większy, niż dla opadu nieorograficznego (DORE et al. 1992). Stężenia aerozoli na brzegach domeny modelu są obliczone z zastosowaniem modelu FRAME-Europe. FRAME-Europe pracuje dla całej Europy w oparciu o siatkę 50 km x 50 km.

W niniejszej pracy zastosowano model FRAME w wersji 9.9, pracujący w siatce 1 km x 1 km. Domena modelu miała wielkość 215 x 210 gridów a całkowita liczba 1km oczek siatki wynosiła 45150. Siatka



obliczeniowa została zdefiniowana w oparciu o układ współrzędnych UTM, strefa 33. Informacja o użytkowaniu terenu została pobrana z bazy danych Corine Land Cover 2006, której źródłowa rozdzielczość przestrzenna wynosiła 250 x 250 m. Wykorzystanie bazy danych Corine zapewniło homogeniczną informację o użytkowaniu terenu w całej domenie FRAME. Wszystkie zrealizowane symulacje są podsumowane w następnym rozdziale. W sposób specjalny potraktowano symulację dla roku 2010, która w niniejszym projekcie jest symulacją bazową. Dla tej symulacji, zrealizowanej w oparciu o emisję i dane meteorologiczne dla roku 2010, wyniki pracy FRAME zostały zweryfikowane przez porównanie z pomiarami stężeń i depozycji zanieczyszczeń oraz z wynikami pracy modelu EMEP oraz szacunkami mokrej depozycji przygotowanymi przez IMGW-PIB.

Dane wejściowe do modelu FRAME

Dane emisyjne

Przygotowanie homogenicznej bazy danych emisyjnych jest dużym wyzwaniem w tego typu transgranicznych projektach. W projekcie KLAPS przygotowano wspólną inwentaryzację emisji dla całego obszaru projektu. Baza danych opiera się na oficjalnych danych o emisji dla Saksonii i Brandenburgii, a dla Polski wykorzystano dane przygotowane zgodnie z metodyką opracowaną przez KRYŻĘ et al. (2010). Różnice w podejściach do inwentaryzacji emisji mogą w znaczącym stopniu wpływać na uzyskane wyniki modelowania i z tego względu

interpretacja uzyskanych wyników powinna być robiona krytycznie.

Inwentaryzacja emisji, przygotowana dla całego obszaru objętego projektem KLAPS, jest oparta o klasyfikację SNAP (Standardized Nomenclature for Air Pollutants, EEA 2013). Zarówno dla Polski, jak i Saksonii, wykorzystano gridową informację (siatka 1 km x 1 km) o emisji z głównych sektorów SNAP: 2 (źródła komunalno-bytowe), 7 (transport drogowy), 8 (pozostały transport) i 10 (rolnictwo). Dla pozostałych sektorów SNAP do modelowania włączono emisję z głównych emitorów punktowych. Szczegółową informacją o emisji ze źródeł punktowych dysponowano także dla Brandenburgii i została ona w niniejszym projekcie wykorzystana. Dla większości emitorów punktowych wykorzystano dane o parametrach technicznych emitorów (wysokość i średnica komin, prędkość i temperatura gazów wylotowych). W oparciu o taką informację model FRAME wylicza dodatkowy wznios zanieczyszczeń. Dla pozostałych obszarów domeny (obszary Niemiec i Czech) wykorzystana została europejska inwentaryzacja emisji opracowana przez TNO (KUENEN et al. 2011).

Dla obszaru Polski inwentaryzacja dla emitorów obszarowych, dostępna w formie siatki gridowej 1 km x 1 km, została przygotowana z zastosowaniem podejścia top-down (KRYŻA et al. 2010) i jest podsumowana w tabeli 11. Punktem wyjścia była

Tabela 11
Podsumowanie inwentaryzacji emisji dla Polski wg raportu KASHUE (KOBIZE 2012), udział sektora w całkowitej emisji krajowej oraz część emisji włączona do modelowania z FRAME

SNAP	SO ₂			NO _x			NH ₃		
	[Gg]	% całkowita emisja	% emisja włączona do modelu	[Gg]	% całkowita emisja	% emisja włączona do modelu	[Gg]	% całkowita emisja	% emisja włączona do modelu
01 sektor produkcji i transformacji energii	509.9	52.4	86	287.3	33.1	86	-	-	-
02 sektor komunalno-bytowy	269.0	27.6	100	100.3	11.6	100	0.5	0.2	100
03 przemysł	188.5	19.4	86	97.1	11.2	86	-	-	-
04 procesy produkcyjne	4.3	0.4	86	6.9	0.8	86	0.9	0.3	0
05 wydobycie i dystrybucja paliw kopalnych	-	-	-	-	-	-	-	-	-
06 zastosowanie rozpuszczalników i innych produktów	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0
07 transport drogowy	1.3	0.1	100	272.7	31.5	100	0.8	0.3	100
08 inne pojazdy i urządzenia	0.6	0.1	100	100.3	11.6	63	0.0	0.0	0
09 zagospodarowanie odpadów	0.07	0.0	0	2.1	0.2	0	3.2	1.2	0
10 rolnictwo	-	-	-	-	-	-	265.5	98.0	100
11 inne źródła emisji i pochłaniania zanieczyszczeń									
suma	973.67	100		866.7	100		270.9	100	

tu informacja o całkowitej krajowej emisji zanieczyszczeń z poszczególnych sektorów SNAP. Całkowita krajowa emisja w kolejnym kroku była dzielona na mniejsze jednostki administracyjne z wykorzystaniem różnych danych aproksymujących. Dane aproksymujące były zależne od sektora emisji SNAP. Dla sektora komunalno-bytowego (SNAP 2), wykorzystano informację o zużyciu węgla w województwach oraz kubaturze ogrzewanych budynków, liczbie mieszkańców i mapę użytkowania terenu. W przypadku sektora SNAP 7 wykorzystano informację o natężeniu ruchu na głównych drogach. W przypadku rolnictwa (SNAP 10), skorzystano z informacji o zużyciu nawozów, pogłowiu zwierząt i z mapy użytkowania terenu. Z zastosowaniem tej metodyki możliwe było uzyskanie informacji przestrzennej o emisji zanieczyszczeń w relatywnie wysokiej rozdzielczości przestrzennej, przy jednoczesnym zachowaniu zgodności, co do masy emitowanych zanieczyszczeń, z oficjalną krajową inwentaryzacją opracowaną przez KOBIZE. Wcześniejsze testy, wykonane z modelem FRAME dla całej Polski wykazały dobrą zgodność modelowanych stężeń zanieczyszczeń z pomiarami, co potwierdziło skuteczność metody przygotowywania emisji.

Dla terenów Saksonii i Brandenburgii, które znajdują się w domenie modelu FRAME, zgromadzono dane emisyjne bezpośrednio z emitorów punktowych oraz źródeł liniowych. W przypadku pozosta-

łych źródeł obszarowych, zastosowana została metoda top-down. Podobnie jak w przypadku Polski, ocena emisji ze źródeł komunalno-bytowych została wykonana na podstawie zużycia energii, powierzchni zamieszkałych budynków oraz map użytkowania terenu. Emisja z rolnictwa (SNAP 10) została obliczona na podstawie pogłowia zwierząt hodowlanych, produkcji rolnej oraz użytkowania terenu. Podsumowanie emisji dla obszaru Saksonii znajduje się w tabeli 12.

Dla pozostałych obszarów Niemiec w domenie modelu FRAME, które nie były objęte inwentaryzacjami dla Saksonii i Brandenburgii, oraz dla obszaru Republiki Czeskiej wykorzystana została europejska inwentaryzacja przygotowana przez TNO w rozdzielczości przestrzennej 1/16 x 1/8°. Z powodu relatywnie niskiej rozdzielczości przestrzennej tej inwentaryzacji, oraz ze względu na fakt, że została ona tu wykorzystana jako informacja uzupełniająca, poza głównym obszarem badań, regiony dla których została ona użyta zostały wymaskowane z finalnych map prezentowanych poniżej.

Rycina 37 prezentuje całkowitą emisję związków siarki i azotu z emitorów powierzchniowych i liniowych (wykluczono obszary pokryte inwentaryzacją TNO), policzoną jako sumę sektorów SNAP 2 (źródła komunalno-bytowe), 7 (transport drogowy), 8 (pozostały transport) i 10 (rolnictwo). Dla pozosta-

Tabela 12

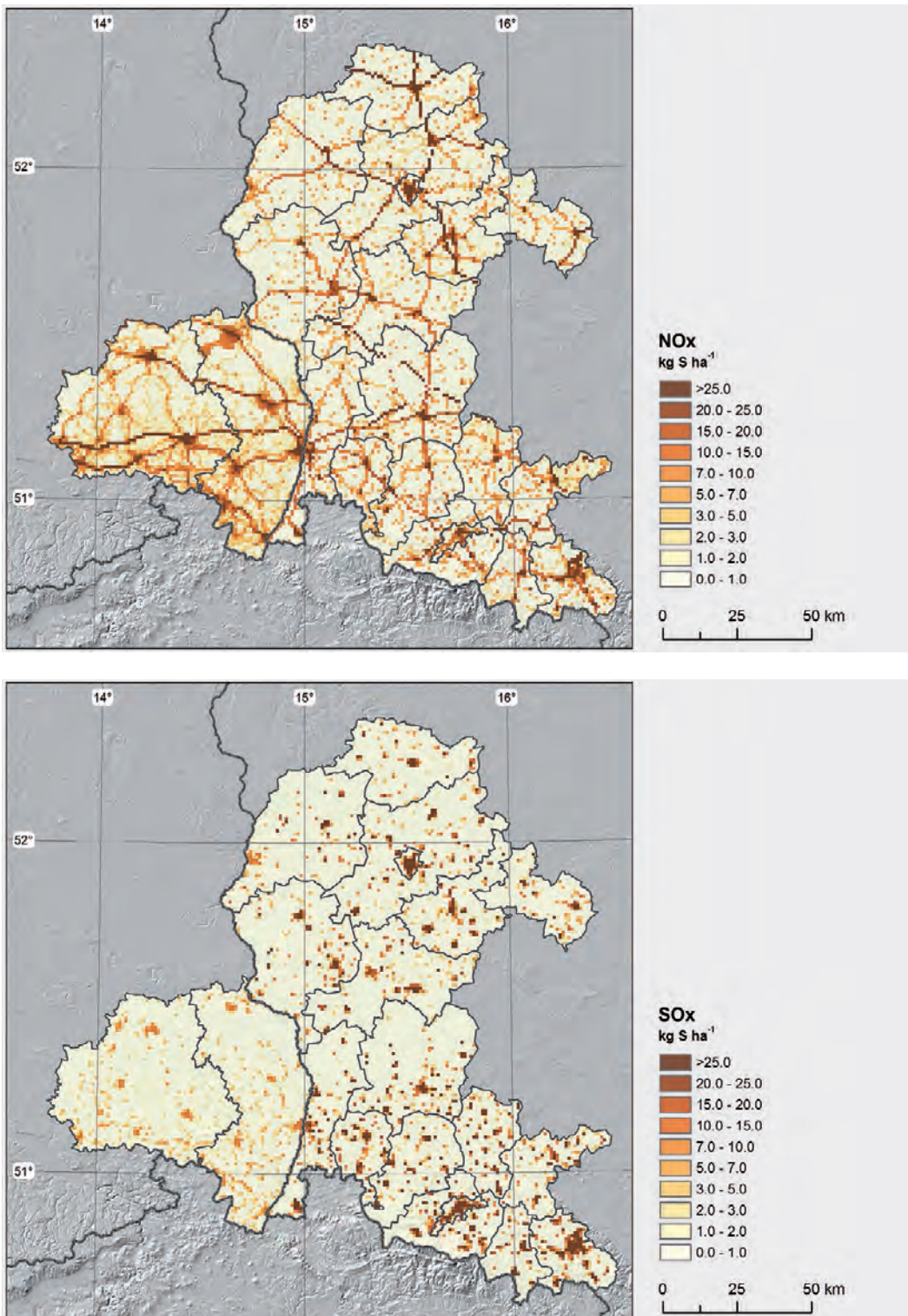
Podsumowanie inwentaryzacji emisji dla Saksonii dla roku 2010, udział sektora w całkowitej emisji i część emisji z danego sektora włączona do modelowania z FRAME 10

SNAP	SO ₂			NO _x			NH ₃		
	[Gg]	% całkowita emisja	% emisja włączona do modelu	[Gg]	% całkowita emisja	% emisja włączona do modelu	[Gg]	% całkowita emisja	% emisja włączona do modelu
01 sektor produkcji i transformacji energii	9.50	79.4	100	11.18	35.4	100	0.00	0.0	100
02 sektor komunalno-bytowy	1.49	12.4	100	2.58	8.2	100	-	-	0
03 przemysł	0.25	2.1	100	0.26	0.8	100	-	-	0
04 procesy produkcyjne	0.43	3.6	100	0.93	3.0	100	0.00	0.0	100
05 wydobywanie i dystrybucja paliw kopalnych	-	-	0	-	-	0	-	-	0
06 zastosowanie rozpuszczalników i innych produktów	0.03	0.2	100	0.09	0.3	100	0.00	0.0	100
07 transport drogowy	0.02	0.2	100	13.51	42.7	100	-	-	0
08 inne pojazdy i urządzenia	0.05	0.4	100	2.76	8.7	100	-	-	0,00
09 zagospodarowanie odpadów	0.01	0.1	100	0.20	0.6	100	0.00	0.0	100
10 rolnictwo	0.19	1.6	100	0.11	0.4	100	7.05	99.9	100
11 inne źródła emisji i pochłaniania zanieczyszczeń	-	-	0	-	-	0	-	-	0
suma	11.96	100.0		31.62	100.0		7.06	100.0	



tych sektorów dane emisyjne były dostępne z indywidualnych emitatorów punktowych. Zauważalne są nieciągłości na granicy państw, które można przypisać dwóm czynnikom. Po pierwsze, istnieją regionalne różnice w samej strukturze emisji,

w szczególności w przypadku emisji ze źródeł komunalno-bytowych. W Polsce, ten sektor jest odpowiedzialny za przeszło 52% całkowitej emisji związków siarki w skali kraju (KOBIZE 2012), podczas gdy w Niemczech udział tego sektora to tylko 15%.



Ryc. 37

Emisja z emitatorów powierzchniowych tlenków azotu (lewa strona) i siarki dla roku 2010, wykorzystana w projekcie KLAPS i modelu FRAME

Tabela 13

Całkowita masa SO_2 , NO_x i NH_3 wyemitowana w domenie projektu KLAPS w roku 2010

	$\text{SO}_2 - \text{S}$	$\text{NO}_x - \text{N}$	$\text{NH}_3 - \text{N}$
Niemcy	22.83	50.89	12.26
Polska	28.09	13.19	13.45
Republika Czeska	46.69	26.27	3.64
Domena projektu	97.61	90.34	29.35

To jest główną przyczyną wystąpienia wyraźnej nieciągłości na granicy państw. Po drugie, istotne różnice dotyczą samej metodyki opracowywania inwentaryzacji, co zostało przedstawione powyżej. Ten ostatni fakt wpływa na niepewność związaną z uzyskanymi wynikami.

Do modelowania z modelem FRAME potrzebna jest informacja o emisji związków siarki i azotu (utleniony i zredukowany). Dla roku bazowego 2010 informacja o emisji poszczególnych związków, jakie zostały wprowadzone do modelu, została podsumowana w tabeli 13. W analizowanej domenie modelu, w przypadku emisji SO_2 , największy udział ma Republika Czeska. W przypadku NO_x , największą całkowitą emisję mają Niemcy. W przypadku amoniaku, Polska dostarcza największą masę zanieczyszczeń w skali regionu. Należy tu jednak brać pod uwagę różnice w inwentaryzacjach emisji i luki, jakie w nich występują.

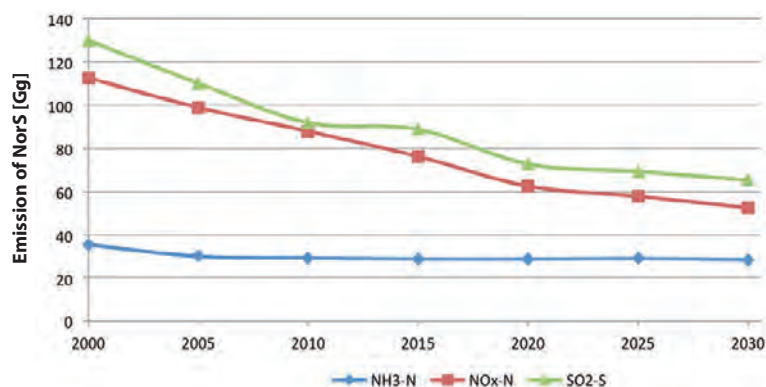
Celem niniejszego projektu jest, oprócz analizy aktualnych wielkości emisji i depozycji związków siarki i azotu, także określenie, jak zmieniały się te elementy w przeszłości i jak mogą zmienić się w przyszłości. W celu zrealizowania tych zadań przygotowano także inwentaryzacje emisji dla lat ubiegłych i przyszłych, oparte na współczyn-

nikach skalujących policzonych indywidualnie dla poszczególnych krajów i sektorów emisji. Emisja z roku bazowego 2010 została przeskalowana do lat 2005 i 2000, a współczynniki skalujące, policzone indywidualnie dla sektorów SNAP i krajów, zostały określone na podstawie bazy EMEP WebDAB (EMEP/CIEP 2014). Dla przyszłej emisji, obliczonej dla lat 2015–2030, emisja z roku 2010 została przeskalowana także z zastosowaniem współczynników dla indywidualnych sektorów SNAP i poszczególnych krajów, określonych na podstawie scenariusza emisji GAINS PRIMES (AMANN et al. 2011). Zmiany całkowitej masy emisji związków siarki i azotu w domenie projektu KLAPS, w całym okresie 2000–2030, są podsumowane na ryc. 38.

Od roku 2000 w domenie projektu KLAPS nastąpiła znaczna redukcja emisji związków siarki i tlenków azotu. Do roku 2030 spodziewana jest dalsza redukcja emisji SO_2 i NO_x (Ryc. 38). W przypadku emisji NH_3 niewielkie zmniejszenie emisji nastąpiło w okresie 2000–2010. W kolejnych latach spodziewane jest utrzymanie wielkości emisji NH_3 na poziomie zbliżonym do roku 2010 lub niewielki wzrost w roku 2030 (Ryc. 38). Wszystkie te zmiany mają istotne znaczenie na modelowaną, z wykorzystaniem FRAME, depozycję związków siarki i azotu.

Ryc. 38

Emisja SO_2 , NO_x i NH_3 w domenie KLAPS w okresie 2000–2030





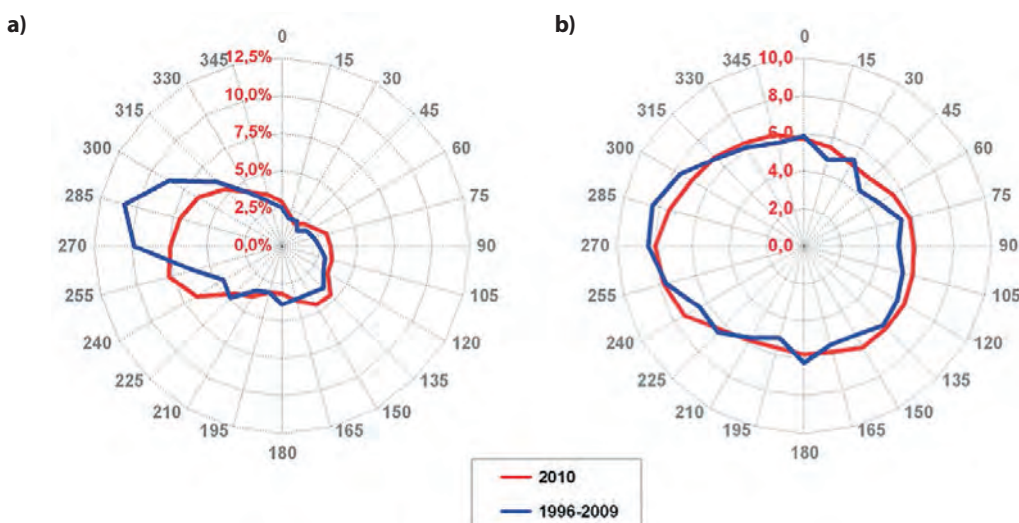
Dane meteorologiczne dla modelu FRAME

Model FRAME potrzebuje relatywnie prostej informacji meteorologicznej. Dane obligatoryjne to różnice prędkości i częstości wiatru oraz gridowa informacja o polu opadu atmosferycznego.

Dla symulacji zrealizowanych z modelem FRAME dla lat 2000–2010 wykorzystane zostały dane meteorologiczne przygotowane w oparciu o obserwacje dla właściwego roku. Różnice prędkości i kierunku wiatru zostały przygotowane w oparciu o dane z radiosondaży, zgodnie z metodyką zaproponowaną przez DORE et al. (2006). Wykorzystano pomiary ze stacji Wrocław, Praga oraz Lindenberg. Przykładowe różnice wiatru, dla roku 2010 i wielolecia 1996–2009, przedstawiono na ryc. 39. W roku 2010 stwierdzono niższą, w stosunku do wielolecia, częstość wiatru z kierunku zachodniego. Nieznacznie wyższą frekwencją, w stosunku do wielolecia, charakteryzowały się kierunki południowo-zachodnie. Rozkład prędkości wiatru, policzonych jako średnia harmoniczna, wykazuje duże podobieństwo dla roku 2010 i okresu 1996–2009.

Symulacje z modelem FRAME dla scenariuszy zmian klimatu korzystały ze stałych różnic wiatru, uzyskanych na podstawie danych z regionalnego modelu klimatu CLM. Były to informacje o średniej prędkości i częstości kierunku wiatru dla okresu 2001–2100. Przyczyną zastosowania stałej informacji o prędkości i kierunku wiatru była mała zmienność różnic wiatru stwierdzona dla różnych scenariuszy klimatu (SURKE et al. 2013).

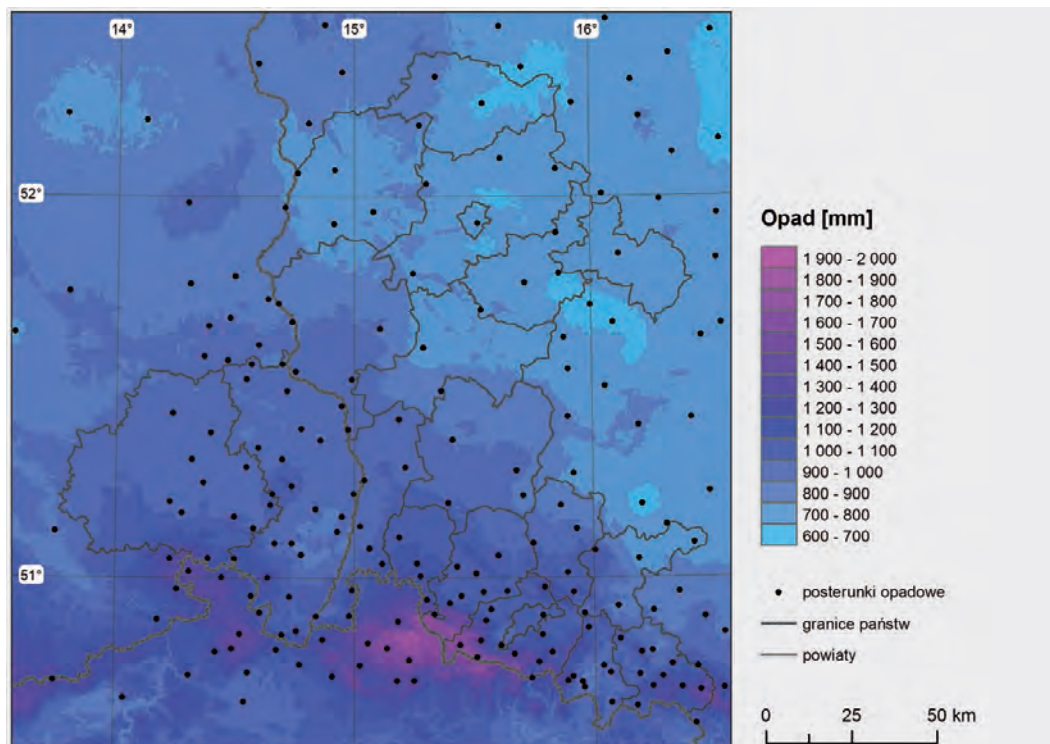
Ważną informacją wejściową dla modelu FRAME jest przestrzenna informacja o opadzie atmosferycznym. Wynika to z faktu, że mokra depozycja zanieczyszczeń, determinowana opadem atmosferycznym, jest odpowiedzialna za większą część masy deponowanych związków siarki i azotu. W niniejszym opracowaniu gridowa informacja o rocznym opadzie atmosferycznym została uzyskana poprzez interpolację danych pomiarowych lub wyliczonych na podstawie statystycznego downscalingu (dla scenariuszy zmian klimatu). Informacją wejściową do interpolacji były, dla każdego roku, dane z 210 stacji pomiarowych. Interpolację przeprowadzono korzystając z metody regresji ważonej geograficznie, w której jako dodatkową zmienną objaśniającą zastosowano wysokość n.p.m. (SZYMANOWSKI et al. 2013). Wynikową mapę, przedstawiającą pole opadu dla roku 2010, przedstawia rycina 40. Dla rozpatrywanych scenariuszy zmian klimatu A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5 opracowano w analogiczny sposób mapy pola opadu dla okresów 2021–2050 i 2071–2100.



Ryc. 39 Różnice średniej częstości wiatru (A) i średniej harmonicznej prędkości wiatru (B) dla domeny projektu dla lat 2010 i 1996–2009, przygotowane na podstawie radiosondaży (średnia z poziomów 850–950 hPa)

Ryc. 40

Roczna suma opadu w
domenie KLAPS w roku
2010



Weryfikacja wyników modelu FRAME

Model FRAME został po raz pierwszy zastosowany do analizowania stężeń i depozycji zanieczyszczeń dla tego obszaru geograficznego. Z tego powodu wykonano szczegółową ocenę uzyskiwanych wyników modelowania. Ocenę przeprowadzono na kilka sposobów, m.in. porównując bezpośrednio wyniki pracy modelu z dostępnymi pomiarami i przez porównanie wyników modelu FRAME z wynikami pracy innych modeli (EMEP i schematem interpolacyjnym stosowanym przez IMGW-PIB). Weryfikacja modelu FRAME została przeprowadzona dla roku bazowego 2010.

Porównanie FRAME z pomiarami mokrej depozycji zanieczyszczeń

Bazę danych do przeprowadzenia oceny mokrej depozycji zanieczyszczeń stanowiły sumy roczne wysokości opadów z sieci stacji z obszaru Niemiec (DWD), Republiki Czeskiej (CHMI) i Polski (IMGW-PIB), a ponadto sumy roczne ładunków wybranych substancji (pH, siarczany, związki azotu, chlorki) wprowadzanych wraz z opadem atmosferycznym mokrym oraz średnie ważone roczne stężenia substancji z sieci stacji zlokalizowanych w obszarze badań.

Wykorzystano dane z:

- Niemiec (DWD) – przekazane przez Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Referat Klima, Luftqualität in Dresden (10 stacji monitoringowych – tabela 14);
- Republiki Czeskiej (ČHMÚ), przekazane przez Český Hydrometeorologický ÚSTAV (7 stacji monitoringowych – tabela 14);
- Polski (właściciel danych IOŚ – Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, monitoring prowadzony przez IMGW O/Wrocław (9 stacji monitoringowych – tabela 14).

Pozyskano dane chemizmu opadów atmosferycznych z 26 stacji (Ryc. 41). W celu przedstawienia charakterystyk średnich depozycji poszczególnych substancji i ich stężeń wyodrębniony został okres badań monitoringowych z lat 1999–2011. Dla danych z tego okresu przeprowadzono analizę trendu zmian chemizmu opadów.

Wielkość depozycji substancji wprowadzanej z opadem atmosferycznym mokrym na daną powierzchnię terenu, obliczono jako iloczyn stężeń tej substancji zawartej w opadzie i jego wysokości, a średnie wartości stężeń badanych wskaźników



Ryc. 41
Sieć stacji pomiarowych dla chemizmu opadu

Stacja	Wysokość m npm	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	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabela 14
Stacje monitoringu chemizmu opadów atmosferycznych rejonu domeny projektu KLAPS (¹ – stacje pomiaru chemizmu, położone bezpośrednio w obszarze domeny lub w najbliższym sąsiedztwie z obszaru Niemiec (4 stacje), Republiki Czeskiej (3 stacje) i Polski (3 stacje))

opadów obliczano jako średnie ważone, gdzie wagą była wysokość opadu sumowana z cykli miesięcznych pomiarów w danym okresie uśredniania. Zdeponowane ilości substancji wraz z opadem atmosferycznym w latach 1999–2011 stanowiły źródło zanieczyszczeń obszarowych i mogły negatywnie oddziaływać na środowisko. Szczególnie ujemny wpływ mogły mieć związki kwasotwórcze oraz związki biogenne.

Opady atmosferyczne charakteryzowały się dużym stopniem zakwaszenia. Kwaśne deszcze były wynikiem zanieczyszczeń powietrza emitowanych do atmosfery, przede wszystkim kwasotwórczych związków siarki i azotu. Emitowane gazy: dwutlenek siarki, tlenki azotu, amoniak ulegają w atmosferze reakcjom chemicznym z wodą, przekształcając się w odpowiednie kwasy mineralne. Stanowią one zagrożenie nie tylko środowiska naturalnego i wywołują negatywne zmiany w strukturze oraz funkcjonowaniu ekosystemów lądowych i wodnych, ale także w infrastrukturze technicznej (np. linie energetyczne). Ilościowo największy udział w opadzie mokrym stanowią siarczany. W latach 1999–2011 na obszarze domeny projektu Klaps utrzymywała się tendencja malejąca depozycji siarczanów (Ryc. 42) oraz w części obszaru tendencja malejąca depozycji azotanów (Ryc. 43).

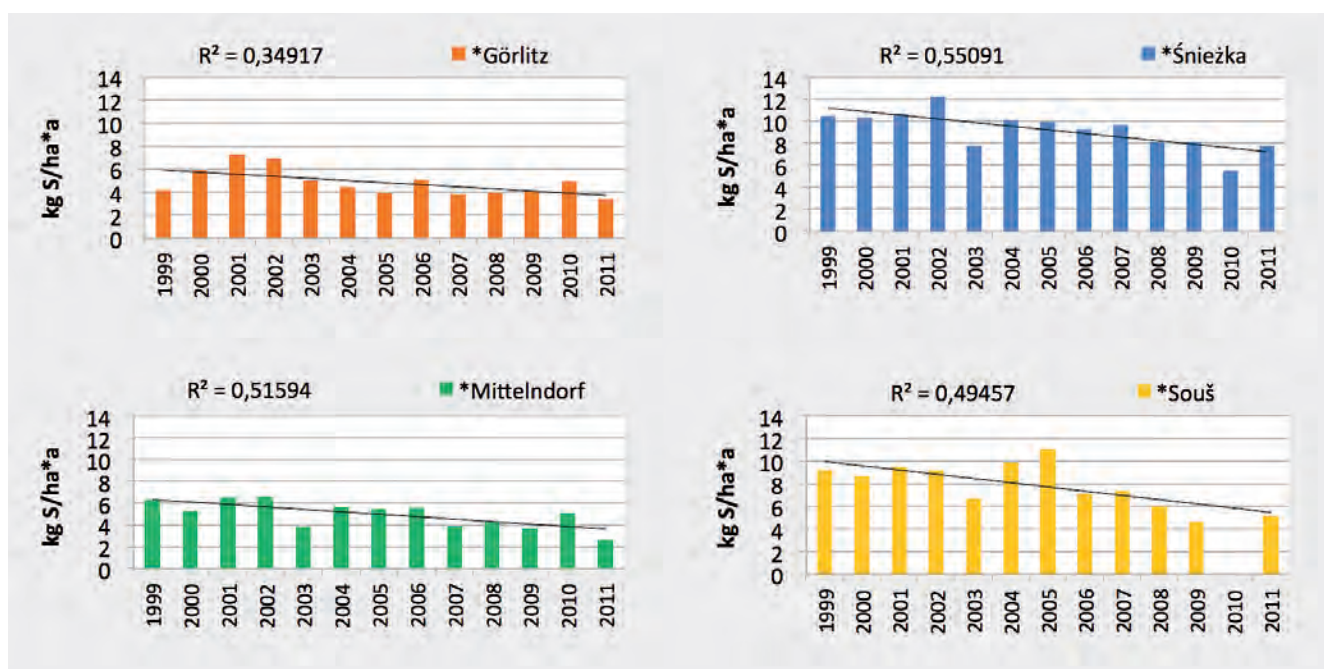
Obserwuje się redukcję emisji związków kwasotwórczych ze źródeł lokalnych w rejonie domeny, jak również ze źródeł związanych z napływem odległych mas powietrza, a szczególnie przy napływie cyrkulacji z kierunków N-NW-W-SW wnoszących ilościowo około 50% opadu mokrego w rejonie Dolnego Śląska (dane IMGW).

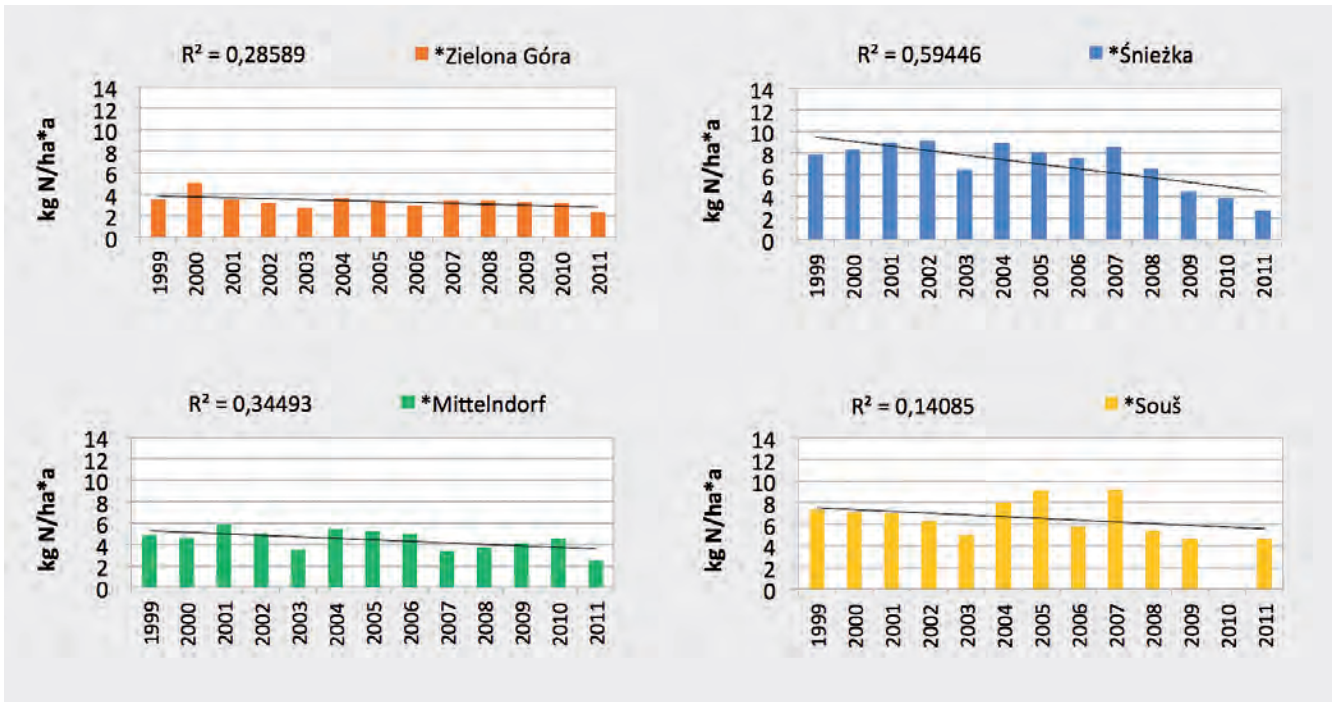
Do oceny zakwaszenia opadów w obszarze domeny istotne są pomiary odczynu opadu atmosferycznego, na podstawie którego określono średnioroczne wielkości stężeń jonów wodorowych wraz ze średniorocznym odczynem. Analiza trendów zmian wielkości depozycji jonów wodorowych w latach badań wskazuje na zmniejszenie zakwaszenia w rejonie domeny (Ryc. 44).

Istotne znaczenie dla środowiska naturalnego ma oddziaływanie substancji biogenych. Można je rozpatrywać zarówno jako pozytywne (zasilanie terenów uprawianych rolniczo), jak negatywne (wzrost procesu eutrofizacji wód powierzchniowych). Według VOLLENWEIDERA (1976) dla zbiorników i jezior, w zależności od ich parametrów morfometrycznych, dopuszczalne roczne obciążenie powierzchniowe dla azotu wynosi około 10 kg N/ha/r. Duża depozycja substancji biogenych jest szczególnie niekorzystna w przypadku obszarów wrażliwych na eutrofizację, zwłaszcza

Ryc. 42

Diagramy rocznych depozycji siarczanów z opadów atmosferycznych mokrych w wieloleciu 1999–2011 dla wybranych stacji badawczych



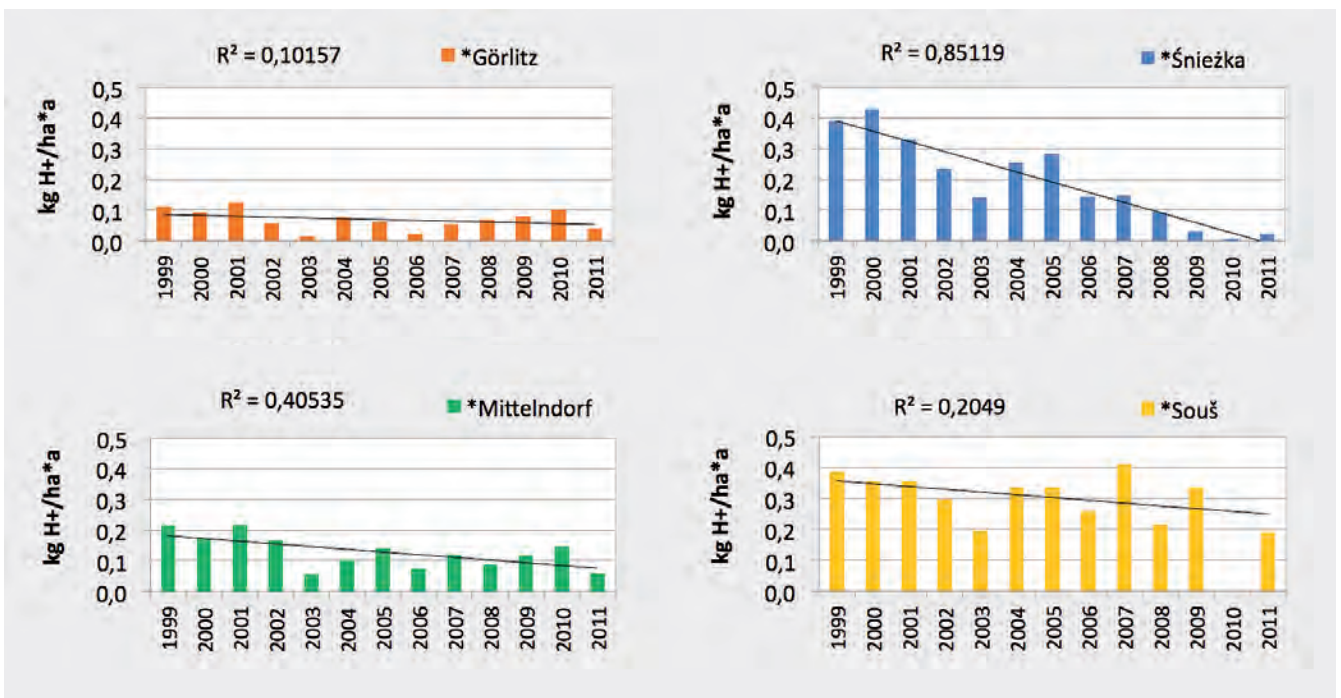


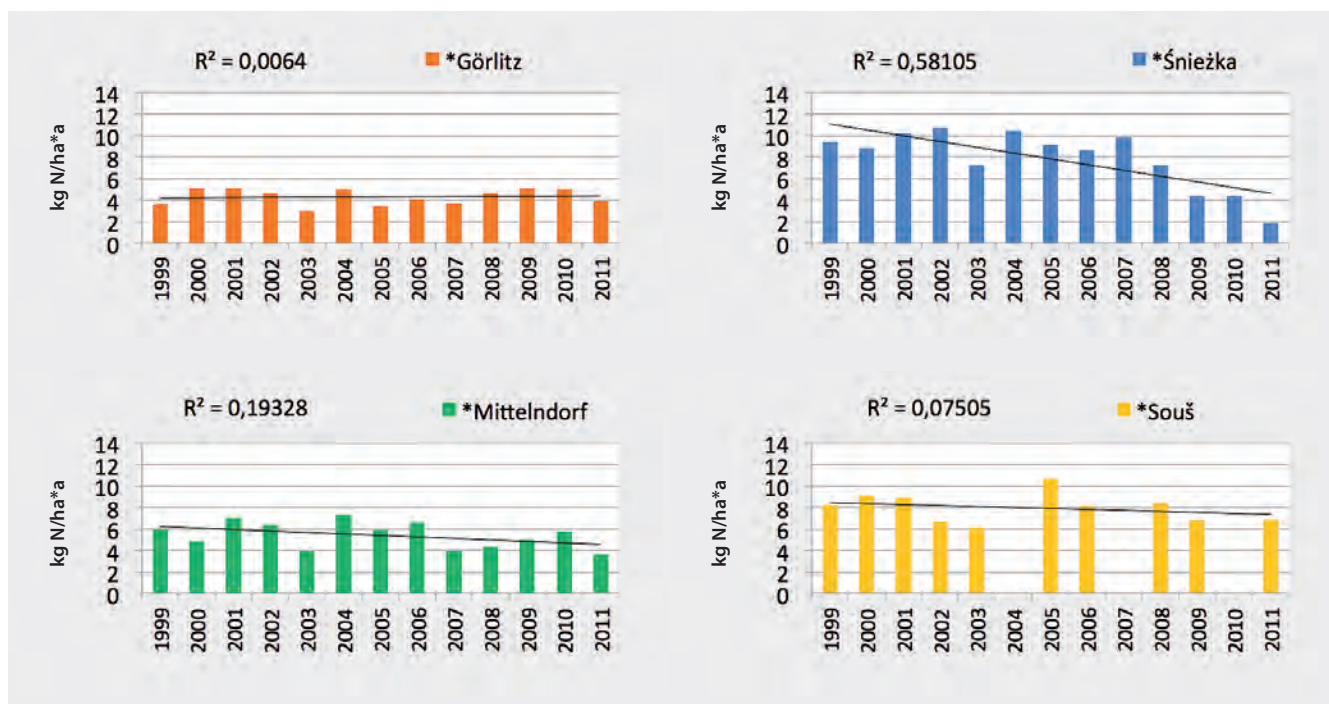
Ryc. 43

Diagramy rocznych depozycji azotu z opadów atmosferycznych mokrych w wieloletniu 1999–2011 dla wybranych stacji badawczych

Ryc. 44

Diagramy rocznych depozycji jonów wodorowych z opadów atmosferycznych mokrych w wieloletniu 1999–2011 dla wybranych stacji badawczych





Ryc. 45
Diagramy rocznych depozycji azotu amonowego z opadów atmosferycznych mokrych w wieloletniu 1999–2011 dla wybranych stacji badawczych zlokalizowanych w obszarze domeny projektu KLAPS

gdy większa część ładunków substancji biogennej była wprowadzona w okresie ciepłym, co przy dużym nasłonecznieniu powodowało intensyfikację zakwitu glonów. Ilościowo, wśród związków azotu, największy udział w opadzie mokrym stanowi ładunek azotu amonowego (Ryc. 45). W latach 1999–2011 na obszarze domeny na większości stacji utrzymuje się tendencja malejąca tej depozycji.

Dotychczasowa tendencja malejąca depozycji w obszarze domeny może być związana ze zmianami w gospodarce węgla, ograniczeniem emisji w zakładach przemysłowych, wzroście świadomości ekologicznej oraz zmianami w zakresie wielkości opadu na obszarze badań projektu.

Jedną z najważniejszych informacji wyjściowych z modelu FRAME, używaną m.in. w analizach ładunków krytycznych i ich przekroczeń, jest mokra depozycja zanieczyszczeń. Dla roku bazowego 2010 wyniki modelowania dla mokrej depozycji związków siarki i azotu porównano z bezpośrednimi pomiarami zgromadzonymi na dziesięciu stacjach pracujących w domenie modelu. Porównano wielkość mokrej depozycji w gridzie, w którym znajdowała się stacja pomiarowa, z wielkością na niej zmierzoną. Wyniki zaprezentowano w formie

korelogramów, oraz policzono błędy modelu jako różnicę między wielkością modelowaną i obserwowaną. Błędy podsumowano za pomocą trzech statystyk:

- BIAS – policzony jako średnia arytmetyczna z różnic model – obserwacja dla wszystkich stacji. Statystyka przyjmuje wielkości w przedziale $\pm \infty$, a wielkość oczekiwana jest równa zero. BIAS > 0 wskazuje na tendencję modelu do przeszacowywania wielkości stężeń lub depozycji. BIAS < 0 informuje o niedoszacowaniu wielkości w porównaniu do obserwacji.
- Statystyka FAC2 (Factor of two) – policzona jako udział liczby stacji, dla których stosunek wielkości modelowanej do obserwowanej mieści się w przedziale 2:1 i 1:2, w ogólnej liczbie stacji pomiarowych. Wielkość oczekiwana to 1, oznaczająca, że wszystkie stacje mieszczą się we wspomnianym przedziale.
- Średni błąd absolutny (MAE) – obliczony jako średnia arytmetyczna z wielkości bezwzględnych błędów modelu. Statystyka przyjmuje wielkości ≥ 0 , a wielkość oczekiwana to zero.

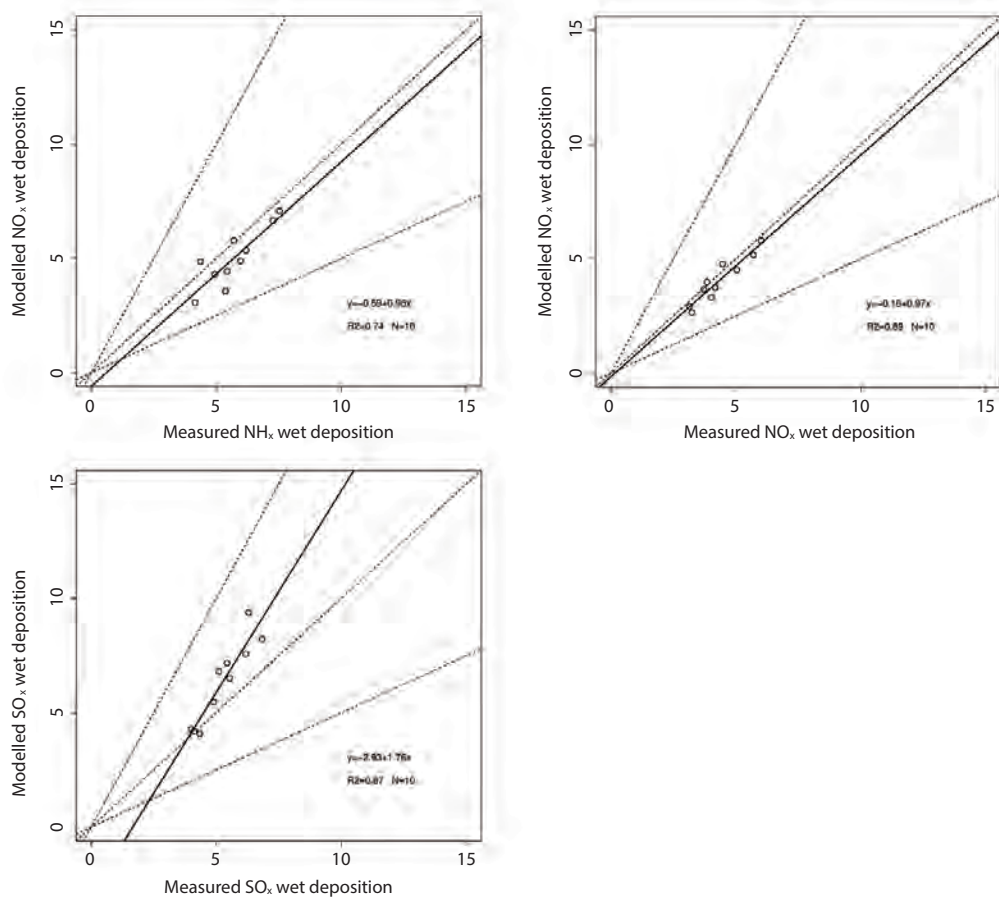


Wyniki oceny pracy modelu FRAME są podsumowane na ryc. 46 i w tabeli 15. Dla mokrej depozycji związków siarki i azotu model jest w dobrej zgodności z obserwacjami. Współczynnik determinacji (R^2) jest bardzo wysoki i przekracza 0.87 i 0.89 odpowiednio dla siarki i tlenków azotu. Dla azotu amonowego rozrzut punktów jest nieznacznie większy, a współczynnik determinacji wynosi 0.74. Dla wszystkich trzech analizowanych zanieczyszczeń wielkość statystyki FAC2 jest bliska 1. Oznacza to, że wyniki modelowania spełniają kryteria pozwalające na ich wykorzystanie np. w określaniu przekroczeń ładunków krytycznych. Mokra depozycja związków azotu jest niedoszacowana (Tabela 15).

W przypadku mokrej depozycji siarki, FRAME ma tendencję do przeszacowywania wielkości mierzonych na stacjach.

Porównanie wyników FRAME z interpolowaną informacją o mokrej depozycji IMGW-PIB

Rozkład przestrzenny depozycji zanieczyszczeń przygotowany przez IMGW-PIB został oparty na rzeczywistych danych opadowych oraz na wynikach analiz fizykochemicznych wody opadowej uzyskanych w ramach badań monitoringowych prowadzonych na terenie Polski, Niemiec i Czech. Rozkłady przestrzenne stężeń i depozycji wód opadowych wykonano dla lat badań 2000, 2005 i



Ryc. 46
Porównanie mokrej depozycji związków azotu i siarki [kg N/S ha⁻¹] obliczonej przez FRAME z pomiarami; R2 – współczynnik determinacji, N – liczba stacji pomiarowych

	mokra depozycja NH _x -N	mokra depozycja NO _x -N	mokra depozycja SO _x -S
BIAS [kg N lub S]	-0.69	-0.29	1.10
FAC2 [-]	1.00	1.00	1.00
MAE [kg N lub S]	0.81	0.37	1.15

Tabela 15
Statystyki błędów dla modelu FRAME (mokra depozycja) dla roku bazowego 2010

2010 (jak przy zastosowaniu modelu FRAME). Do uzyskania rozkładu przestrzennego depozycji poszczególnych substancji wykorzystano dane o rozkładzie średnich rocznych sum opadów (udostępnione przez Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery Uniwersytetu Wrocławskiego – PP1) w rozdzielczości 1 km x 1 km.

Wyniki modelowania mokrej depozycji, przeprowadzone modelem FRAME, zostały porównane z wynikami interpolacji danych pomiarowych wykonanymi przez IMGW-PIB dla lat 2000, 2005 i 2010. Wyniki dla roku 2010 zostały przedstawione na **ryc. 47**. Stwierdzono dobrą zgodność przestrzenną obu baz danych, z korelacjami grid do grida przekraczającymi 0.7 dla wszystkich trzech analizowanych zanieczyszczeń. Zarówno wyniki FRAME, jak i IMGW-PIB wskazują na obszary górskie jako te, na których mokra depozycja jest najwyższa. Mokra depozycja siarki, obliczona przez FRAME, na znacznym obszarze opracowania przekracza tę, na którą wskazują szacunki IMGW-PIB. W przypadku azotu amonowego, FRAME wskazuje na niższą depozycję niż IMGW-PIB dla obszaru nizin. Różnica w tym przypadku sięga 30% i jest zbliżona do uzyskanej przez porównanie FRAME z pomiarami mokrej depozycji dla stacji Zielona Góra i Legnica. Dla obszarów górskich różnica nie przekracza 10%.

Porównanie z wynikami modelu EMEP

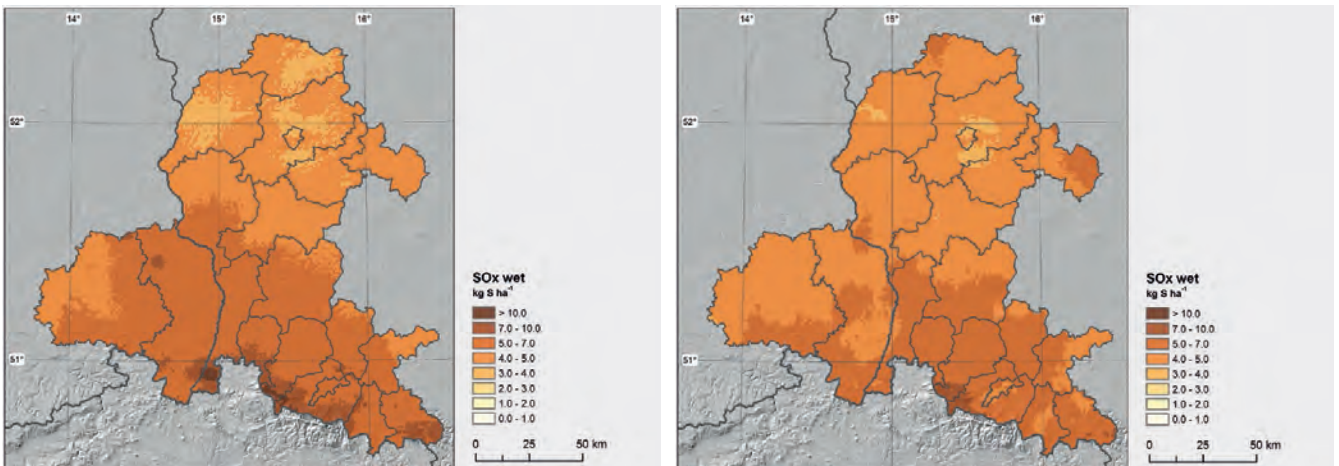
Wyniki modelu FRAME zostały porównane z uzyskanymi z Eulerowskiego modelu EMEP. Model EMEP jest szeroko stosowany w Europie w kształtowaniu polityki ochrony środowiska i jest narzędziem uznanym w środowisku naukowym (SIMPSON et al. 2012). Oba modele różnią się istotnie w swoich założeniach. FRAME jest relatywnie prostym statystycznym modelem trajektorii, pracującym z podstawowymi danymi meteorologicznymi. EMEP jest złożonym modelem Eulerowskim, który wykorzystuje kompleksową informację meteorologiczną dostarczoną przez mezoskalowy model meteorologiczny. Modele różnią się także co do rozdzielczości przestrzennej (1 km vs 50 km odpowiednio dla FRAME i EMEP) oraz pionowej (33 i 26 warstw).

W celu porównania wyników modeli FRAME i EMEP posłużono się całkowitą masą deponowanych zanieczyszczeń w domenie projektu KLAPS (bilans depozycji). Informacja ta została policzona osobno dla modeli FRAME i EMEP dla roku bazowego 2010. Wyniki zostały przedstawione na **ryc. 48**.

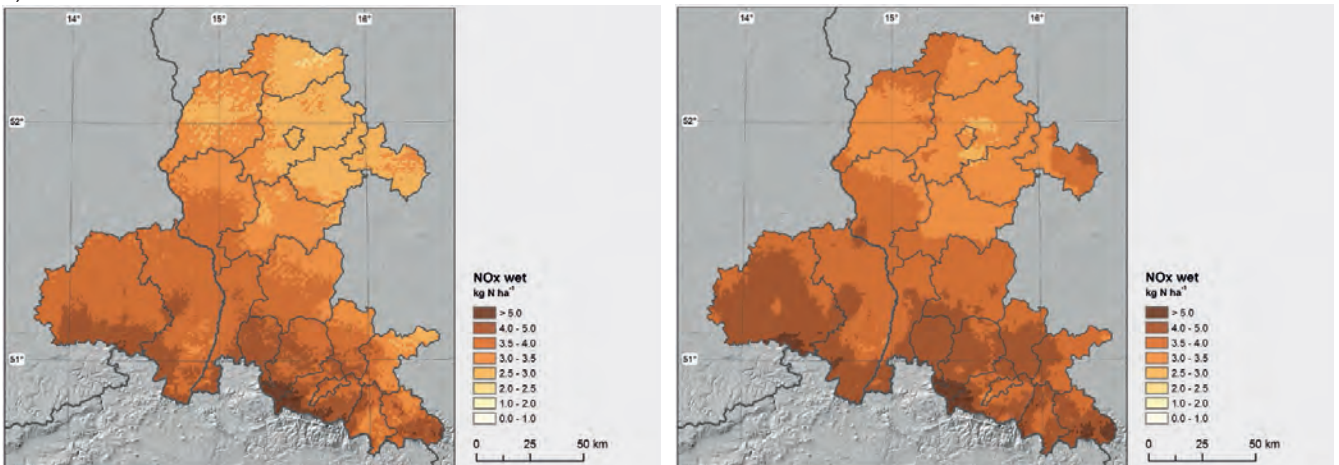
Mokra depozycja dostarcza główną część deponowanych związków siarki i azotu, zarówno w przypadku FRAME jak i EMEP. Sucha depozycja azotu zredukowanego (NH_x) i siarki jest niższa dla FRAME niż dla EMEP. Dla tych samych zanieczyszczeń mokra depozycja obliczona przez model FRAME jest wyższa, niż określona przez EMEP. Dla tlenków azotu, sucha depozycja obliczona przez FRAME jest wyższa, niż określona przez EMEP, w przeciwieństwie do mokrej depozycji, która jest niższa. Różnice między modelami nie przekraczają 10% i można je uznać za niewielkie, biorąc pod uwagę fundamentalne różnice w konstrukcji modeli oraz danych wejściowych (zarówno w kontekście meteorologii jak i emisji).



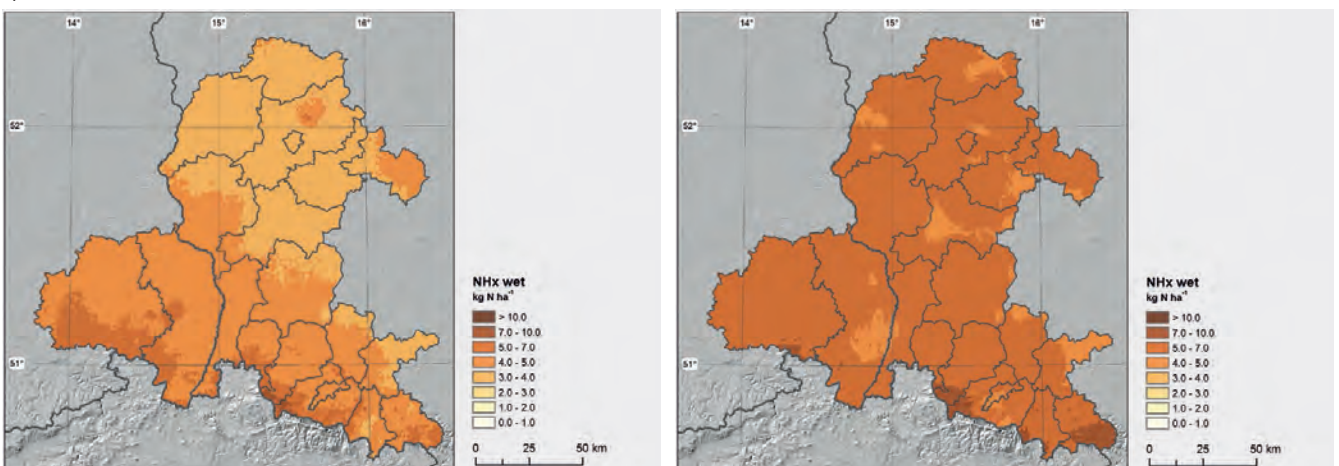
a)



b)



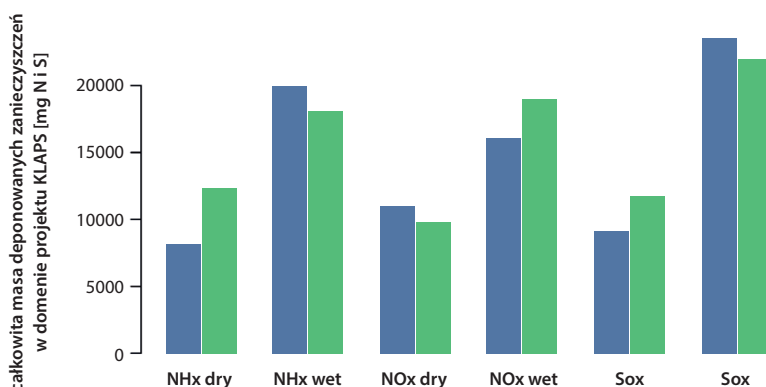
c)



Ryc. 47
Mokra depozycja siarki (górny wiersz), tlenków azotu (środkowy) i azotu amonowego (dolny) obliczona przez FRAME (lewa kolumna) i IMGW-PIB (prawa)

Ryc. 48

Bilans suchej i mokrej depozycji dla związków siarki i azotu obliczony w oparciu o wyniki modeli FRAME (kolor niebieski) o EMEP (zielony) dla roku 2010



Podsumowanie symulacji wykonanych modelem FRAME

Łącznie w ramach projektu KLAPS wykonano 25 symulacji modelem FRAME. Symulacje różniły się zastosowanymi danymi emisyjnymi i meteorologicznymi. Głównym celem była kwantyfikacja zmian depozycji związków siarki i azotu w domenie KLAPS, zachodząca pod wpływem zmian w emisji, meteorologii, i przy łącznych zmianach obu tych elementów. Dane emisyjne i meteorologiczne, zastosowane w kolejnych symulacjach modelem FRAME, zostały opisane we wcześniejszych rozdziałach.

Krótkie podsumowanie danych wejściowych, wykorzystanych w kolejnych symulacjach przeprowadzonych modelem FRAME przedstawia [Tabela 16](#).

Tabela 16

Podsumowanie danych wejściowych wykorzystanych w symulacjach modelu FRAME

nazwa	dane emisyjne	dane meteorologiczne	komentarz
rok bazowy	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	Opady atmosferyczne wg scenariusza A1B, średnie dla wielolecia 2021–2050 oraz 2071–2100. Dla każdego okresu klimatologicznego model był uruchomiony trzy razy, odpowiednio z emisją dla roku 2010, 2020 i 2030.
FC_RCP2.6	2010, 2020, 2030	2021–2050, 2071–2100	Opady atmosferyczne wg scenariusza RCP2.6, średnie dla wielolecia 2021–2050 oraz 2071–2100. Dla każdego okresu klimatologicznego model był uruchomiony trzy razy, odpowiednio z emisją dla roku 2010, 2020 i 2030.
FC_RCP8.5	2010, 2020, 2030	2021–2050, 2071–2100	Opady atmosferyczne wg scenariusza RCP8.5, średnie dla wielolecia 2021–2050 oraz 2071–2100. Dla każdego okresu klimatologicznego model był uruchomiony trzy razy, odpowiednio z emisją dla roku 2010, 2020 i 2030.



Wyniki

Aktualna depozycja zanieczyszczeń

Prezentację wyników przedstawiono w następujący sposób: na początku prezentowane są mapy suchej i mokrej depozycji dla roku bazowego 2010, uzyskane z modelu FRAME. W dalszej części rozdziału porównano całkowitą depozycję związków siarki i azotu dla lat 2000 i 2010, a następnie wyniki uzyskane dla projekcji emisji (lata 2015–2030) i klimatu, dla trzech wybranych scenariuszy.

Rozkład przestrzenny suchej i mokrej depozycji związków siarki i azotu, uzyskany z modelu FRAME, przedstawia ryc. 49. Sucha depozycja jest największa blisko źródeł emisji, zarówno dla siarki jak i azotu. W przypadku mokrej depozycji, najwyższe wielkości zostały obliczone dla obszarów o najwyższych rocznych sumach opadu atmosferycznego, szczególnie dla obszarów górskich. Dla tych ostatnich, dodatkowym czynnikiem zwiększającym wielkość mokrej depozycji jest, uwzględniony w modelu FRAME, efekt seeder-feeder. Najwyższe wielkości mokrej depozycji siarki przekraczają 8 kg S ha^{-1} i 5 oraz 7 kg N ha^{-1} odpowiednio dla tlenków azotu i azotu amonowego. Całkowita masa deponowanej siarki w domenie projektu KLAPS w roku 2010 wyniosła 33 Gg S . Całkowita masa zdeponowanych tlenków azotu wyniosła 27 Gg N , a azotu amonowego 29 Gg N .

Całkowita depozycja (sucha+mokra) siarki i azotu zredukowanego dla lat 2000 i 2010 została porównana na ryc. 50. W obu analizowanych latach ogólny rozkład przestrzenny nie uległ zasadniczym zmianom. Widoczny jest natomiast wyraźny spadek depozycji siarki w całym obszarze analizy w okresie

od 2000 do 2010 r. Podobne zmiany są widoczne dla depozycji tlenków azotu. Jest to skutek ograniczenia emisji zarówno na samym obszarze KLAPS, jak i w całej Europie (transport zanieczyszczeń na dalekie odległości). W przypadku azotu zredukowanego zmiany nie są tak wyraźne, a depozycja w roku 2010 jest prawie na tym samym poziomie co w roku 2000.

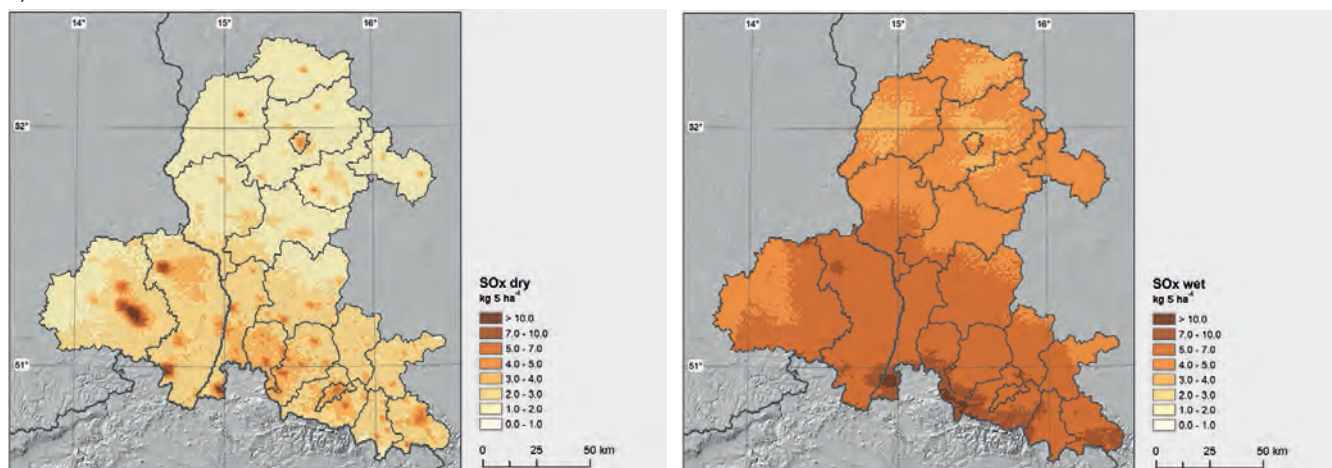
Przyszłe zmiany w depozycji

Depozycja związków siarki i azotu, przy założeniu prognozowanego poziomu emisji dla lat 2020 i 2030 oraz stałej meteorologii z roku 2010, prezentuje ryc. 51. Widoczny jest dalszy spadek depozycji siarki i tlenków azotu, przy zbliżonym, do roku 2010, ogólnym przestrzennym rozkładzie depozycji. Zmiany w depozycji są blisko skorelowane ze zmianami emisji, prognozowanymi w tym okresie. W przypadku azotu zredukowanego, podobnie jak w okresie 2000–2010, zmiany są bardzo nieznaczne, a depozycja w 2030 r. pozostaje na poziomie zbliżonym do roku 2010.

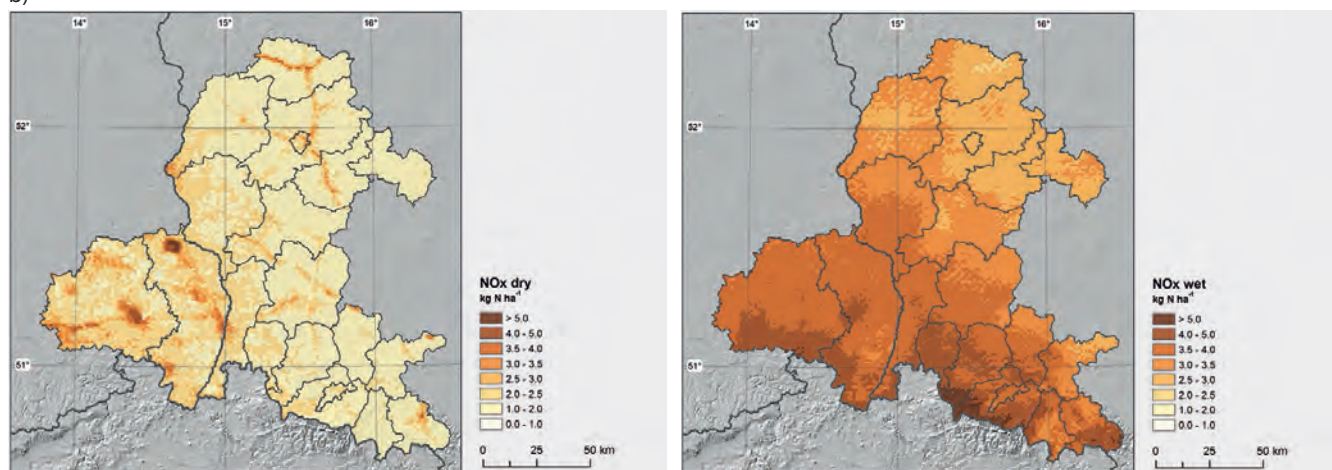
Bilans depozycji dla domeny projektu KLAPS, uzyskany na podstawie symulacji z emisją dla lat 2010–2030 i stałej meteorologii dla roku 2010 został podsumowany na ryc. 52. Największy spadek depozycji jest zauważalny dla siarki i tlenków azotu. W przypadku azotu zredukowanego, całkowita masa deponowanych zanieczyszczeń pozostaje na zbliżonym poziomie. Powoduje to, że azot zredukowany, którego głównym źródłem jest emisja z działalności rolniczej, staje się głównym źródłem azotu dla ekosystemów po 2010 r.



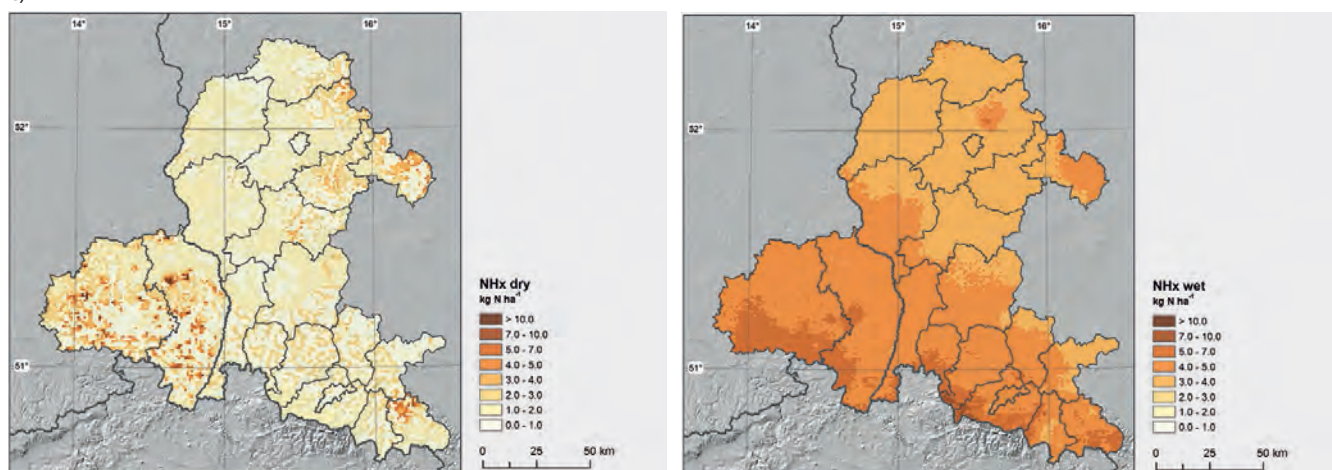
a)



b)

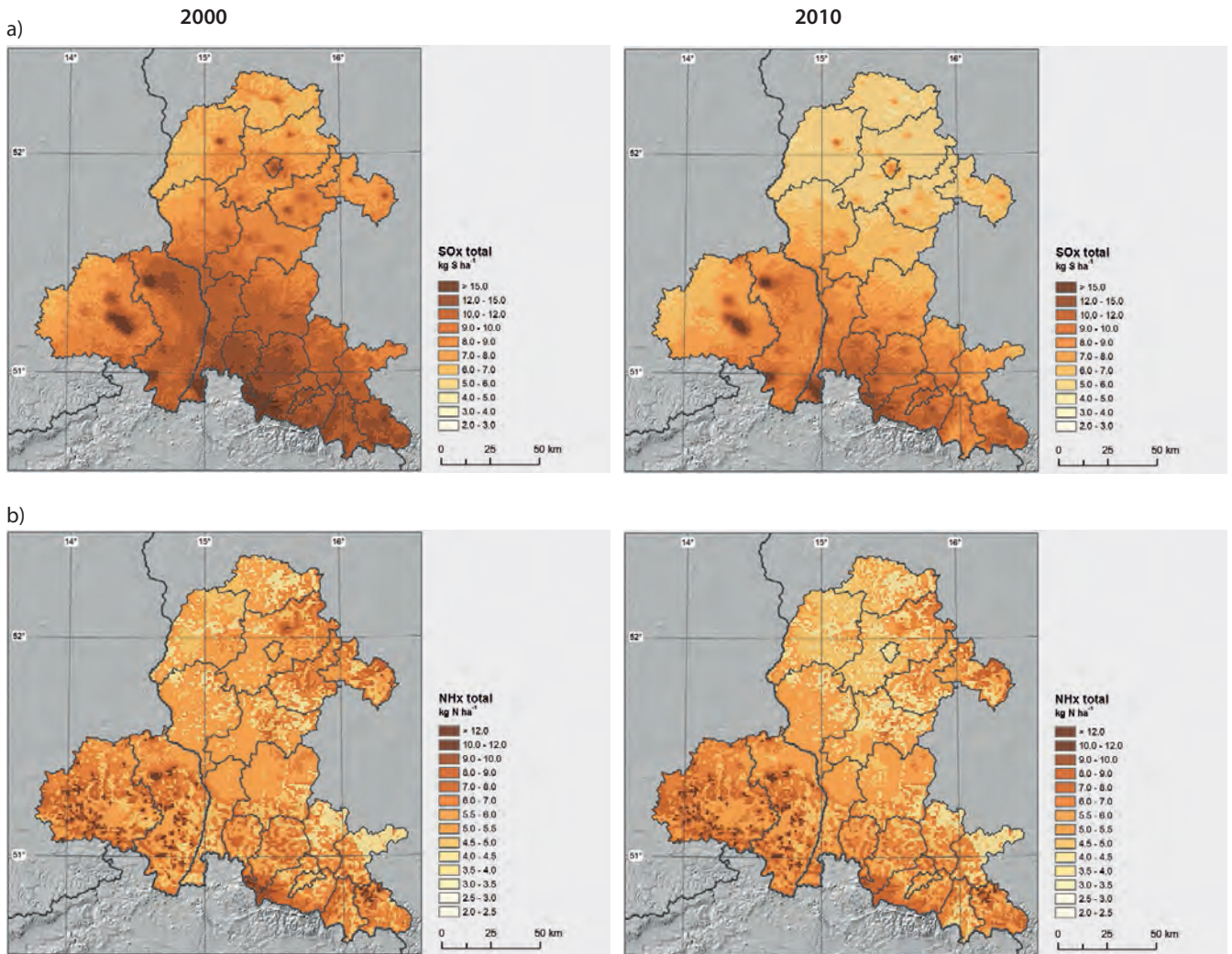


c)

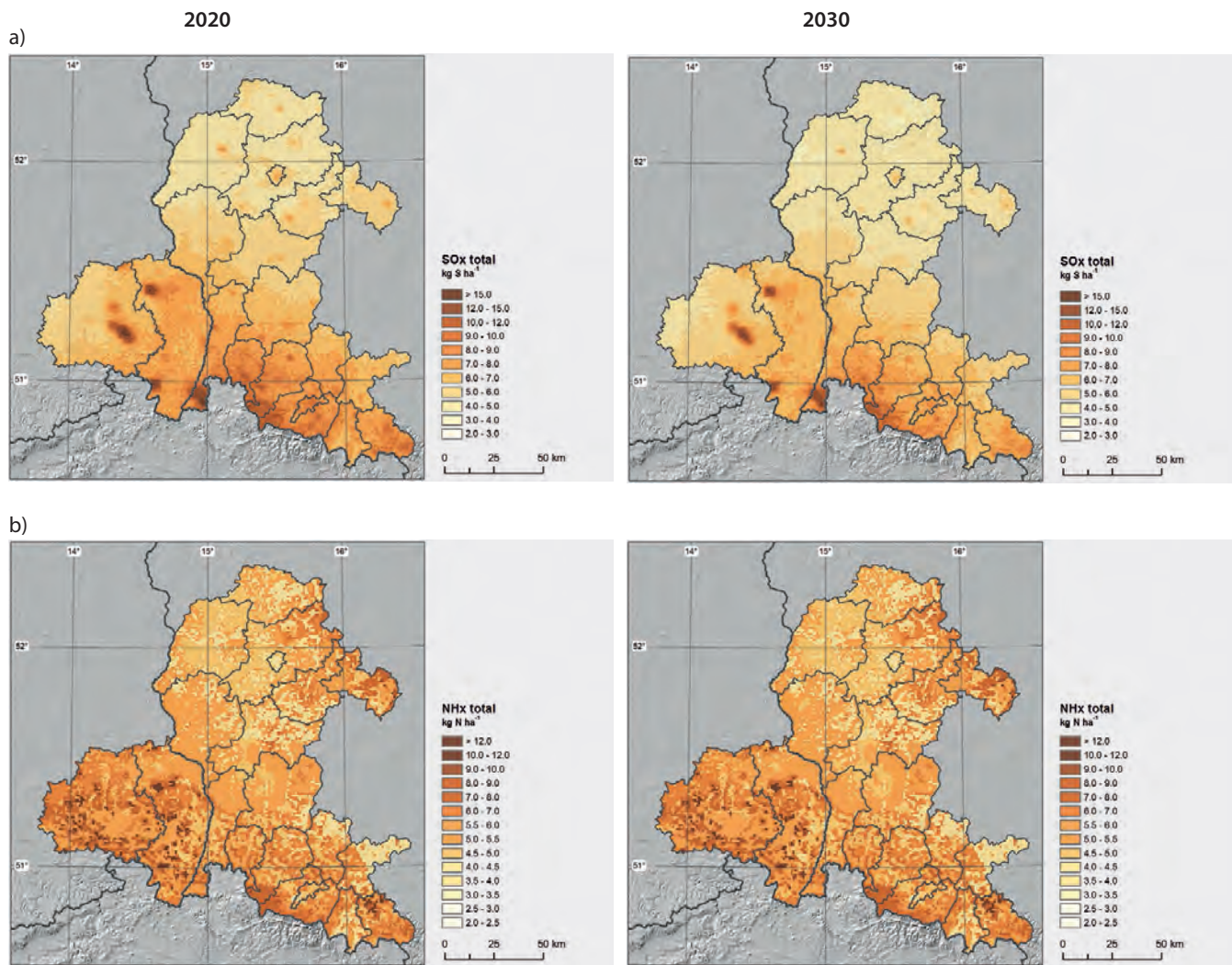


Ryc. 49

Sucha (lewa kolumna) i mokra (prawa) depozycja siarki (górny wiersz), tlenków azotu (środkowy) i azotu amonowego (dolny) w roku bazowym 2010

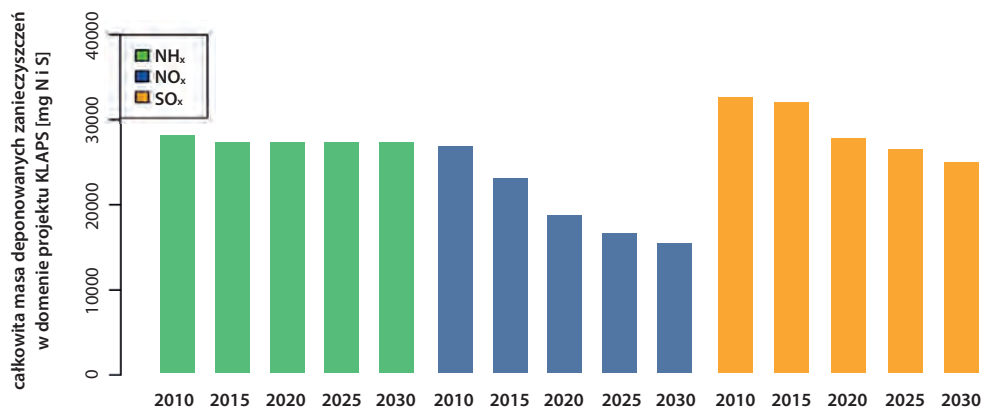


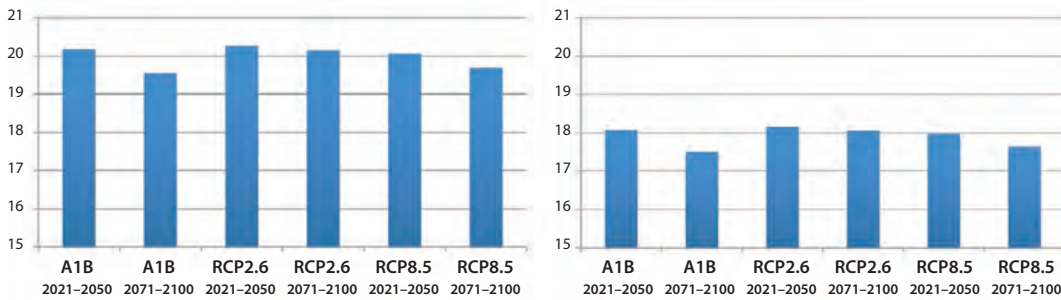
Ryc. 50
Całkowita depozycja siarki
(górny wiersz) i azotu
zredukowanego (dolny) w
roku 2000 (lewa kolumna)
i 2010 (prawa)



Ryc. 51
Całkowita depozycja
siarki (górny wiersz) i
azotu zredukowanego
(dolny) dla emisji z roku
2020 (lewa kolumna) i
2030 (prawa)

Ryc. 52
Bilans depozycji związków
siarki i azotu w domenie
projektu KLAPS w latach
2010–2030





Ryc. 53
Bilans depozycji siarki dla różnych scenariuszy zmian klimatu i dla emisji w roku 2020 (lewa strona) i 2030 (prawa)

Dla symulacji bazujących na jednakowej emisji i różnych scenariuszach zmian klimatu, zmiany w bilansie depozycji są niewielkie, w porównaniu do zmian wynikających z redukcji emisji (Ryc. 53). Największe zmiany dotyczą scenariuszy A1B i RCP8.5, dla których stwierdzono największe zmniejszenia rocznych sum opadu do roku 2100, skutkujące zmniejszeniem np. całkowitej masy deponowanej siarki o 1 Gg. Najmniejsze zmiany w depozycji stwierdzono dla scenariusza RCP2.6, dla którego prognozowane zmiany rocznych sum opadu do roku 2100 są mniejsze.

padku azotu zredukowanego redukcja depozycji jest bardzo nieznaczna.

- Wg przyszłych emisji, określonych na podstawie scenariusza GAINS PRIMES, w obszarze projektu spodziewane jest dalsze zmniejszanie depozycji związków siarki i tlenków azotu.
- Zmiany w depozycji azotu zredukowanego w nadchodzących latach będą małe, w porównaniu do pozostałych analizowanych zanieczyszczeń. Azot zredukowany jest obecnie głównym źródłem azotu w domenie projektu KLAPS.

Podsumowanie i wnioski

W ramach prac zrealizowanych w projekcie KLAPS przeanalizowane zostały zmiany w depozycji związków siarki i azotu w zależności od scenariuszy emisji i zmian klimatu. Główne wnioski z tych prac są następujące:

- Zmiany emisji zanieczyszczeń ze źródeł antropogenicznych są w największym stopniu odpowiedzialne za zmiany depozycji związków siarki i azotu w regionie KLAPS.
- Zmiany w depozycji wynikające ze zmian klimatu (w szczególności pola opadu) są istotne dla scenariuszy A1B i RCP8.5, ale znacznie mniejsze niż powodowane przez zmiany w emisji. W scenariuszu RCP2.6 zmiany w depozycji związków siarki i azotu są bardzo małe.
- W okresie 2000 – 2010 doszło do znaczącej redukcji depozycji siarki i tlenków azotu w domenie projektu KLAPS. Zostało to potwierdzone zarówno przez pomiary mokrej depozycji jak i wynikami modelu FRAME. Zmiany te są bezpośrednim skutkiem ograniczania emisji w samej domenie projektu, jak i w całej Europie. W przy-





Ładunki krytyczne





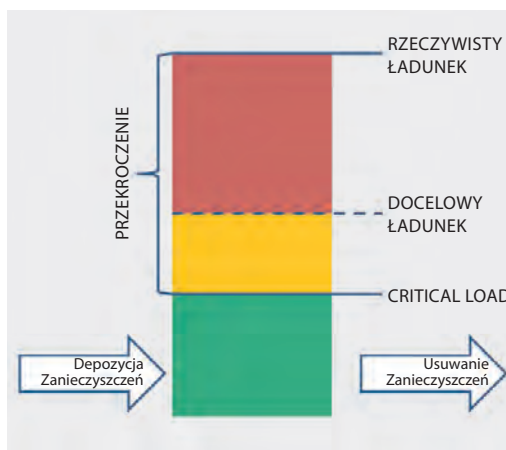
Wprowadzenie do problematyki ładunków krytycznych

W celu ograniczenia negatywnego wpływu zanieczyszczeń na środowisko, w tym ochrony zdrowia ludności, wprowadza się wartości progowe dla poszczególnych związków. W przypadku zanieczyszczeń powietrza, wartości graniczne odgrywają istotną rolę przy osiągnięciu poszczególnych celów środowiskowych. Takimi wartościami granicznymi są ładunki krytyczne. Ładunki te, w kategoriach ogólnych i zgodnie z aktualnym stanem wiedzy, definiuje się jako ilościową miarę narażenia środowiska naturalnego na działanie jednego lub więcej zanieczyszczeń, poniżej którego nie wystąpią wyraźne uszkodzenia poszczególnych elementów środowiska. Na podstawie projekcji klimatu, zanieczyszczeń powietrza i ładunków krytycznych przedstawiono obecne oraz przyszłe zagrożenie dla ekosystemów. Ładunki krytyczne zakwaszenia i eutrofizacji zostały opracowane dla lasów i obszarów półnaturalnych oraz zostały porównane z depozycją zanieczyszczeń atmosferycznych. Na podstawie różnicy pomiędzy tymi dwiema wielkościami, określa się, czy występują przekroczenia wartości ładunków krytycznych. W przypadku przekroczenia ładunków krytycznych, niezbędna jest redukcja poziomu zanieczyszczeń. Podstawowym celem jest osiągnięcie poziomów krytycznych, natomiast może odbywać się to w kilku etapach (Ryc. 54).

Dane i metody

W celu obliczenia ładunków krytycznych niezbędne są wskaźniki chemiczne, fizyczne, biologiczne jak również informacja dotycząca klimatu i jakości powietrza. Ładunki krytyczne są obliczane w oparciu o prostą metodę bilansu masy, w której porównuje się ilość zanieczyszczeń na wejściu i wyjściu do systemu. Klasyfikację ekosystemów przeprowadzono w oparciu o mapę użytkowania terenu CORINE 2006. Na podstawie CORINE zostały wybrane lasy oraz inne (pół-) naturalne obszary, dla których obliczono ładunki krytyczne (Ryc. 55).

Informacje dotyczące rezerwatów biosfery, parków narodowych, obszarów chronionego krajobrazu, siedlisk flory i fauny (FFH) oraz obszarów specjalnej ochrony ptaków (SPA) pobrano z bazy danych NATURA2000. Dane glebowe z bazy European Soil Database zostały zastosowane do obliczeń parametrów związanych z glebą, tj. wydajności wietrzenia kationów zasadowych, czy zdolności neutralizacyj-



Ryc. 54
Ładunki krytyczne w polityce czystego powietrza

nej kwasu (Ryc. 56). Dla zapewnienia homogeniczności bazy danych European Soil Database v2.0 została zastosowana dla całej domeny projektu (ESDB 2004).

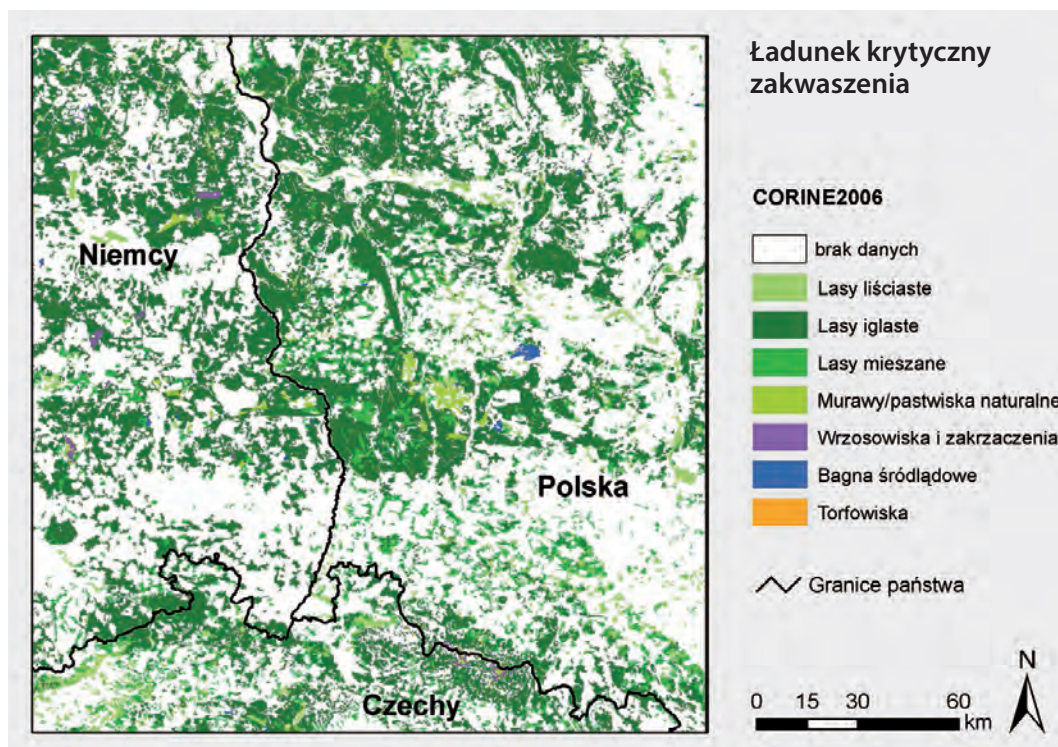
W oparciu o informację glebową oraz użytkowania terenu wyznaczono 41 klas biotypów (za EUNIS²).

Model FRAME zastosowano do obliczenia depozycji siarki i azotu (część B). W ramach projektu wykorzystano roczne wartości depozycji dla lat: 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2025 i 2030. Rycina 57 wskazuje na dwa wyraźne trendy w depozycji zanieczyszczeń. W przypadku utlenionych związków siarki (SO_x) i azotu (NO_x) występuje ciągły trend spadkowy, odpowiednio do 44% i 60% w roku 2030. W przypadku azotu zredukowanego (NH₃) sytuacja wygląda inaczej, ponieważ do roku 2030 występuje stagnacja wielkości depozycji.

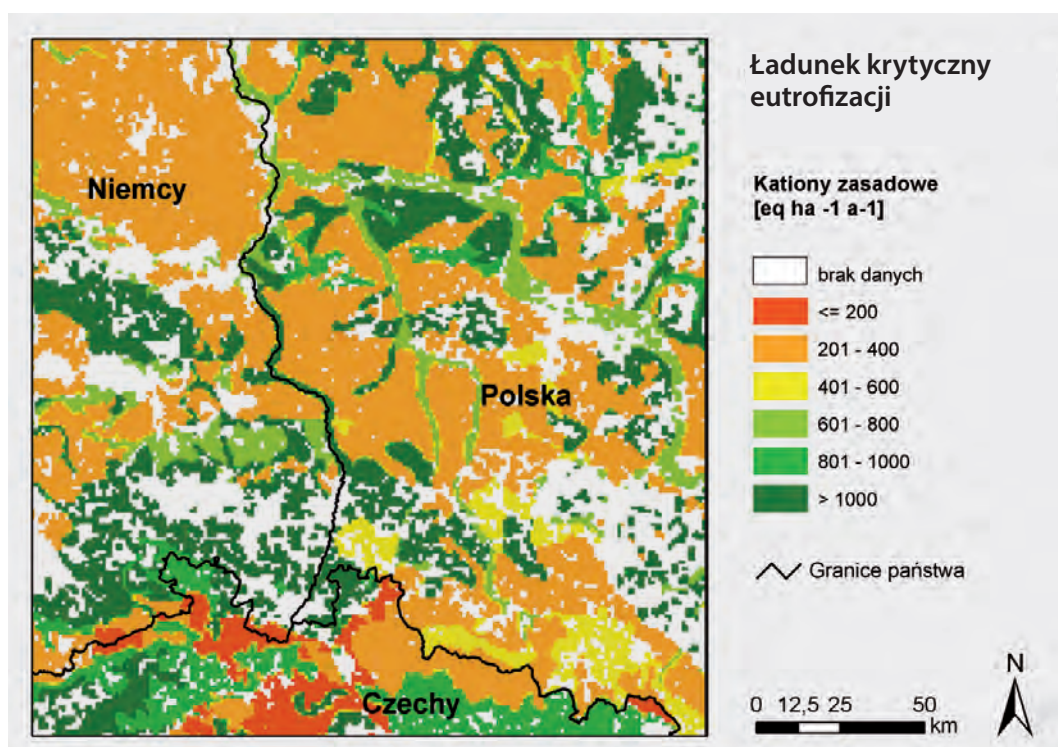
Wpływ warunków klimatologicznych na ładunki krytyczne, w rejonie granicznym Polski i Saksonii, rozważany jest dla sytuacji obecnej (dane pomiarowe) oraz dla projekcji klimatu (część A). Szczególnie procesy takie jak pobór składników pokarmowych, wymywanie, wydajność wietrzenia, są związane z warunkami klimatycznymi. Przyszłe wartości ładunków krytycznych zostały opracowane w oparciu o wybrane projekcje klimatu. Szczegółowy opis zastosowanych metod oraz danych znajduje się w pracy „Critical Loads of ecosystems in the polish-saxon border area” (NAGEL i in. 2014).

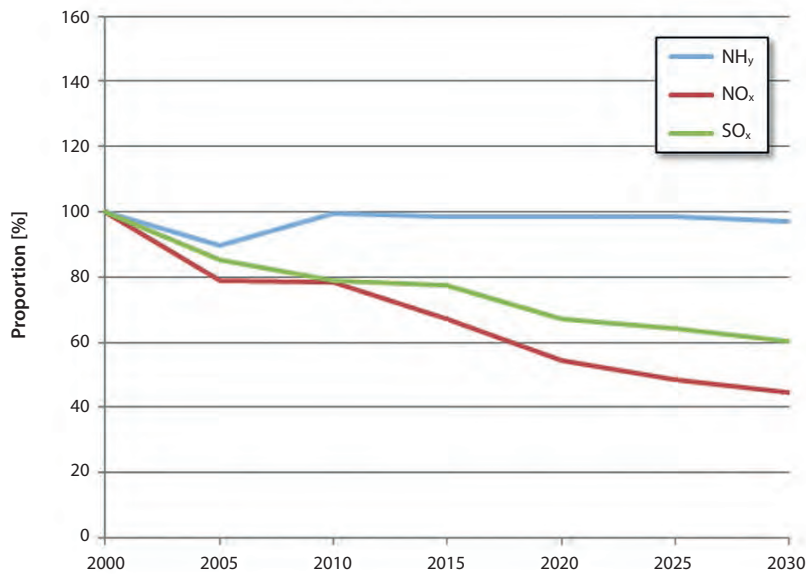
² eunis.eea.europa.eu

Ryc. 55
 Typy ekosystemów, dla
 których obliczono ładunki
 krytyczne, za CORINE 2006



Ryc. 56
 Wydajność wietrzenia
 kationów zasadowych





Ryc. 57
Trend depozycji w
domenie projektu KLAPS
(względem roku 2000)

NH₄ in the plot legend
??

Wyniki

Ładunki krytyczne dla okresu referencyjnego 1971–2000

Rozkład przestrzenny CL dla siarki (CL_{maxS}) przedstawiono na ryc. 58.

Najwyższe wartości (> 2500 eq ha⁻¹a⁻¹), oznaczające względną niewrażliwość/obojętność na zakwaszenie, dotyczą kilku indywidualnych obszarów w domenie KLAPS. Najwyższe wartości depozycji kationów zasadowych (> 500 eq ha⁻¹a⁻¹) oraz duża prędkość wietrzenia (600 to 800 eq ha⁻¹a⁻¹) występują na przedgórzu oraz w środkowej części Karkonoszy. Poza tymi obszarami, wysokie wartości CL_{maxS} dotyczą Górnych Łużyc oraz Gór Połabskich. Tutaj, szczególny wpływ na wysoką wartość CL_{maxS}, ma wysoka szybkość wietrzenia (800 do 1000 eq ha⁻¹a⁻¹).

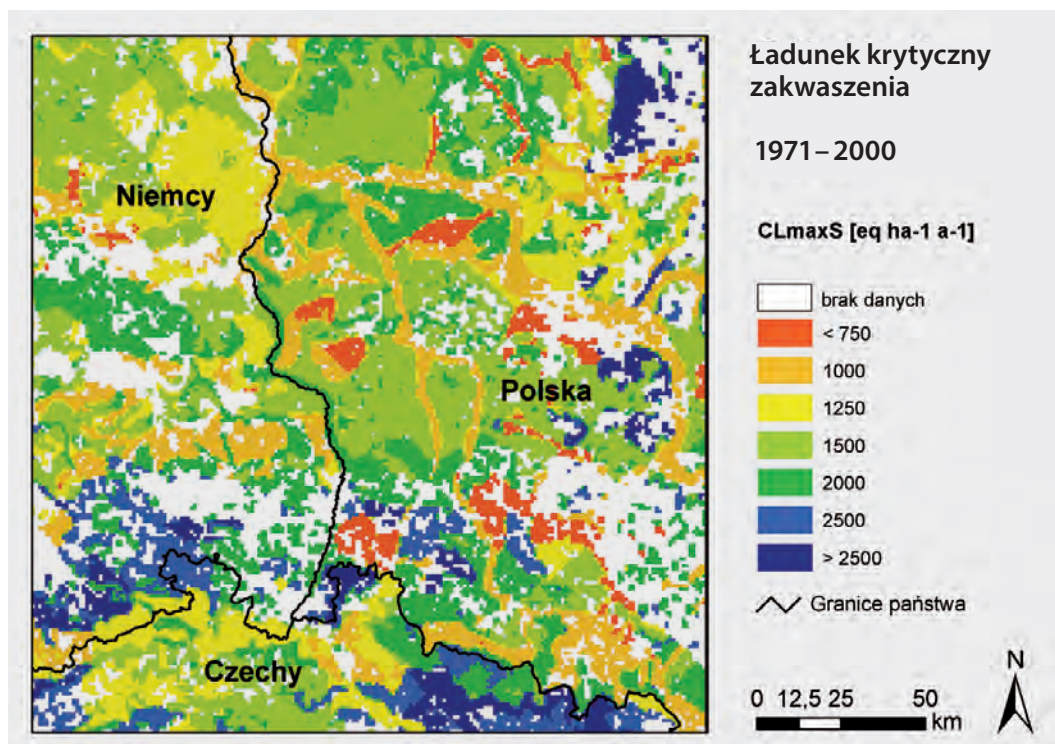
Niskie wartości CL (750 to 1000 eq ha⁻¹a⁻¹) dotyczą obszarów nizinnych, zarówno po polskiej jak i niemieckiej stronie domeny. W tych obszarach, szczególnie w strefach aluwialnych, względnie wysokie straty prowadzą do zmniejszenia zawartości kationów zasadowych. Niskie wartości CL występują również w północnej części środkowych Karkonoszy. W tym obszarze bardzo płytkie gleby (0.3 m) dostarczają małej ilości kationów zasadowych. Ponadto, proces wietrzenia jest ograniczony w wyżej położonych obszarach, ze względu na niskie temperatury.

Znaczące różnice występują, gdy porównamy ładunki krytyczne dla siarki oraz azotu (Ryc. 59). Głównym powodem jest to, że w przypadku azotu, nadwyżka opadów przekłada się na produktywność gleby. Główną rolę odgrywa krytyczny ładunek wymywanego azotu i absorpcja azotu przez rośliny. W związku ze zwiększoną rolą wysokich wartości opadu atmosferycznego oczywiste staje się, że wysokie wartości ładunków krytycznych dotyczą obszarów górskich. Szczególnie ma to miejsce w Górach Izerskich oraz masywie Karkonoszy (ładunek krytyczny powyżej 25 kg N ha⁻¹a⁻¹). Najniższe wartości ładunków krytycznych (7.5–15 kg N ha⁻¹a⁻¹), podobnie jak w przypadku siarki, dotyczą obszarów nizinnych zarówno po polskiej jak i niemieckiej stronie granicy. Te same procesy, które opisano dla ładunków krytycznych dla siarki, mają miejsce w przypadku ładunków krytycznych azotu.

Lasy liściaste oraz mieszane wykazują mniejszą wrażliwość na eutrofizację niż lasy iglaste. W przypadku obszarów nie będących lasami, wrzosowiska i zakrzaczenia wydają się być mniej wrażliwe niż obszary bagienne i torfowiska.

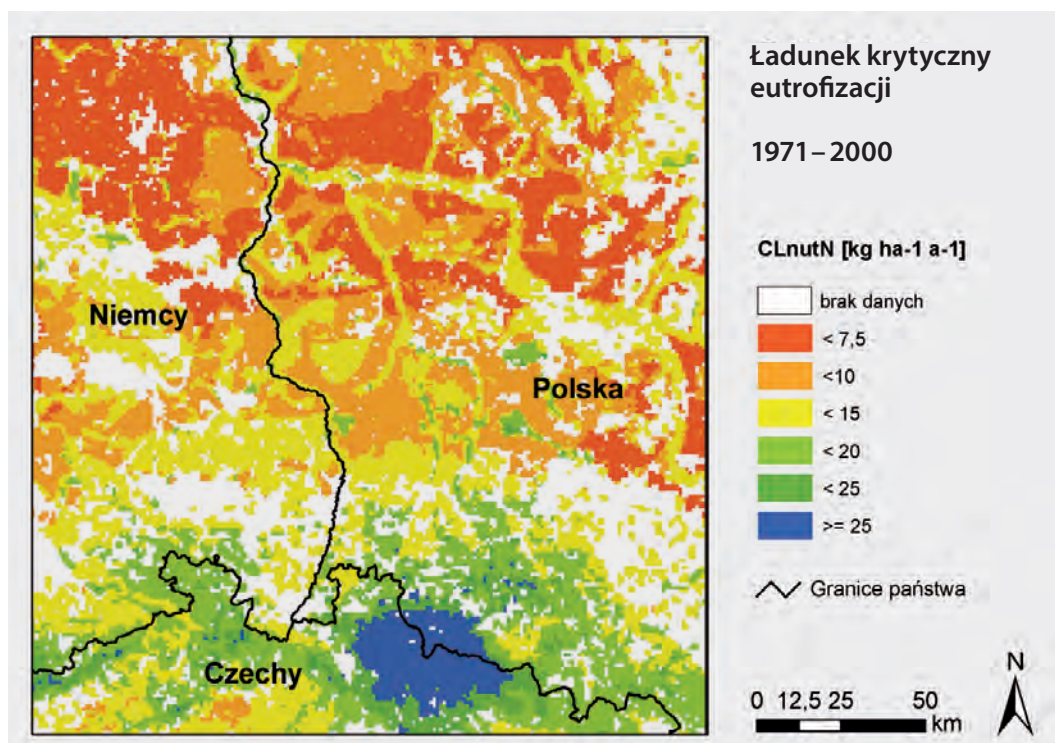
Ryc. 58

CL dla siarki (CL_{maxS})
przygotowane w oparciu
o dane klimatologiczne
dla okresu referencyjnego
1971–2000



Ryc. 59

CL dla azotu (CL_{nutN})
przygotowane w oparciu
o dane klimatologiczne
dla okresu referencyjnego
1971–2000





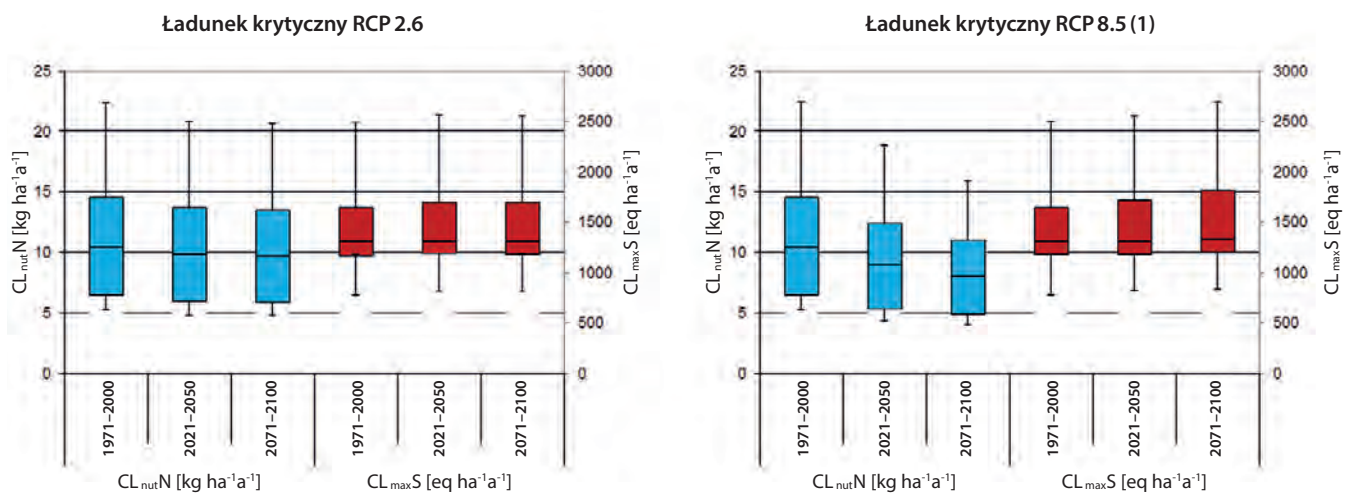
Ładunki krytyczne a różne scenariusze klimatu

Zmiany ładunków krytycznych dla różnych projekcji klimatu oraz scenariuszy RCP2.6 i RCP8.5 przedstawiono na ryc. 60 (czerwone wykresy pudełkowe; symulacja 1). Dla większości ekosystemów (63%) nieznaczne zmiany, z punktu widzenia ekologii ($\pm 100 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), zostały obliczone dla okresów 2021–2050 i 2071–2100 i porównane z okresem referencyjnym 1971–2000. Malejące wartości CL_{maxS} oznaczają zwiększoną wrażliwość dla obszarów górskich, natomiast dla większości ekosystemów przewidywany jest wzrost tolerancji na zakwaszenie. Stąd, wpływ możliwych zmian klimatu na ryzyko zakwaszenia w obszarze projektu jest dość mały. Podobne wyniki dotyczące zależności ładunków krytycznych od zmian klimatu otrzymano dla Saksonii (LfULG 2010).

W odróżnieniu od CL_{maxS} , CL_{nutN} reaguje mocniej na zmiany klimatu (Ryc. 60, niebieskie wykresy pudełkowe). Dla wszystkich scenariuszy klimatu, CL_{nutN} wskazuje na wzrost wrażliwości ekosystemów w latach 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000. Szczególnie pod koniec XXI wieku, wraz z prognozowaną zmianą klimatu wzrasta zagrożenie eutrofizacją związane z depozycją azotu. Najmniejsze zmiany zostały obliczone dla scenariusza RCP2.6, a największe dla RCP8.5.

Można podsumować, że dla wrażliwych ekosystemów ($CL < 10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) występują mniejsze zmiany CL w porównaniu do ekosystemów mniej wrażliwych ($CL > 30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, Tabela 17). Wyniki wskazują również, że ekosystemy położone na większych wysokościach są bardziej dotknięte przez eutrofizację, niż obszary położone niżej.

Ryc. 60
Zmiany ładunków krytycznych dla scenariusza RCP2.6 oraz RCP8.5 (symulacja 1)



	A1B		RCP2.6		RCP8.5 run 1		RCP 8.5 run 2		RCP 8.5 run 3	
	2021–2050	2071–2100	2021–2050	2071–2100	2021–2050	2071–2100	2021–2050	2071–2100	2021–2050	2071–2100
$CL_{\text{nutN}} [\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}]$										
< 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
średnia	-1,08	-2,84	-0,76	-2,24	-1,75	-8,69	-0,81	-6,62	-1,68	-6,78

Tabela 17
Podsumowanie zależności zmian CL od projekcji klimatu

Przekroczenia ładunków krytycznych związane ze zmianami emisji w latach 2000 – 2030

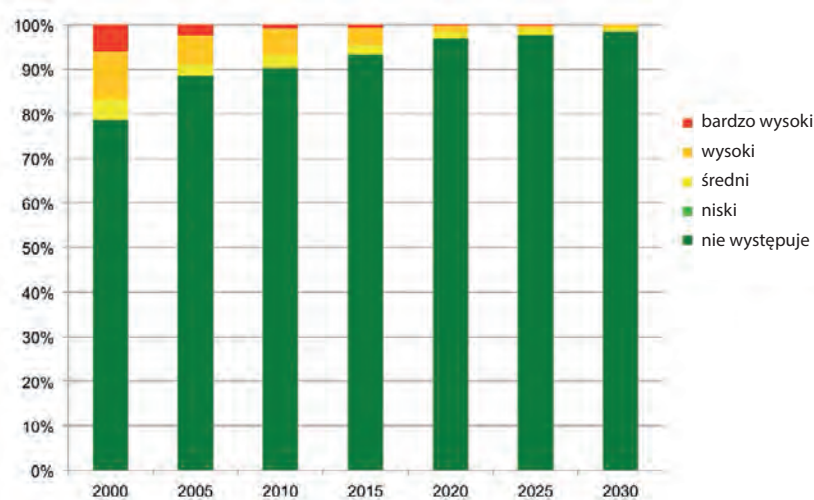
Pod koniec ubiegłego stulecia, zaobserwowano pierwsze rezultaty redukcji emisji zanieczyszczeń. W roku 2000 obszar dla którego nie wystąpiły przekroczenia CL wyniósł 78.7% domeny KLAPS. Zagrożenie zakwaszeniem wystąpiło tylko dla 21.3% powierzchni ekosystemów. W roku 2010 powierzchnia obszarów bezpiecznych ze względu na CL wzrosła do 90.5%. Prognozy dla roku 2030 wskazują, że prawie wszystkie ekosystemy będą poza zagrożeniem wystąpienia zakwaszenia (Ryc. 61).

W przeciwieństwie do przekroczeń ładunków krytycznych zakwaszenia, przekroczenia ładunków krytycznych eutrofizacji są wysokie do końca XX wieku. Prawie dla wszystkich ekosystemów depozycja zanieczyszczeń była wyższa niż CL eutrofizacji. Rycina 62 przedstawia zakres przekroczeń

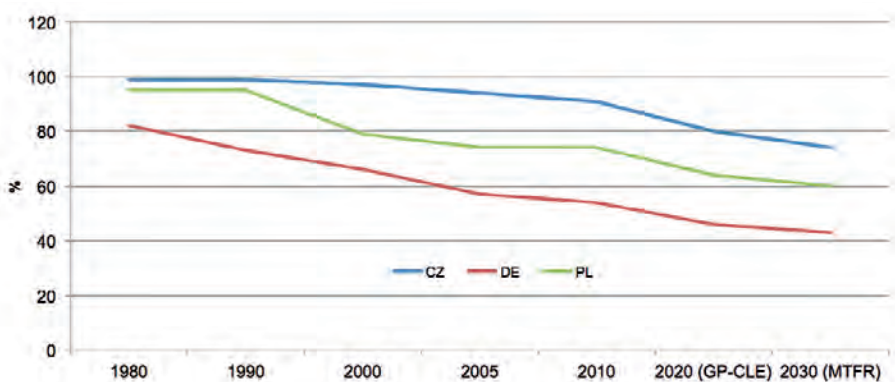
ładunków krytycznych w Polsce, Niemczech i Czechach. Od roku 2000 występuje nieznaczna tendencja spadkowa dla całkowitego obszaru objętego przekroczeniem ładunków krytycznych eutrofizacji. Jednak emisja tlenków azotu i amoniaku nadal pozostaje głównym czynnikiem przyczyniającym się do przekroczonego poziomu zakwaszenia i eutrofizacji. Stąd, we wszystkich trzech krajach ponad 50% ekosystemów będzie zagrożonych eutrofizacją w roku 2020.

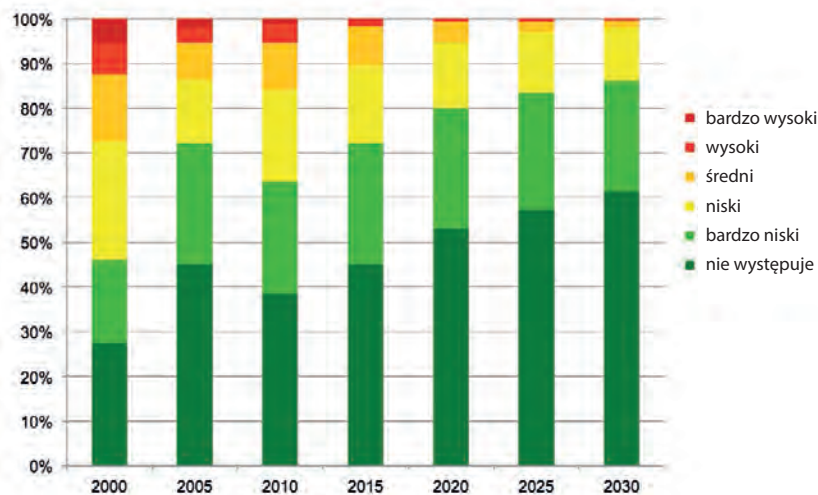
Powyższe dane, dla indywidualnych krajów, są zgodne z wynikami uzyskanymi dla obszaru projektu KLAPS. Od roku 2000 obserwuje się zmniejszenie zanieczyszczeń eutrofizujących. Jednak w roku 2010 ponad 60% powierzchni ekosystemów jest zagrożonych eutrofizacją. W okresie objętym scenariuszami depozycji (rok 2030) zagrożenie eutrofizacją będzie ciągle aktualne. Obliczono, że w roku 2030 będzie ono dotyczyło 38.6% obszaru.

Ryc. 61
Trend zmian przekroczeń ładunków krytycznych zakwaszenia



Ryc. 62
Obszar zagrożony eutrofizacją w Polsce (PL), Niemczech (DE) i Czechach (CZ) (CCE 2012, WEG 2013)





Ryc. 63
Trend przekroczeń
ładunków krytycznych
dla eutrofizacji

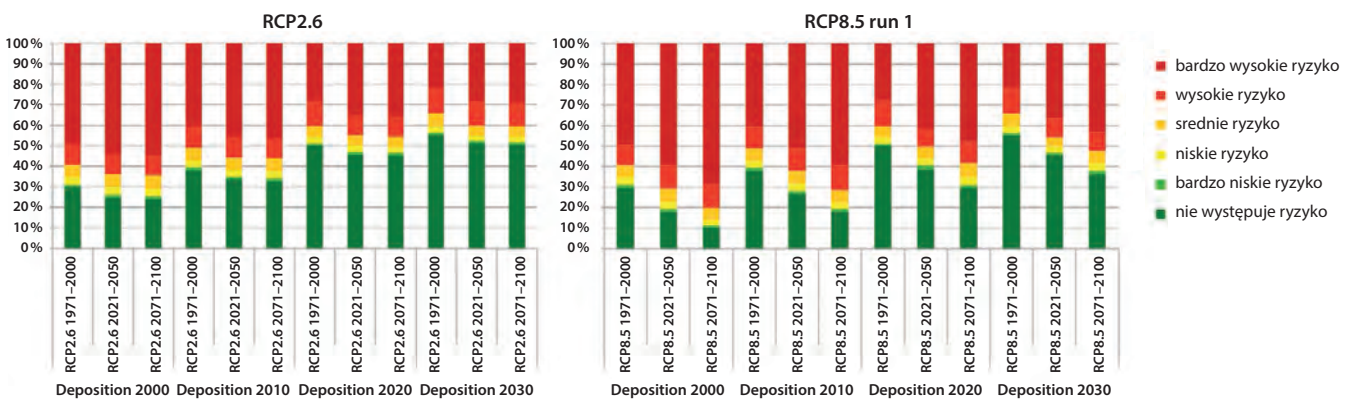
Ocena skutków zanieczyszczeń powietrza i zmian klimatu na zagrożenie ekosystemów

Na obszarze objętym projektem, największym problemem w przyszłości będzie eutrofizacja. Stąd, kolejne analizy skupiają się na problemie zagrożenia eutrofizacją. Do oceny wpływu warunków klimatycznych i jakości powietrza na CL ekosystemów, brany jest pod uwagę potencjał zagrożenia eutrofizacją związany z depozycją zanieczyszczeń i klimatem. Rycina 64 przedstawia depozycję zanieczyszczeń dla lat 2000–2030, jak również warunki klimatologiczne dla okresu 1971–2000, 2021–2050 oraz 2071–2100 dla projekcji RCP2.6 i RCP8.5.

Oba scenariusze wskazują, że do roku 2030 wzrasta powierzchnia obszarów bezpiecznych (bez przekroczeń CL), wraz ze zmniejszającą się depozycją

zanieczyszczeń, przy założeniu stałych warunków klimatologicznych (1971–2000). Trend ten jest silniejszy dla projekcji RCP8.5 w porównaniu z RCP2.6. Jednak uwzględniając zmiany klimatu w latach 2021–2050 oraz 2071–2100 obszar zagrożonych ekosystemów w obrębie KLAPS wzrasta. Dla scenariusza RCP2.6 (scenariusz optymistyczny) powierzchnia obszarów bezpiecznych stanowi 50%, jednak dla RCP8.5 (scenariusz pesymistyczny) powierzchnia ta jest stała, na poziomie 37% do końca XXI wieku. Podsumowując, przy uwzględnieniu zmian depozycji zanieczyszczeń oraz zmian klimatu, do końca XXI wieku 50 do 60% ekosystemów będzie zagrożonych eutrofizacją w obszarze granicznym polsko-saksońskim.

Ryc. 64
Klasy ryzyka eutrofizacji ekosystemów w podziale na zastosowane dane dotyczące depozycji i scenariusze klimatu, RCP2.6 (lewy) i RCP8.5 (prawy)



Porównanie z innymi badaniami

Wyniki badań zostały porównane z opracowaniem MILLA et al. (2013). Ryc. 65 pokazuje porównanie polskich i niemieckich wyników dla $CL_{max}S$ i $CL_{nut}N$. Wyniki uzyskane dla $CL_{max}S$ są zbliżone, jednak dane polskie wskazują wyższy procent dla wrażliwych ekosystemów. Dane niemieckie dla wyższych wartości $CL_{max}S$ są niższe w porównaniu do polskich. Bardzo dobrą zgodność osiągnięto dla $CL_{nut}N$. Nieco wyższe CL w niższym zakresie wartości ($5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) są prawdopodobnie wynikiem uwzględnienia w opracowaniu niemieckim azotu jako składnika pokarmowego.

Oba opracowania wskazują na spadek $CL_{max}S$ i brak zagrożenia zakwaszeniem dla prawie wszystkich ekosystemów do roku 2030. Wpływ zmian klimatu jest nieznaczny. W przypadku $CL_{nut}N$, obliczenia przeprowadzone przez stronę polską i niemiecką wskazują, że w roku 2010 dla 60% powierzchni ekosystemów miało miejsce przekroczenie CL. Pomimo prognozowanej redukcji emisji zanieczyszczeń, dla ok. 40% powierzchni ekosystemów

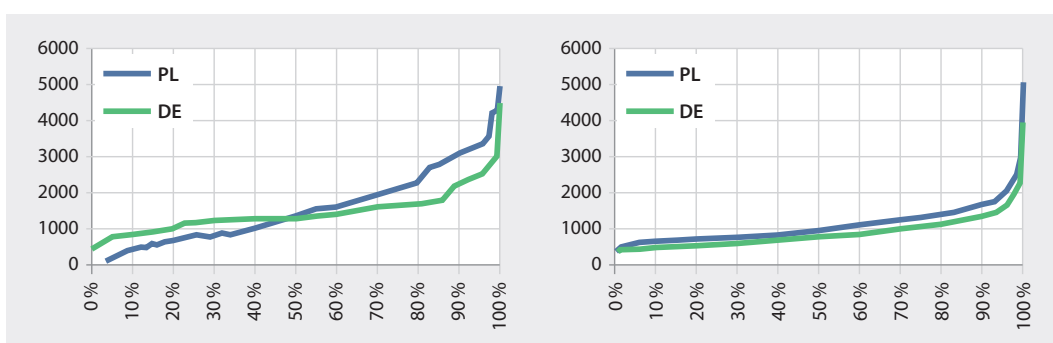
wystąpi przekroczenie CL do roku 2030. Ponadto, wyniki obu prac wskazują, że większej wrażliwości na zmiany klimatu w domenie projektu można spodziewać się dla depozycji azotu.

Pierwsze analizy wpływu klimatu na CL dla Saksonii zostały przeprowadzone w 2010 roku (SCHLUTOW et al. 2010). Podstawą dla tego opracowania były scenariusze klimatu „A1B wet” i „A1B dry”. Podobnie do wyników projektu KLAPS, wskazano na znikomy wpływ klimatu na $CL_{max}S$ w XXI w w odniesieniu do warunków w okresie 1971–2100, podczas gdy większy jego wpływ odnotowano dla $CL_{nut}N$. Jednak w bieżącym opracowaniu obliczona wrażliwość na eutrofizację jest wyższa.

Prace dla obszaru Europy podają prognozy bezpiecznych (bez przekroczeń CL) ekosystemów do roku 2020 (CCE 2013). Na rycinie 66 porównano procent bezpiecznych ekosystemów pod względem CL dla zakwaszenia dla Niemiec, Polski i Czech w 2020 z wynikami KLAPS dla różnych scenariuszy klimatu i okresów. Pozwala to zauważyć, że większość ekosystemów w granicach projektu KLAPS

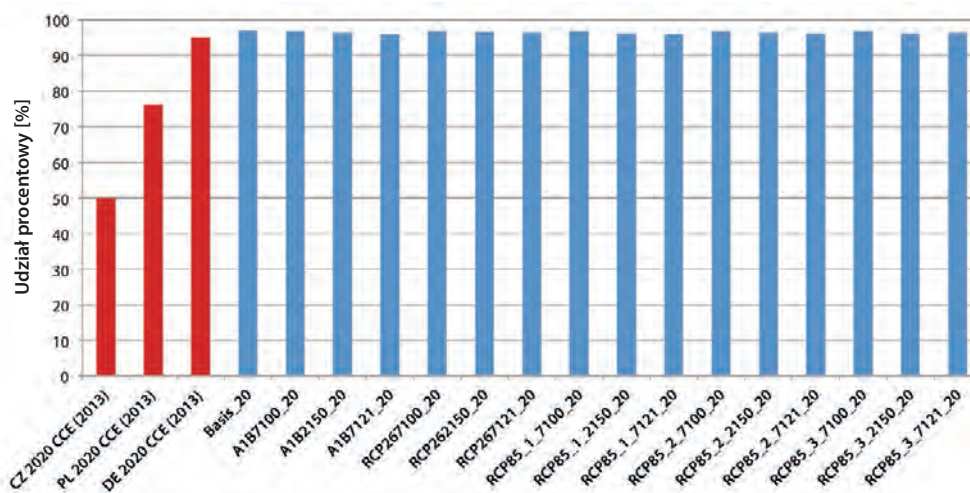
Ryc. 65

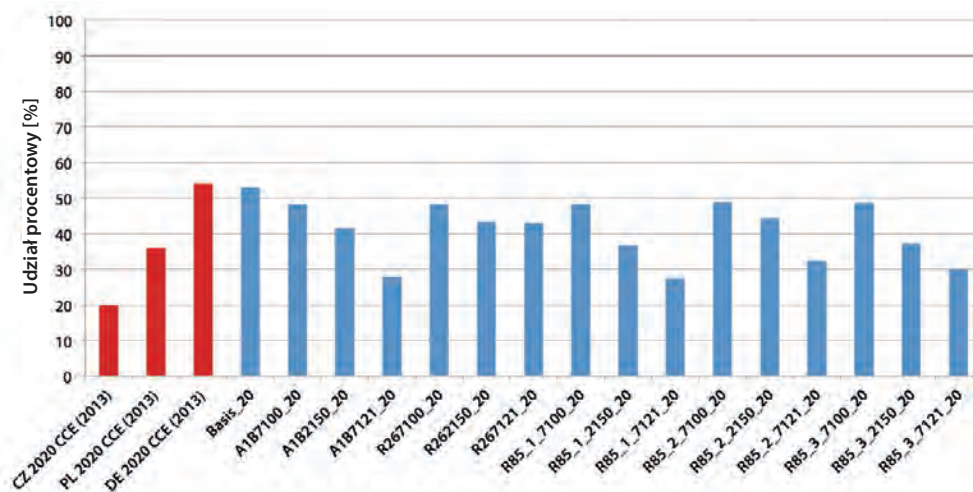
Porównanie wyników $CL_{max}S$ (lewy) i $CL_{nut}N$ (prawy) z opracowania niemieckiego i polskiego (MILL et al. 2013)



Ryc. 66

Udział obszarów bezpiecznych (bez przekroczeń CL dla zakwaszenia) dla Niemiec (DE), Polski (PL) i Czech (CZ) w 2020 roku w porównaniu do wyników projektu KLAPS dla różnych scenariuszy klimatu i okresów





Ryc. 67
Procent obszarów bezpiecznych (bez przekroczeń CL dla eutrofizacji) dla Niemiec (DE), Polski (PL) i Czech (CZ) w 2020 roku w porównaniu do wyników projektu KLAPS dla różnych scenariuszy klimatu i okresów

jest niezagrożonych zakwaszeniem (ok. 90%), jednak dla Polski, a szczególnie dla Czech, ryzyko zakwaszenia jest znacząco wyższe.

W przypadku eutrofizacji poprawa jakości ekosystemów dla wszystkich trzech krajów, jak również w zakresie KLAPS jest względnie niska (w porównaniu do CL dla zakwaszenia). W najlepszym przypadku tylko 50% ekosystemów nie jest zagrożona eutrofizacją. W Czechach i Polsce powierzchnia bezpiecznych ekosystemów jest nawet mniejsza i wynosi odpowiednio 20 i 36%. Obliczono, że w związku ze zmianami klimatu nastąpi redukcja obszarów bezpiecznych o 20% dla okresu 2071–2100 dla scenariuszy A1B i RCP8.5.

Wnioski

W ostatnich dziesięcioleciach podjęto ogromne starania zmierzające do zmniejszenia ilości zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. Efekty tych wysiłków można również zaobserwować w rejonie projektu KLAPS. Tylko dla 10% powierzchni obszaru mamy do czynienia z nadmiernym zakwaszeniem w roku 2010, a dalsza poprawa sytuacji jest przewidywana do roku 2030. Innymi słowy ekosystemy w zakresie KLAPS będą w małym stopniu zagrożone zakwaszeniem, jeżeli sprawdzą się przewidywania dotyczące redukcji depozycji siarki i azotu.

Wyniki obliczeń dla przekroczeń ładunków krytycznych eutrofizacji są mniej optymistyczne. Obecnie (rok 2010) przekroczenia ładunków krytycznych eutrofizacji dotyczą ponad 60% powierzchni

ekosystemów. Nawet w przypadku wystąpienia pozytywnego scenariusza, w 2030 roku przekroczenie CL będzie dotyczyło 40% powierzchni, co jest dalekie od zasadniczego celu, jakim jest ochrona całości ekosystemów. Cel ten jest zapisany w Konwencji o bioróżnorodności i obecne działania są niewystarczające do jego osiągnięcia.

Należy brać pod uwagę współoddziaływanie pomiędzy zmniejszeniem depozycji wynikającym z polityki ochrony środowiska i zmian klimatu. Wzrost temperatury i zmniejszenie sumy opadów prowadzi do wzrostu wrażliwości ekosystemów na depozycję azotu do końca XXI w. Podsumowując, obecne wyniki pokazują, że wpływy zanieczyszczeń i zmian klimatu kompensują się. W związku z redukcją emisji wzrasta powierzchnia ekosystemów bezpiecznych (bez przekroczeń CL) pomiędzy rokiem 2000 i 2030. Biorąc pod uwagę zmiany klimatu w okresie 2021–2050 i 2071–2100, w odniesieniu do okresu referencyjnego 1971–2000, ich powierzchnia zmniejsza się. Najbardziej negatywne efekty dla środowiska są prognozowane dla projekcji RCP8.5, podczas gdy dla projekcji RCP2.6 wzrost wrażliwości ekosystemów jest mniej znaczący. Przeciętnie, różnice w ładunkach krytycznych dla eutrofizacji między tymi scenariuszami sięgają ok 3 kg ha⁻¹ a⁻¹.

Szacunkowo, wpływ redukcji emisji na ochronę ekosystemów będzie dwukrotnie mniejszy niż wynikałoby to z wartości zmian samej emisji, ponieważ będzie kompensowany przez zmiany warunków klimatycznych. Przyszłe ograniczenia dotyczące zanieczyszczeń powietrza powinny brać to pod uwagę.

Spis literatury

Część A

- ALCAMO J., MORENO J.M., NOVAKY B., BINDI M., COROBOV R., DEVOY R.J.N., GIANNAKOPOULOS C., MARTIN E., OLESEN J.E., SHVIDENKO A., 2007, Europe. Climate change 2007. W: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pr. zbior. Red. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. Cambridge. Cambridge University Press, 541–580.
- 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 S, 291 S.
- 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, 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, s. 1535.
- 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. Dessau: 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, s. 35.
- 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.
- 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, s. 160; http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf.
- MATZARAKIS A., 2007, Assessment method for climate and tourism based on daily data, [W:] A. Matzarakis, C.R. de Freitas, D. Scott (ed.), *Developments in tourism climatology*.
- MEHLER, S., VÖLLINGS, A., FLÜGEL, I., SZYMANOWSKI, M., BŁAŚ, M., SOBIK, M., MIGAŁA, K., WERNER, M., KRYZA, M., MISZUK, B., OTOPI, 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, s. 80.*
- MICHALSKA, B., 2011, Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce. *Prace i Studia Geograficzne*. T. 47, 67–75.
- MIGAŁA K., 2005, Piętra klimatyczne w górach Europy a problem zmian globalnych, *Acta Univ. Wratisl.*, 2718, *Studia Geograficzne* 78, Wyd. Uni. Wroc., s. 140.
- MOBERG, A., et al., 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*, s. 36.
- 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, s. 144.
- 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, s. 223.
- 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.
- 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, s. 4.
- 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), 377–389.

Część 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 Trans-boundary 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 wind-rose for the British Isles using radiosonde data, and application to an atmospheric transport model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (2006), 132, 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_emeppdatabase/emissions_emeppmodels/
- 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.
- 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.
- 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/>
- 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-MSC-W chemical transport model – technical description, *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 7825–2865.
- 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, s. 32.
- SZYMANOWSKI M., KRYZA M., SPALLEK W., 2013, Regression-based air temperature spatial prediction models: an example from Poland. *Meteorologische Zeitschrift* (in press).



Część 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>), Veröffentlichung 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, s. 61.

SCHLUTOW, A., NAGEL, H.-D., SCHEUSCHNER, T., WEIGELT-KIRCHNER, A., LfULG (Hrsg.), 2010, Ökologische Belastungsgrenzen unter Einfluss des Klimawandels. LfULG Schriftenreihe, Heft 12, Dresden, s. 134.



Spis rysunków

Ryc. 1	
Rekonstrukcja średniej temperatury powietrza i opadu dla 3,8 miliarda lat.	
E = epoka lodowcowa, E (podkreślone) = epoka lodowcowa z rozwojem pokrywy lądolodu na obu polach podbiegunowych, W = ocieplenie klimatu i brak pokrywy lądolodu (ze zmianami, za SCHÖNWIESE 1992)	7
Ryc. 2	
Zmiany parametrów orbity ziemskiej (cykl Milankowicia): a) precesja; orbita jest mniej lub bardziej ekscentryczna, b) odchylenie osi ziemskiej zmieniające się w przedziale pomiędzy 21,5° a 24,5°, c) mimośród; stosownie do nachylenia osi ziemskiej, północna lub południowa półkula zwraca się w stronę Słońca (modyfikacja własna, za IPCC 2007)	8
Ryc. 3	
(a) Anomalie średniej globalnej temperatury powietrza, przyjmując jako poziom wyjściowy rok 1901, wielkości zmierzone (czarna linia, HadCRUT3a) oraz uzyskane z symulacji uwzględniających czynniki o genezie antropogenicznej oraz naturalnej. Gruba czerwona linia pokazuje wielkości uśrednione z wielu różnych modeli, a cienkie linie jasno-brązowe odnoszą się do wskazań indywidualnych modeli. Pionowa szara linia wyznacza momenty ważnych erupcji wulkanicznych;	
(b) tak jak w przypadku (a), ale z uwzględnieniem tylko czynników naturalnych, bez anomalii średniej globalnej temperatury powietrza. Gruba niebieska linia pokazuje wielkości uśrednione z kilku modeli, a cienkie i jasno-niebieskie linie odnoszą się do wskazań indywidualnych modeli (IPCC 2007)	8
Ryc. 4	
Liczba klęsk żywiołowych wywołanych czynnikami naturalnymi w okresie 1900–2012 (EM-DATA: OFDA/CRED International Disaster Database, www.emdat.be)	9
Ryc. 5	
Uproszczony schemat procesu skalowania GCM – globalne modele cyrkulacji, RCM – regionalne modele klimatyczne; Giorgi 2008)	11
Ryc. 6	
Schemat ilustrujący 4 scenariusze wg raportu IPCC (Special Report on Emission Scenarios; rycina zmodyfikowana, za NAKICENOVIC & SWART 2000)	12
Ryc. 7	
Wymuszenie radiacyjne w scenariuszach SRES i RCP do 2100 roku w odniesieniu do poziomu przedindustrialnego (za IPCC 2013)	12
Ryc. 8	
Zasada klasyfikacji warunków cyrkulacyjnych Generator pogody	14
Ryc. 9	
Klasyfikacja wybranych scenariuszy i modeli klimatycznych	15
Ryc. 10	
Roczny przebieg temperatury powietrza [°C] w okresie 1971–2000 (górze) oraz zmiana względem obserwacji 1971–2000 (dół) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 oraz pomiarów (Beo) w obszarze badań projektu; oznaczenia: TM – średnia, TX – maksymalna, TN – minimalna temperatura powietrza	16
Ryc. 11	
Zmiana średniej rocznej temperatury powietrza [°C] 1971–2100 względem okresu 1971–2000 dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 w regionie badań projektu (linia przerywana/kropki – przedział ufności, linia przerywana – trend liniowy, linia ciągła – 11-letnia średnia konsekwentna, szary obszar – zakres zmian dla wszystkich realizacji)	17
Ryc. 12	
Przebieg roczny temperatury powietrza [°C] w okresie 2021–2050 (po lewej) i 2071–2100 (po prawej) oraz zmiana względem obserwacji z okresu 1971–2000 (dół) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 w obszarze badań projektu	18



Ryc. 13 Rozkład rocznych i sezonowych zmian temperatury powietrza [°C] w okresach 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu 1971–2000 w obszarze badań projektu (gruba czarna linia – mediana, prostokąt – 50% danych, poziome linie poniżej i powyżej prostokąta – minimum/maksimum z serii czasowej, kropki – wartości odstające)	19
Ryc. 14 Zmiana średniej rocznej i sezonowej temperatury powietrza [°C] w wieloletciu 2021–2050 oraz 2071–2100 w porównaniu do okresu 1971–2000 dla scenariuszy A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5 (przebieg 1,2,3) w obszarze badań projektu	22
Ryc. 15 Zakres symulowanych zmian liczby dni charakterystycznych i sumy chłodu w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 dla stacji Goerlitz, dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 (przebiegi 1,2,3) (gruba czarna linia – mediana, prostokąt – 50% danych, poziome linie poniżej i powyżej prostokąta – minimum/maksimum z serii czasowej, kropki – wartości odstające)	24
Ryc. 16 Zmiana liczby dni charakterystycznych w okresach 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu 1971–2000 w obszarach nizinnych (po lewej) oraz w górach (po prawej) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 i RCP8.5 (przebiegi 1,2,3), gdzie SU25 – dni gorące, HD30 – dni upalne, TN20 – noce gorące, FD – dni przymrozkowe, ID – dni mroźne	25
Ryc. 17 Zmiany wskaźnika sum chłodu w zależności od wysokości bezwzględnej w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 dla scenariuszy A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5 (przebieg 1,2,3)	27
Ryc. 18 Zmiana częstości występowania fal ciepła oraz czasu trwania okresu przymrozkowego i bezprzymrozkowego w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 dla obszarów nizinnych (lewy) oraz dla gór (prawy) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5 (przebieg 1,2,3)	28
Ryc. 19 Różnice wskaźnika GDD pomiędzy okresem referencyjnym (1971–2000) oraz scenariuszami na lata 2021–2050 i 2071–2100 (odpowiednio: SRES A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5)	29
Ryc. 20 Przebieg wskaźnika GDD w stacjach reprezentujących 4 piętra wysokościowe (Tab. 9) w okresie referencyjnym (1971–2000) oraz wyznaczony na podstawie scenariuszy zmian klimatu do roku 2100: A) SRES A1B, B) RCP2.6 oraz C) RCP8.5	30
Ryc. 21 Różnice wskaźnika SAT pomiędzy okresem referencyjnym (1971–2000) oraz scenariuszami na lata 2021–2050 i 2071–2100 (odpowiednio: SRES A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5)	31
Ryc. 22 Przebieg wskaźnika SAT w stacjach reprezentujących 4 piętra wysokościowe (Tab. 9) w okresie referencyjnym (1971–2000) oraz wyznaczony na podstawie scenariuszy zmian klimatu do roku 2100: A) SRES A1B, B) RCP2.6 oraz C) RCP8.5	32
Ryc. 23 Sygnał różnic wskaźnika HTC w obszarze projektu w horyzoncie czasowym 2021–2050 oraz 2071–2100 w scenariuszach emisyjnych: A1B (lewa strona), RCP2.6 (środek) i RCP8.5 (prawa strona)	33
Ryc. 24 Przebieg prognozowanych średnich rocznych wartości UTCI dla lat 1971–2100 dla scenariuszy: A1B, RCP2.6 i RCP8.5 na wybranych stacjach meteorologicznych	34

Ryc. 25	
Zmiana częstości występowania dni z poszczególnymi obciążeniami cieplnymi dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000) dla scenariusza A1B; obciążenia cieplne: 1-nieznosny stres gorąca, 2-bardzo silny stres gorąca, 3-silny stres gorąca, 4-umiarkowany stres gorąca, 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	35
Ryc. 26	
Zmiana częstości występowania dni z poszczególnymi obciążeniami cieplnymi dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000) dla scenariusza RCP2.6 (objaśnienia klas obciążeń cieplnych – patrz ryc. 25)	36
Ryc. 27	
Zmiana częstości występowania dni z poszczególnymi obciążeniami cieplnymi dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000) dla scenariusza RCP8.5 (objaśnienia klas obciążeń cieplnych – patrz ryc. 25)	37
Ryc. 28	
Zmiana wartości wskaźnika WSI dla kąpeli słonecznych w Goerlitz (238 m n.p.m.) i na Śnieżce (1603 m n.p.m.) dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000), dla scenariuszy: a) A1B, b) RCP2.6, c) RCP8.5	38
Ryc. 29	
Zmiana wartości wskaźnika WSI dla kąpeli słonecznych w Goerlitz (238 m n.p.m.) i na Śnieżce (1603 m n.p.m.) dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000), dla scenariuszy: a) A1B, b) RCP2.6, c) RCP8.5	39
Ryc. 30	
Zmiana wartości wskaźnika WSI dla łagodnych form rekreacji w Goerlitz (238 m n.p.m.) i na Śnieżce (1603 m n.p.m.) dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000), dla scenariuszy: a) A1B, b) RCP2.6, c) RCP8.5	41
Ryc. 31	
Zmiana wartości wskaźnika WSI dla intensywnych form rekreacji w Goerlitz (238 m n.p.m.) i na Śnieżce (1603 m n.p.m.) dla bliższej (2021 – 2050) i dalszej (2071 – 2100) przyszłości a okresem referencyjnym (1971 – 2000), dla scenariuszy: a) A1B, b) RCP2.6, c) RCP8.5	42
Ryc. 32	
CTIS dla Lindenbergu (po lewej) i Śnieżki (po prawej) dla scenariusza A1B, na podstawie projekcji; od góry: a) okres referencyjny, dane z modelu (1971 – 2000); b) bliższa przyszłość (2021 – 2050); c) dalsza przyszłość (2071 – 2100) (objaśnienia kryteriów: cold – stres zimna, hot – stres gorąca, comfort – warunki termoneutralne, $N < 5/8$ – zachmurzenie mniejsze niż 5/8, $U > 93\%$ - wilgotność względna większa niż 93 %, $e > 18hPa$ – dni parne, $RR < = 1mm$ – dni suche, $RR > 5 mm$ – dni wilgotne, $v > 8m/s$ – dni wietrzne)	43
Ryc. 33	
CTIS dla Lindenbergu (po lewej) i Śnieżki (po prawej) dla: a) okresu referencyjnego, dane z modelu (1971 – 2000), b) bliższej (2021 – 2050) i c) dalszej (2071 – 2100) przyszłości dla scenariusza RCP2.6 (objaśnienia kryteriów – patrz. ryc. 32)	44
Ryc. 34	
CTIS dla Lindenbergu (po lewej) i Śnieżki (po prawej) dla a) okresu referencyjnego, dane z modelu (1971 – 2000), b) bliższej (2021 – 2050) i c) dalszej (2071 – 2100) przyszłości dla scenariusza RCP8.5 (objaśnienia kryteriów – patrz. ryc. 32)	45



Ryc. 35 Las w Karkonoszach zniszczony w wyniku nadmiernej depozycji związków zakwaszających (autor: MAREK BŁAS, 02.10.2013)	49
Ryc. 36 Domena modelu FRAME dla projektu KLAPS i klasy użytkowania terenu zastosowane w modelu	50
Ryc. 37 Emisja z emitorów powierzchniowych tlenków azotu (lewa strona) i siarki dla roku 2010, wykorzystana w projekcie KLAPS i modelu FRAME	53
Ryc. 38 Emisja SO ₂ , NO _x i NH ₃ w domenie KLAPS w okresie 2000 – 2030	54
Ryc. 39 Różne średniej częstości wiatru (A) i średniej harmonicznej prędkości wiatru (B) dla domeny projektu dla lat 2010 i 1996 – 2009, przygotowane na podstawie radiosondaży (średnia z poziomów 850 – 950 hPa)	55
Ryc. 40 Roczna suma opadu w domenie KLAPS w roku 2010	56
Ryc. 41 Sieć stacji pomiarowych dla chemizmu opadu	57
Ryc. 42 Diagramy rocznych depozycji siarczanów z opadów atmosferycznych mokrych w wieloletniu 1999 – 2011 dla wybranych stacji badawczych	58
Ryc. 43 Diagramy rocznych depozycji azotu azotanowego z opadów atmosferycznych mokrych w wieloletniu 1999 – 2011 dla wybranych stacji badawczych	59
Ryc. 44 Diagramy rocznych depozycji jonów wodorowych z opadów atmosferycznych mokrych w wieloletniu 1999 – 2011 dla wybranych stacji badawczych	59
Ryc. 45 Diagramy rocznych depozycji azotu amonowego z opadów atmosferycznych mokrych w wieloletniu 1999 – 2011 dla wybranych stacji badawczych zlokalizowanych w obszarze domeny projektu KLAPS	60
Ryc. 46 Porównanie mokrej depozycji związków azotu i siarki [kg N/S ha ⁻¹] obliczonej przez FRAME z pomiarami; R ² – współczynnik determinacji, N – liczba stacji pomiarowych	61
Ryc. 47 Mokra depozycja siarki (górną wiersz), tlenków azotu (środkowy) i azotu amonowego (dolny) obliczona przez FRAME (lewa kolumna) i IMGW-PIB (prawa)	63
Ryc. 48 Bilans suchej i mokrej depozycji dla związków siarki i azotu obliczony w oparciu o wyniki modeli FRAME (czarny kolor) o EMEP (szary) dla roku 2010	64
Ryc. 49 Sucha (lewa kolumna) i mokra (prawa) depozycja siarki (górną wiersz), tlenków azotu (środkowy) i azotu amonowego (dolny) w roku bazowym 2010	66
Ryc. 50 Całkowita depozycja siarki (górną wiersz) i azotu zredukowanego (dolny) w roku 2000 (lewa kolumna) i 2010 (prawa)	67

Ryc. 51	Całkowita depozycja siarki (górną wiersz) i azotu zredukowanego (dolny) dla emisji z roku 2020 (lewa kolumna) i 2030 (prawa)	68
Ryc. 52	Bilans depozycji związków siarki i azotu w domenie projektu KLAPS w latach 2010–2030	68
Ryc. 53	Bilans depozycji siarki dla różnych scenariuszy zmian klimatu i dla emisji w roku 2020 (lewa strona) i 2030 (prawa)	69
Ryc. 54	Ładunki krytyczne w polityce czystego powietrza	71
Ryc. 55	Typy ekosystemów, dla których obliczono ładunki krytyczne, za CORINE 2006	72
Ryc. 56	Wydajność wietrzenia kationów zasadowych	72
Ryc. 57	Trend depozycji w domenie projektu KLAPS (względem roku 2000)	73
Ryc. 58	CL dla siarki (CL _{maxS}) przygotowane w oparciu o dane klimatologiczne dla okresu referencyjnego 1971–2000	74
Ryc. 59	CL dla azotu (CL _{nutN}) przygotowane w oparciu o dane klimatologiczne dla okresu referencyjnego 1971–2000	74
Ryc. 60	Zmiany ładunków krytycznych dla scenariusza RCP2.6 oraz RCP8.5 (symulacja 1)	75
Ryc. 61	Trend zmian przekroczeń ładunków krytycznych zakwaszenia	76
Ryc. 62	Obszar zagrożony eutrofizacją w Polsce (PL), Niemczech (DE) i Czechach (CZ) (CCE 2012, WEG 2013)	76
Ryc. 63	Trend przekroczeń ładunków krytycznych dla eutrofizacji	77
Ryc. 64	Klasy ryzyka eutrofizacji ekosystemów w podziale na zastosowane dane dotyczące depozycji i scenariusze klimatu, RCP2.6 (lewy) i RCP8.5 (prawy)	77
Ryc. 65	Porównanie wyników CL _{maxS} (lewy) i CL _{nutN} (prawy) z opracowania niemieckiego i polskiego (MILL et al. 2013)	78
Ryc. 66	Udział obszarów bezpiecznych (bez przekroczeń CL dla zakwaszenia) dla Niemiec (DE), Polski (PL) i Czech (CZ) w 2020 roku w porównaniu do wyników projektu KLAPS dla różnych scenariuszy klimatu i okresów	78
Ryc. 67	Procent obszarów bezpiecznych (bez przekroczeń CL dla eutrofizacji) dla Niemiec (DE), Polski (PL) i Czech (CZ) w 2020 roku w porównaniu do wyników projektu KLAPS dla różnych scenariuszy klimatu i okresów	79



Spis tabel

Tabela 1 Lista największych klęsk żywiołowych w Polsce i Niemczech w okresie 1900–2014, uporządkowanych według malejącej liczby poszkodowanych (źródło: EM-DATA: OFDA/CRED International Disaster Database, www.emdat.be)	10
Tabela 2 Charakterystyka regionalnego modelu klimatycznego WETTREG	13
Tabela 3 Scenariusz zakresu zmian rocznej i sezonowej temperatury powietrza w okresie 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu 1971–2000 dla różnych przedziałów wysokościowych	20
Tabela 4 Średnia liczba dni charakterystycznych pod względem termicznym w wieloletiu 1971–2000 (dane z modelu)	24
Tabela 5 Zmiany częstości występowania dni charakterystycznych pod względem termicznym w zależności od wysokości bezwzględnej w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000	26
Tabela 6 Klasyfikacja surowości zim (SMUL 2008)	26
Tabela 7 Zmiany wskaźnika sum chłodu w zależności od wysokości bezwzględnej w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 oraz średnia suma chłodu [°C] w okresie 1971–2000 (dane z modelu)	26
Tabela 8 Zmiana częstości występowania fal ciepła oraz czasu trwania okresu przymrozkowego i bezprzymrozkowego w zależności od wysokości bezwzględnej w okresach: 2021–2050 i 2071–2100 w porównaniu do okresu referencyjnego 1971–2000 oraz wartości średnie dla okresu 1971–2000 (dane z modelu) dla scenariuszy A1B, RCP2.6 oraz RCP8.5 (przebieg 1,2,3)	27
Tabela 9 Stacje reprezentujące poszczególne piętra wysokościowe	29
Tabela 10 Charakterystyczne przedziały wartości wskaźnika HTC	33
Tabela 11 Podsumowanie inwentaryzacji emisji dla Polski wg raportu KASHUE (KOBIZE 2012), udział sektora w całkowitej emisji krajowej oraz część emisji włączona do modelowania z FRAME	51
Tabela 12 Podsumowanie inwentaryzacji emisji dla Saksonii dla roku 2010, udział sektora w całkowitej emisji i część emisji z danego sektora włączona do modelowania z FRAME 10	52
Tabela 13 Całkowita masa SO ₂ , NO _x i NH ₃ wyemitowana w domenie projektu KLAPS w roku 2010	54
Tabela 14 Stacje monitoringu chemizmu opadów atmosferycznych rejonu domeny projektu KLAPS	57
Tabela 15 Statystyki błędów dla modelu FRAME (mokra depozycja) dla roku bazowego 2010	61
Tabela 16 Podsumowanie danych wejściowych wykorzystanych w symulacjach modelu FRAME	64
Tabela 17 Podsumowanie zależności zmian CL od projekcji klimatu	75

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

Zdjęcie na okładce:

Coal-fired Power Station Jaenschwalde (iStock photo)
Forest (Andreas Völlings)
Cloudy sky (Robert Kneschke)

Przygotowanie do druku:

Hoch3 GmbH, Berlin

Druk:

Laserline, Berlin

Data wydania:

13.11.2014

Nakład:

200 egzemplarzy

Papier:

Papier certyfikowany ekologicznie

Publikacja może być uzyskana nieodpłatnie z:

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

Informacje ogólne:

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.

ISBN 978-83-64979-00-2

