

Gmina Miasto Reda
ul. Gdańska 33, 84-240 Reda



Załącznik 2

Miejski Plan Adaptacji do zmian klimatu dla Gminy Miasto Reda

DIAGNOZA

Ekspozycja Miasta Redy na zagrożenia klimatyczne

Opracowali

Anna Romańczak
Agnieszka Kuśmierz
Maciej Jefimow
Maria Kłeczek
Aleksandra Starzomska
Izabela Potapowicz
Michał Marcinkowski
Klaudia Chruściel
Olga Hańcz
Patrycja Zajęc

Z up. BURMISTRZA MIASTA
mgr inż. Dominika Kudlińska

Zastępcą Burmistrza Miasta
(dokument podpisany elektronicznie)

Reda, Warszawa, 2024

SPIS TREŚCI

1	Wprowadzenie.....	4
2	Obserwowane zmiany warunków klimatycznych.....	7
2.1	Uwagi metodyczne	7
2.2	Warunki termiczne	8
2.2.1	Średnia roczna temperatura powietrza.....	8
2.2.2	Średnia miesięczna temperatura powietrza	9
2.2.3	Temperatura maksymalna.....	9
2.2.4	Temperatura minimalna.....	11
2.2.5	Dni gorące.....	12
2.2.6	Dni upalne.....	13
2.2.7	Fale upałów	14
2.2.8	Noce tropikalne	14
2.2.9	Fale chłodu	15
2.2.10	Dni mroźne	17
2.2.11	Dni bardzo mroźne	17
2.2.12	Dni z temperaturą przejściową.....	18
2.2.13	Dni i okresy przymrozkowe	19
2.2.14	Dni wegetacyjne	20
2.3	Warunki termiczno-opadowe	21
2.3.1	Dni z temperaturą powietrza w przedziale od -5°C do +2,5°C i jednoczesnym wystąpieniem opadów atmosferycznych	21
2.4	Warunki pluwialne (opady atmosferyczne).....	22
2.4.1	Sumy roczne i miesięczne opadów.....	22
2.4.2	Maksymalne dobowe opady w miesiącu	23
2.4.3	Dobowe opady o dużym natężeniu	23
2.4.4	Długotrwałe okresy bezopadowe.....	26
2.5	Warunki anemometryczne	28
2.5.1	Silny i bardzo silny wiatr	28
2.5.2	Burze.....	28
2.6	Pokrywa śnieżna i opady śniegu	30
3	Prognozowane zmiany klimatu.....	31
3.1	Uwagi metodyczne	31
3.1.1	Wyniki modeli klimatu.....	33
3.1.2	Historyczne dane meteorologiczne	34
3.1.3	Statystyczne skalowanie projekcji klimatycznych (downscaling).....	34
3.1.4	Prognozowane zmiany temperatury i opadu	35
3.2	Prognozowane zmiany temperatury – średnie warunki termiczne.....	36
3.2.1	Średnia roczna temperatura powietrza.....	36
3.2.2	HDD – stopniodni z temperaturą średnią dobową < 18°C	37
3.2.3	Liczba dni wegetacyjnych (T _{sr} > 5°C).....	37
3.2.4	Temperatura średniomiesięczna	38
3.3	Prognozowane zmiany temperatury – fale upałów.....	41
3.3.1	Średnia roczna temperatura maksymalna	41
3.3.2	Liczba dni upalnych (T _{max} > 30°C) w roku	42
3.3.3	Liczba fal upałów (co najmniej 3 dni z T _{max} > 30°C) w dekadzie.....	42
3.3.4	Średnia długość trwania fal upałów	43
3.3.5	Liczba dni gorących (T _{max} > 25°C) w roku	44
3.3.6	Liczba okresów długości co najmniej 5 dni z T _{max} > 25°C w dekadzie	44
3.3.7	Liczba nocy tropikalnych (T _{min} > 20°C) w dekadzie.....	45

3.4	Prognozowane zmiany temperatury – fale chłodu.....	46
3.4.1	Średnia roczna temperatura minimalna.....	46
3.4.2	Liczba dni przymrozkowych ($T_{min} < 0^{\circ}C$) w roku	47
3.4.3	Liczba okresów przymrozkowych (co najmniej 5 dni z $T_{min} < 0^{\circ}C$) w dekadzie	47
3.4.4	Liczba dni mroźnych ($T_{max} < 0^{\circ}C$) w roku.....	48
3.4.5	Liczba dni bardzo mroźnych ($T_{min} < -10^{\circ}C$) w roku	49
3.4.6	Liczba fal chłodu (co najmniej 3 dni z $T_{min} < -10^{\circ}C$) w dekadzie	49
3.4.7	Liczba dni z przejściem przez $0^{\circ}C$ w roku	50
3.5	Prognozowane zmiany opadu – średnie warunki opadowe.....	51
3.5.1	Roczna suma opadu.....	51
3.5.2	Liczba dni z opadem dobowym wyższym od 1 mm.....	51
3.5.3	Liczba dni z opadem przy temperaturze od $-5^{\circ}C$ do $2,5^{\circ}C$	52
3.5.4	Miesięczna suma opadu	53
3.6	Prognozowane zmiany opadu – opad ekstremalny.....	55
3.6.1	Liczba dni z opadem dobowym powyżej 10 mm w dekadzie.....	55
3.6.2	Liczba dni z opadem dobowym powyżej 20 mm w dekadzie.....	56
3.6.3	Liczba dni z opadem dobowym powyżej 30 mm w dekadzie.....	57
3.6.4	Liczba dni z opadem dobowym powyżej 40 mm w dekadzie.....	58
3.6.5	Liczba dni z opadem dobowym powyżej 50 mm w dekadzie.....	58
3.6.6	Liczba dni z opadem dobowym powyżej 60 mm w dekadzie.....	59
3.6.7	Liczba dni z opadem dobowym powyżej 70 mm w dekadzie.....	60
3.6.8	Maksymalny opad dobowy w miesiącu.....	61
3.7	Wskaźniki suszy.....	63
3.7.1	Liczba dni bez opadu w roku	63
3.7.2	Liczba okresów bez opadu długości co najmniej 5 dni w dekadzie.....	64
3.7.3	Najdłuższy okres bez opadu	65
4	Zmiany warunków hydrologicznych	65
4.1	Obserwowane zmiany warunków hydrologicznych	65
4.1.1	Niżówki	67
4.1.2	Wezbrania.....	73
4.2	Prognozowane zmiany warunków hydrologicznych.....	76
5	Podsumowanie: najważniejsze zagrożenia klimatyczne dla Miasta Redy	80
5.1	Obserwowane zmiany warunków klimatycznych i klimatycznych	80
5.2	Prognozowane zmiany klimatu miasta	81
5.3	Zagrożenia klimatyczne.....	82
6	Literatura i wykorzystane materiały	84
	Spis rysunków.....	85
	Spis tabel	88

1 Wprowadzenie

Niniejszy załącznik do Diagnozy, przedstawiający Ekspozycję Miasta Redy na zagrożenia klimatyczne, odnosi się do zmian wartości temperatury i wysokości opadu na terenie miasta Redy.

Prognozy trendów temperatury i wysokości opadu są podstawową informacją niezbędną do oceny skutków narażenia na niekorzystne efekty zmian klimatu. Raport Międzyrządowego Panelu ds. Zmian Klimatu (IPCC) – Piąty Raport Oceny opublikowany w 2013 roku oraz Raport Specjalny SR1.5 opublikowany w listopadzie 2018 roku nie pozostawiają wątpliwości co do statystycznej istotności trendów zmian, zarówno obserwowanych, jak i prognozowanych na kolejne dekady.

Zmiany klimatu pociągają za sobą głównie negatywne konsekwencje dla zdrowia, rolnictwa, lasów, produkcji i zużycia energii, a także dla transportu, turystyki, otoczenia urbanistycznego czy produkcji przemysłowej. Wpływają także na bioróżnorodność, jakość upraw oraz zmniejszanie się powierzchni zalesionych. Istotna jest także ocena oddziaływania na zdrowie ludzi i zwierząt w odniesieniu do chorób zakaźnych, pasożytów i negatywnego oddziaływania czynników meteorologicznych, jak fale upałów. Ze względu na dużą gęstość zaludnienia i zabudowy, tereny zurbanizowane są szczególnie podatne na niekorzystne czynniki klimatyczne i ich pochodne.

Celem dostarczenia wiedzy eksperckiej dotyczącej adaptacji do zmian klimatu w Polsce, Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy podjął prace badawczo-wdrożeniowe w ramach projektu „Baza wiedzy o zmianach klimatu i adaptacji do ich skutków oraz kanałów jej upowszechniania w kontekście zwiększania odporności gospodarki, środowiska i społeczeństwa na zmiany klimatu oraz przeciwdziałania i minimalizowania skutków nadzwyczajnych zagrożeń”. W projekcie przewidziano szereg działań, których głównym celem jest dostarczenie niezbędnej wiedzy w zakresie zmian klimatu i oceny ich skutków na rzecz poprawy skuteczności oraz efektywności działań adaptacyjnych w sektorach wrażliwych na zmiany klimatu, m.in. opracowanie projekcji klimatycznych dla Polski do roku 2100.

Poniższe opracowanie dotyczy zmian temperatury i opadu w mieście Reda zarówno w ujęciu historycznym, jak i prognozowanych w horyzoncie roku 2050. W opracowaniu uwzględniono również warunki hydrologiczne – ich historyczne i prognozowane zmiany. Analiza danych historycznych została opracowana dla 32-lecia 1991-2022, zaś analiza prognoz została wykonana dla dwóch scenariuszy emisyjnych: RPC 4.5 i RCP 8.5.

Obliczone indeksy klimatyczne podzielone zostały na sześć bloków tematycznych: średnie warunki termiczne, fale upałów, fale chłodu, średnie warunki opadowe, opad ekstremalny i wskaźniki suszy. Ocenę narażenia na zmiany klimatu wykonano na podstawie poniższych indeksów klimatycznych:

Indeksy temperaturowe – średnie warunki termiczne	
Średnia roczna temperatura powietrza	Średnia temperatura powietrza w roku, obliczona według wzoru: $Tsr_n = \frac{\sum_{i=1}^{dni_w_roku(n)} Tsr_{i,n}}{dni_w_roku(n)},$ gdzie $Tsr_{i,n}$ jest średniodobową temperaturą powietrza w dniu i w roku n .

HDD – stopniodni z temperaturą średnią dobową < 18°C	Suma liczby stopni Celsjusza brakujących do 18°C w tych dniach roku, w których średniodobowa temperatura powietrza jest niższa od tej wartości, obliczona według wzoru: $HDD_n = \sum_{i=1}^{dni_w_roku(n)} \max(0, 18 - Tsr_{i,n}),$ gdzie $Tsr_{i,n}$ jest średniodobową temperaturą powietrza w dniu i w roku n .
Liczba dni wegetacyjnych ($T_{sr} > 5^{\circ}C$)	Liczba dni w roku ze średniodobową temperaturą powietrza wyższą od 5°C.
Temperatura średnia miesięczna	Średnia temperatura powietrza w miesiącu, obliczona według wzoru: $Tsr_m = \frac{\sum_{i=1}^{dni_w_miesiacu(m)} Tsr_{i,m}}{dni_w_miesiacu(m)},$ gdzie $Tsr_{i,m}$ jest średniodobową temperaturą powietrza w dniu i w miesiącu m .
Średnia roczna temperatura maksymalna	Średnia w roku dobowa temperatura maksymalna, obliczona według wzoru: $Tmax_n = \frac{\sum_{i=1}^{dni_w_roku(n)} Tmax_{i,n}}{dni_w_roku(n)},$ gdzie $Tmax_{i,n}$ jest dobową temperaturą maksymalną powietrza w dniu i w roku n .
Indeksy temperaturowe – fale upałów	
Liczba dni upalnych ($T_{max} > 30^{\circ}C$)	Liczba dni w roku, w których dobowa temperatura maksymalna jest wyższa niż 30°C.
Liczba fal upałów (co najmniej 3 dni z $T_{max} > 30^{\circ}C$)	Liczba fal upałów występujących w ciągu dekady. Fala upałów to okres co najmniej 3 następujących po sobie dni z dobową temperaturą maksymalną wyższą od 30°C.
Średnia długość trwania fal upałów	Średnia długość okresów, w których dobowa temperatura maksymalna powyżej 30°C utrzymuje się przez co najmniej 3 kolejne doby.
Liczba dni gorących ($T_{max} > 25^{\circ}C$)	Liczba dni w roku, w których dobowa temperatura maksymalna jest wyższa niż 25°C.
Liczba okresów długości co najmniej 5 dni z $T_{max} > 25^{\circ}C$	Liczba okresów w ciągu dekady z dobową temperaturą maksymalną wyższą niż 25°C występującą przez co najmniej 5 kolejnych dni.
Liczba nocy tropikalnych ($T_{min} > 20^{\circ}C$)	Liczba dni w ciągu dekady, w których dobowa temperatura minimalna jest wyższa od 20°C.
Indeksy temperaturowe – fale chłódów	
Średnia roczna temperatura minimalna	Średnia w roku dobowa temperatura minimalna, obliczona według wzoru: $Tmin_n = \frac{\sum_{i=1}^{dni_w_roku(n)} Tmin_{i,n}}{dni_w_roku(n)},$ gdzie $Tmin_{i,n}$ jest dobową temperaturą minimalną powietrza w dniu i w roku n .
Liczba dni przymrozkowych ($T_{min} < 0^{\circ}C$)	Liczba dni w roku, w których dobowa temperatura minimalna jest niższa od 0°C.

Liczba okresów przymrozkowych (co najmniej 5 dni z $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$)	Liczba okresów w ciągu dekady, w których dobową temperaturę minimalną poniżej 0°C utrzymuje się przez co najmniej 5 następujących po sobie dni.
Liczba dni mroźnych ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$)	Liczba dni w roku, w których dobową temperaturę maksymalną jest niższa od 0°C .
Liczba dni bardzo mroźnych ($T_{\min} < -10^{\circ}\text{C}$)	Liczba dni w roku, w których dobową temperaturę minimalną jest niższa od -10°C .
Liczba fal chłodu (co najmniej 3 dni z $T_{\min} < -10^{\circ}\text{C}$)	Liczba okresów w ciągu dekady, w których dobową temperaturę minimalną niższą od -10°C utrzymuje się przez co najmniej 3 kolejne doby.
Liczba dni z przejściem przez 0°C	Liczba dni w ciągu roku, podczas których dobową temperaturę maksymalną jest wyższa od 0°C , a dobową temperaturę minimalną jest niższa od 0°C .
Indeksy opadowe – średnie warunki opadowe	
Roczna suma opadu	Roczna suma opadów atmosferycznych, obliczona według wzoru: $PR_n = \sum_{i=1}^{dni_w_roku(n)} PR_{i,n}$ gdzie $PR_{i,n}$ jest dobową sumą opadu atmosferycznego w dniu i w roku n .
Liczba dni z opadem dobowym wyższym od 1 mm	Liczba dni w ciągu roku, podczas których dobową sumą opadu atmosferycznego jest wyższa od 1 mm.
Liczba dni z opadem przy temperaturze od -5°C do $2,5^{\circ}\text{C}$	Liczby dni w ciągu roku z opadem powyżej 1 mm, podczas których średniodobowa temperatura powietrza jest wyższa od -5°C , a niższa od $2,5^{\circ}\text{C}$.
Miesięczna suma opadu	Suma opadu atmosferycznego w danym miesiącu, obliczona według wzoru: $PR_m = \sum_{i=1}^{dni_w_miesiacu(m)} PR_{i,m}$ gdzie $PR_{i,m}$ jest dobową sumą opadu atmosferycznego w dniu i w miesiącu m .
Indeksy opadowe – opad ekstremalny	
Liczba dni z opadem dobowym powyżej 10 mm	Liczba dni w ciągu dekady, podczas których dobową sumą opadu atmosferycznego jest wyższa od 10 mm.
Liczba dni z opadem dobowym powyżej 20 mm	Liczba dni w ciągu dekady, podczas których dobową sumą opadu atmosferycznego jest wyższa od 20 mm.
Liczba dni z opadem dobowym powyżej 30 mm	Liczba dni w ciągu dekady, podczas których dobową sumą opadu atmosferycznego jest wyższa od 30 mm.
Liczba dni z opadem dobowym powyżej 40 mm	Liczba dni w ciągu dekady, podczas których dobową sumą opadu atmosferycznego jest wyższa od 40 mm.
Liczba dni z opadem dobowym powyżej 50 mm	Liczba dni w ciągu dekady, podczas których dobową sumą opadu atmosferycznego jest wyższa od 50 mm.
Liczba dni z opadem dobowym powyżej 60 mm	Liczba dni w ciągu dekady, podczas których dobową sumą opadu atmosferycznego jest wyższa od 60 mm.
Liczba dni z opadem dobowym powyżej 70 mm	Liczba dni w ciągu dekady, podczas których dobową sumą opadu atmosferycznego jest wyższa od 70 mm.

Maksymalny opad dobowy w miesiącu	Najwyższa dobową sumą opadu w danym miesiącu, obliczona według wzoru: $PR_m = \max(PR_{i,m}),$ gdzie $PR_{i,m}$ jest dobową sumą opadu atmosferycznego w dniu i w miesiącu m .
Wskaźniki suszy	
Liczba dni bez opadu	Liczba dni w ciągu roku, podczas których dobową sumą opadu atmosferycznego jest niższa od 1 mm.
Liczba okresów bez opadu długości co najmniej 5 dni	Liczba okresów w ciągu dekady, w których przez co najmniej 5 następujących po sobie dni nie występuje opad atmosferyczny.
Najdłuższy okres bez opadu	Największa w roku długość ciągu następujących po sobie dni, w których nie wystąpił żaden opad atmosferyczny.

2 Obserwowane zmiany warunków klimatycznych

2.1 Uwagi metodyczne

Warunki klimatyczne w mieście Reda zostały scharakteryzowane na podstawie danych meteorologicznych ze stacji synoptycznych i klimatycznych IMGW-PIB położonych najbliżej miasta, tj. Gdańsk-Rębiechowo (1407, 150), Lębork (125), Gdańsk-Świbno (155), oraz stacji opadowej Wejherowo (91429). W ramach analiz wykorzystano również dane dotyczące temperatury udostępnione przez Miejskie Przedsiębiorstwo Ciepłowniczo-Komunalne "Koksik" Sp. z o.o. w Redzie.

Na potrzeby analiz wykorzystano dane pomiarowe z okresu 1991-2022 (32 lata). Wartości parametrów meteorologicznych zarejestrowanych na ww. stacjach należy traktować jako wskaźnikowe do oceny zjawisk klimatycznych w analizowanym obszarze, uznając, że różnią się od wartości wskaźników, które byłyby mierzone w centrum Miasta.

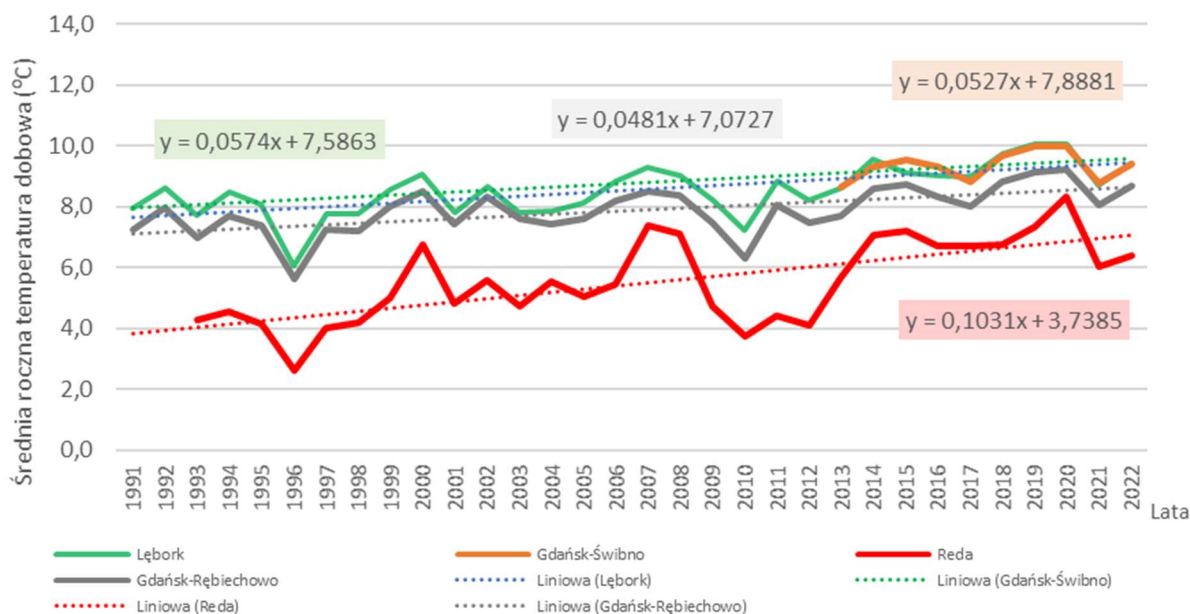
Charakterystyka obecnych zmian klimatu obejmuje warunki termiczne, warunki pluwialne, warunki anemometryczne, pokrywę śnieżną i zjawiska burzowe. W analizach uwzględniono parametry opisujące zjawiska klimatyczne uznane za znaczące ze względu na ich wpływ na zdrowie i życie mieszkańców, biosferę, funkcjonowanie infrastruktury. Zmienność zjawisk klimatycznych opisano przez średnie wieloletnie oraz najwyższe i najniższe wartości wybranych elementów i wskaźników klimatu.

2.2 Warunki termiczne

2.2.1 Średnia roczna temperatura powietrza

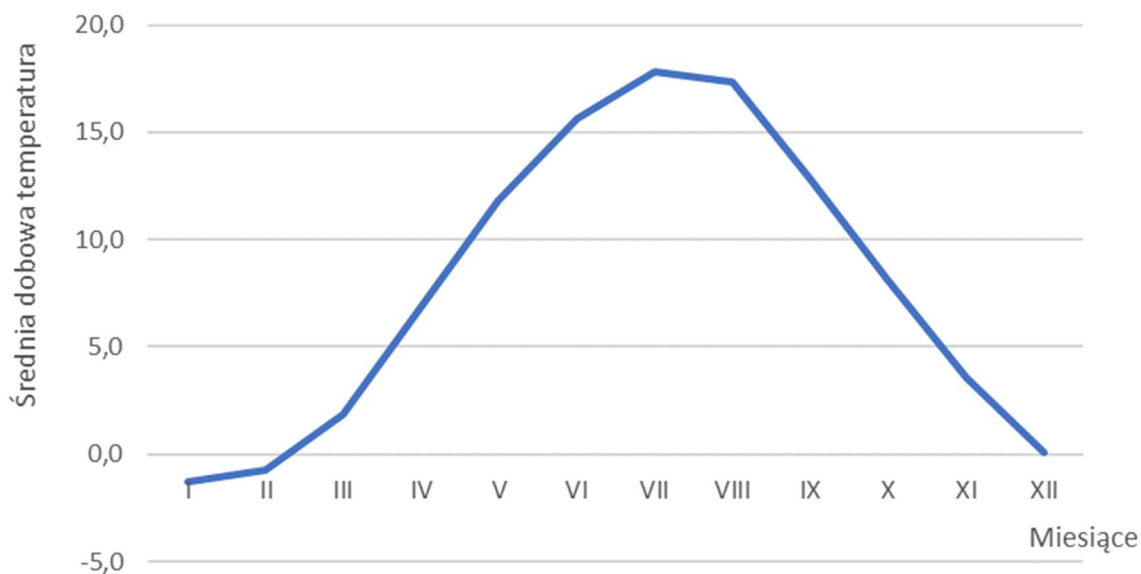
Przebieg średniej rocznej temperatury powietrza w latach 1991-2022 na stacji meteorologicznych IMGW-PIB objętych analizą (Lębork, Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo) wskazuje na stopniowe ocieplanie się klimatu omawianego obszaru. Średnia roczna temperatura w wieloleciu wyniosła od 7,9°C w Gdańsku-Rębiechowie do 8,5°C w Lęborku. Wartości temperatury powietrza (rys.1) wahały się od 5,6°C w 1996 r. (Gdańsk-Rębiechowo) do 10,1°C w 2019 r. (Lębork). Przebieg temperatury w wieloleciu na wszystkich stacjach wskazuje na wyraźny dodatni trend zmian temperatury średniej na poziomie około 0,5°C w dziesięcioleciu.

W celach porównawczych pokazano wartości temperatury z miejskiej stacji w Redzie prowadzonej przez Miejskie Przedsiębiorstwo Ciepłowniczo-Komunalne „Koksik”. Z uwagi na brak pomiarów w okresie letnim (czerwiec-sierpień) dane ze stacji miejskiej nie mogą zostać użyte do szczegółowych analiz wrażliwości miasta na zmiany klimatu. Należy jednak podkreślić, że w przebiegu wieloletnim średniej dobowej temperatury w Redzie w miesiącach od września do maja również zaznacza się wyraźna tendencja wzrostowa (o blisko 1°C w dziesięcioleciu).



Rys.1. Wieloletnia zmienność średniej rocznej dobowej temperatury powietrza, Reda, Lębork, Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo

2.2.2 Średnia miesięczna temperatura powietrza

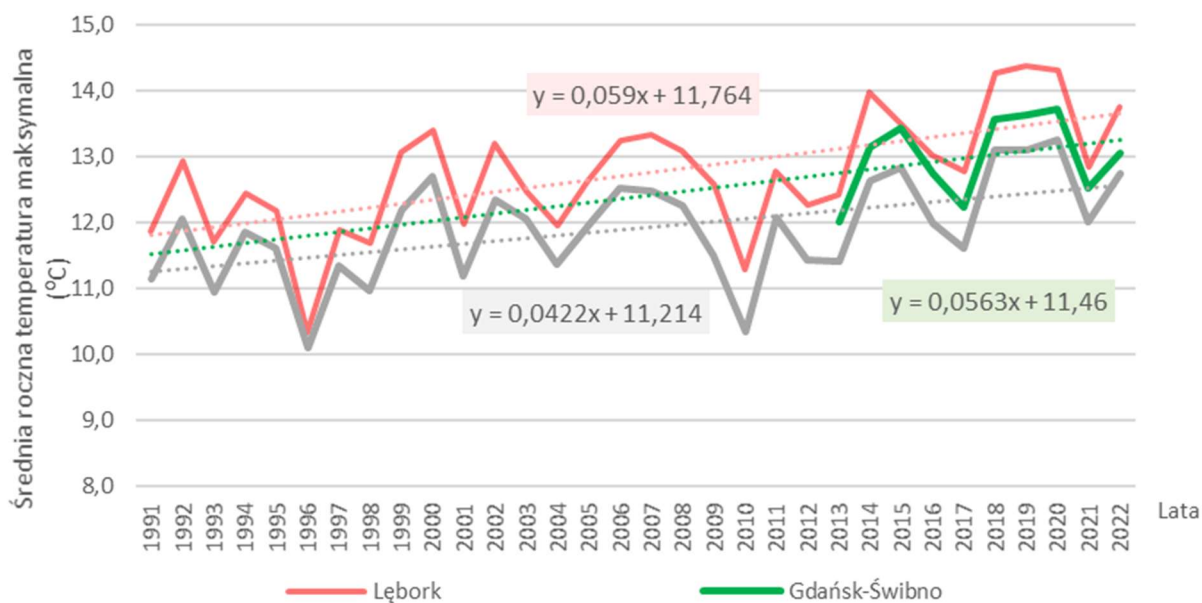


Rys.2. Przebieg roczny średniej miesięcznej temperatury powietrza, Gdańsk-Rębiechowo

W przebiegu rocznych średniej dobowej temperatury na stacji Gdańsk-Rębiechowo, obliczonej z okresu 1991-2022, wyróżnia się styczeń jako najchłodniejszy miesiąc w roku ze średnią temperaturą wynoszącą $-1,3^{\circ}\text{C}$ (rys. 2). Najcieplejszym miesiącem w wieloleciu jest lipiec ze średnią temperaturą $17,8^{\circ}\text{C}$.

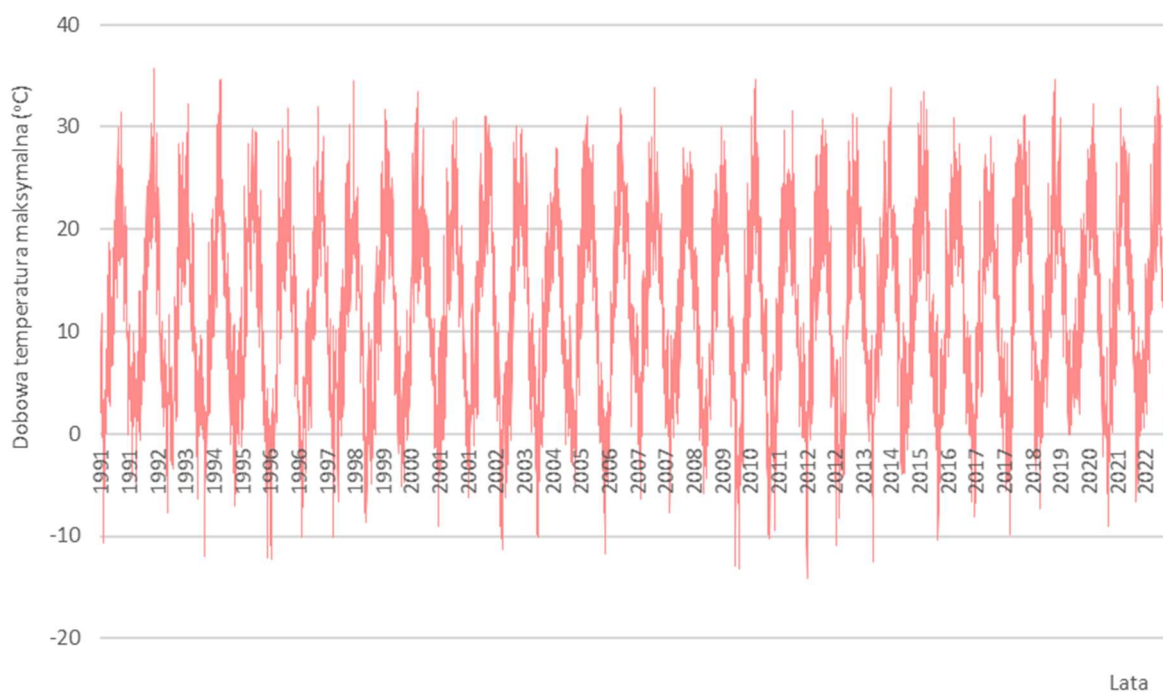
2.2.3 Temperatura maksymalna

Kolejnym wskaźnikiem uwzględnianym w ocenie warunków termicznych jest temperatura maksymalna powietrza. W latach 1991-2022 zaznacza się wzrost jej wartości w tempie $0,4^{\circ}\text{C}$ - $0,6^{\circ}\text{C}$ /dekadę (rys. 3). W badanym wieloleciu średnia roczna temperatura maksymalna zmieniała się od $10,1^{\circ}\text{C}$ w 1996 r. (Gdańsk-Rębiechowo) do $14,4^{\circ}\text{C}$ w 2019 r. (Lębork).



Rys.3. Przebieg średniej rocznej temperatury maksymalnej powietrza, Lębork, Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo

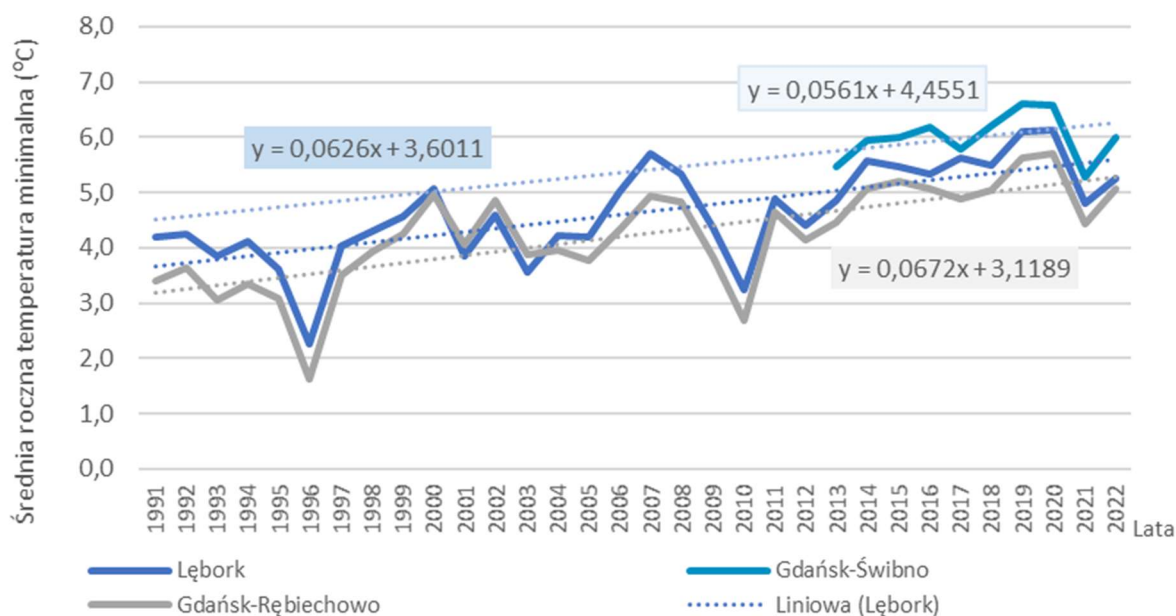
Najwyższą dobową wartość temperatury na stacji Gdańsk-Rębiechowo odnotowano 10 sierpnia 1992 r., gdy temperatura maksymalna osiągnęła 35,7°C (rys. 4).



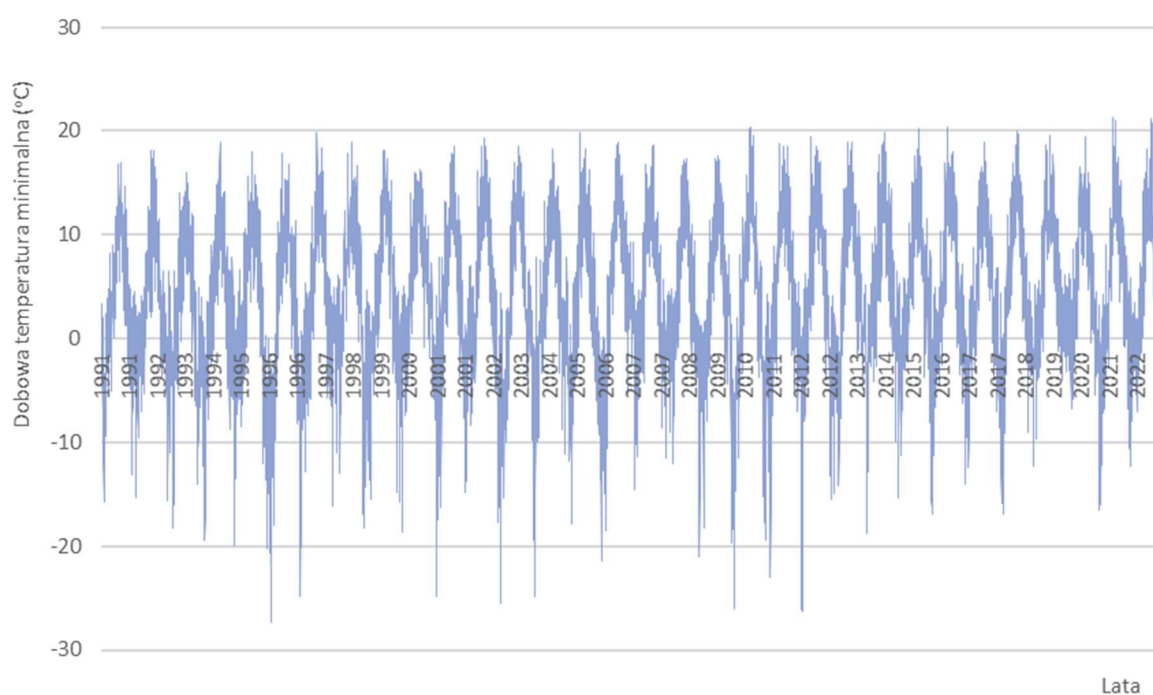
Rys.4. Przebieg dobowej temperatury maksymalnej powietrza, Gdańsk-Rębiechowo

2.2.4 Temperatura minimalna

W przebiegu wieloletnim temperatury minimalnej powietrza obserwuje się tendencję wzrostową, o 0,6°C/dekadę (rys. 5), co oznacza wzrost temperatury minimalnej o 1,8°C w 30-leciu. W latach 1991-2022 najchłodniejszym rokiem był 1996 ze średnią roczną temperaturą minimalną od 1,6°C (Gdańsk-Rębiechowo) do 2,3°C (Lębork), a najcieplejszym był rok 2020 r. z wartością temperatury: 5,7°C w Gdańsku-Rębiechowie, 6,1°C w Lęborku, 6,6°C w Gdańsku-Świbno.



Rys.5. Przebieg średniej temperatury minimalnej powietrza, Lębork, Gdańsk-Świbno, Gdańsk- Rębiechowo

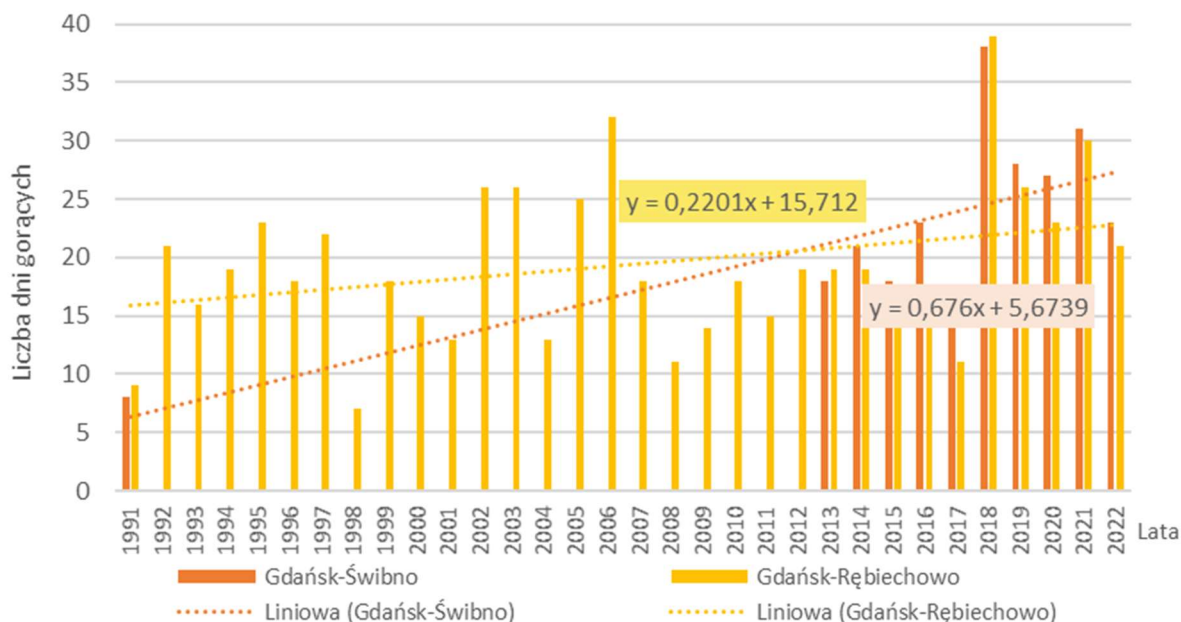


Rys.6. Przebieg dobowej temperatury minimalnej powietrza, Gdańsk-Rębiechowo

Najniższą w ciągu doby wartość temperatury powietrza na stacji Gdańsk-Rębiechowo w analizowanym wieloleciu odnotowano 8 i 9 lutego 1996 r., gdy temperatura minimalna osiągnęła - 27,3°C (rys. 6).

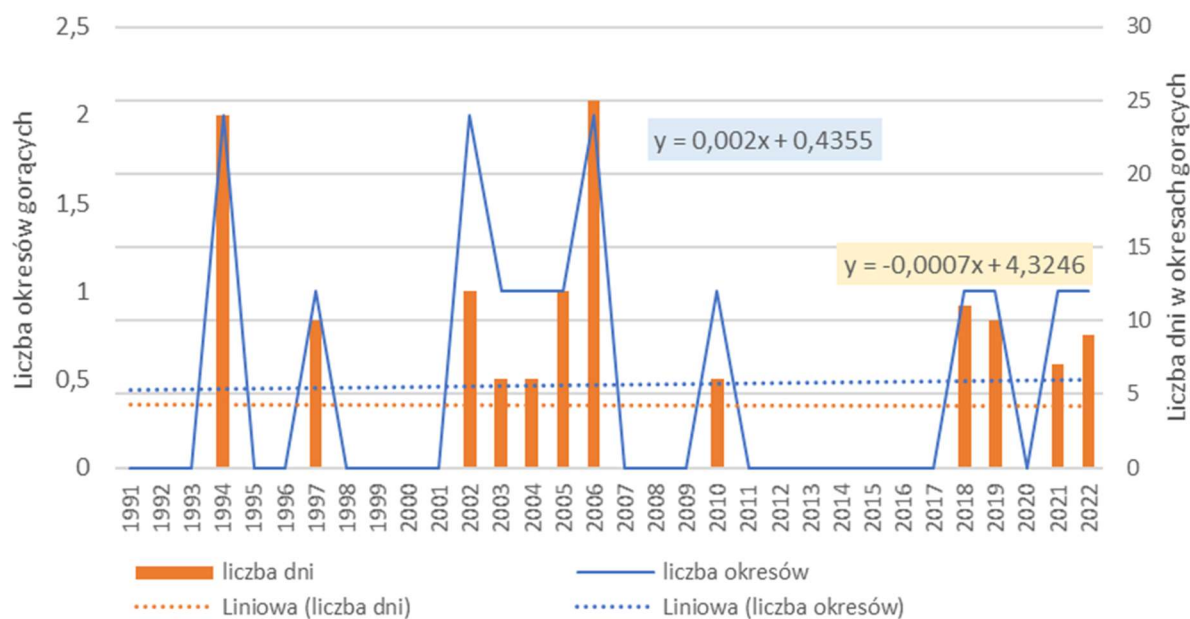
2.2.5 Dni gorące

Tendencja zmian warunków termicznych określona na podstawie wartości dobowej temperatury, temperatury maksymalnej i temperatury minimalnej, znajduje potwierdzenie w przebiegu innych wskaźników termicznych. Zmienność liczby dni gorących (rys. 7), tzn. dni z temperaturą maksymalną powyżej 25°C, świadczy o wzroście w badanym wieloleciu wartości najwyższej w ciągu doby temperatury. Najmniej takich dni na stacji meteorologicznej Gdańsk-Rębiechowo było w roku 1998 (7 dni) najwięcej natomiast w roku 2018 (39 dni). Wyraźnie zwiększa się w wieloleciu 1991-2022 liczba dni, w których temperatura powietrza przekracza wyznaczony próg termiczny 25°C, średnio o blisko 2 dni/dekadę.



Rys.7. Liczba dni gorących (Tmax>25°C), Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo

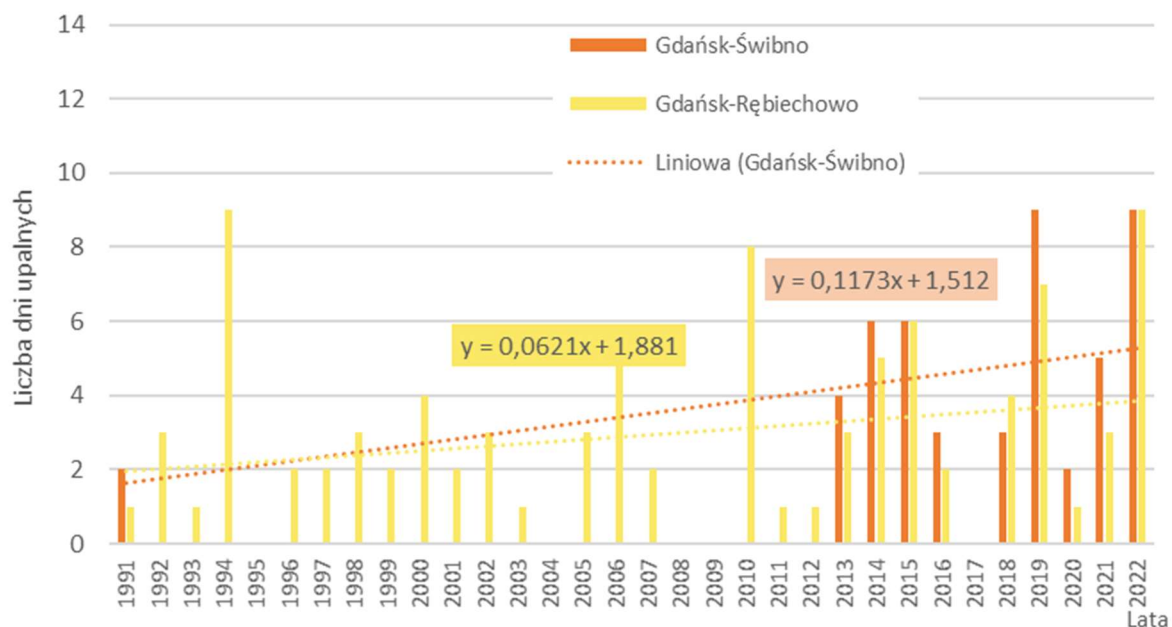
Okresy gorące, tzn. z dobową temperaturą maksymalną przekraczającą 25°C utrzymującą się przez co najmniej 5 dni (rys. 8) występują bardzo rzadko, takie zjawisko nie zostało zaobserwowane w dwudziestu latach okresu od 1991 r. Największa liczba okresów z takimi warunkami termicznymi wystąpiła w 1994 r., 2002 i 2006 r. (2 przypadki). Przeciętnie okres gorący utrzymywał się przez 9 dni, najdłużej trwał 17 dni na przełomie lipca i sierpnia 1994 r. W wieloletnim przebiegu liczby dni gorących w roku i długości ich trwania zaznaczają się niewielkie zmiany. Liczby okresów gorących uległa nieznacznemu zwiększeniu, bez większych zmian długości trwania.



Rys.8. Okresy ponad 5 dniowe z $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$, Gdańsk-Rębiechowo

2.2.6 Dni upalne

Na obszarze objętym badaniem występuje w roku średnio 3 dni z temperaturą przekraczającą 30°C . Najwięcej, aż 9 dni upalnych było w 1994 r., 2019 r. i 2022 r. (rys. 9). W okresie 1991- 2022 liczba dni w roku z temperaturą przekraczającą 30°C zwiększa się średnio o 0,6 dnia na dekadę.



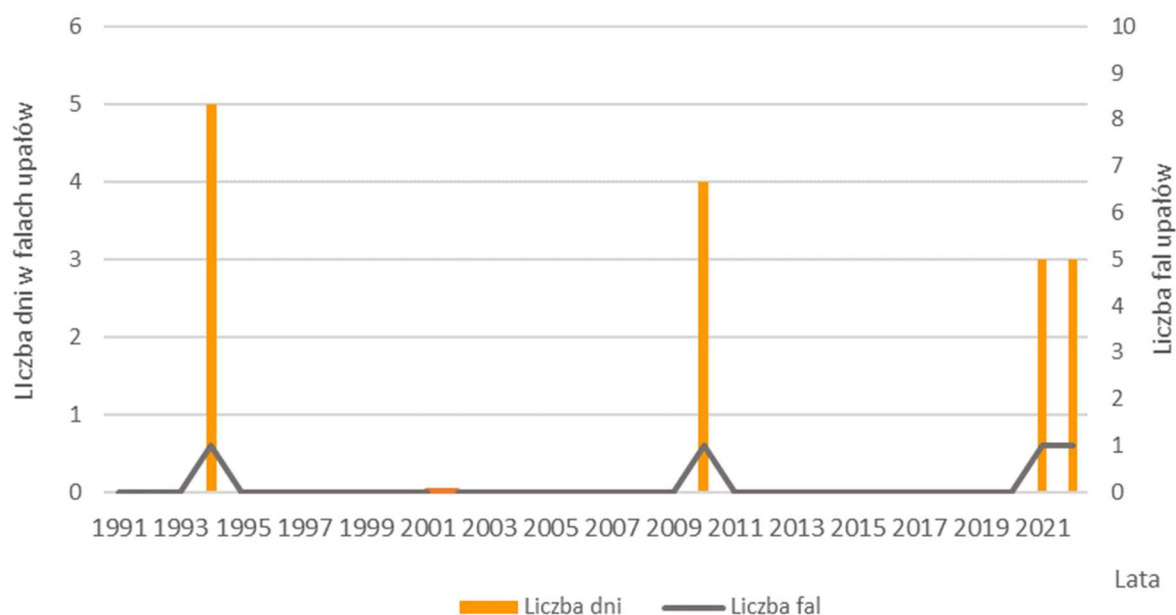
Rys.9. Liczba dni upalnych ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$), Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo

2.2.7 Fale upałów

W analizowanym wieloleciu fale upałów, definiowane jako ciąg przynajmniej trzech dni z temperaturą maksymalną powyżej 30°C w każdym dniu, występowały bardzo rzadko (rys. 10). Na stacji Gdańsk-Rębiechowo odnotowano po jednym przypadku fali upałów w czterech z trzydziestu dwóch lat. Przeciętnie fala upałów trwała blisko 4 dni. Najdłuższą była pięciodniowa fala upałów, która wystąpiła w lipcu 1994 r. (tab. 1).

Tab. 1. Fale upałów w latach 1991- 2022, Gdańsk-Rębiechowo

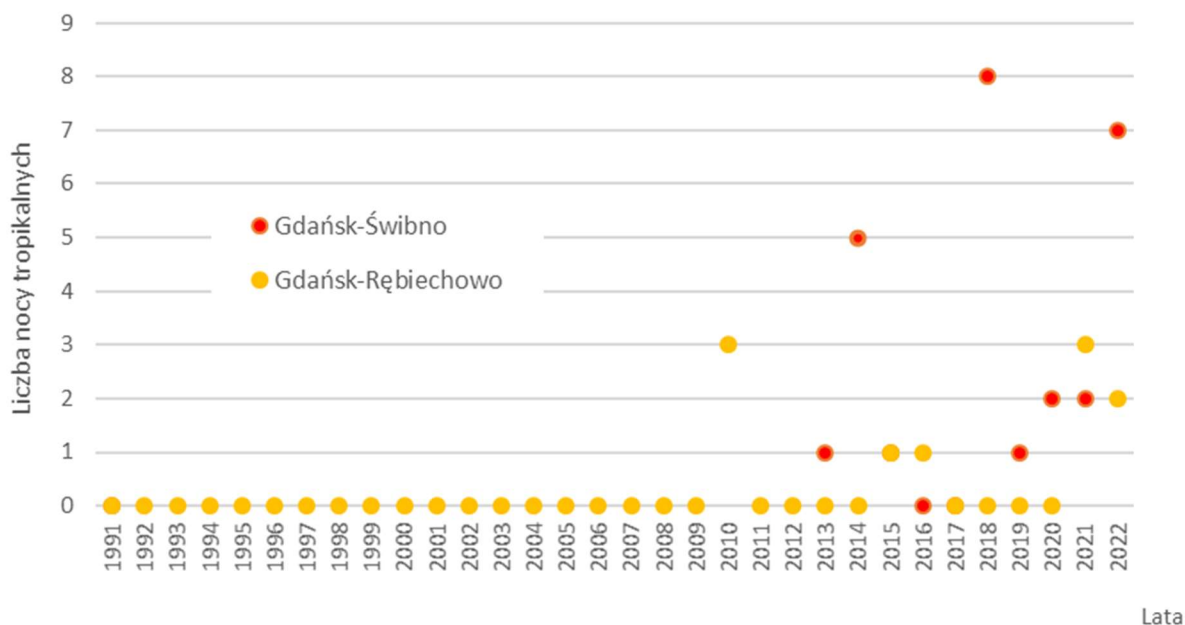
Data rozpoczęcia fali upałów	Data zakończenia fali upałów	Liczba dni	Najwyższa temperatura [°C]
1994-07-27	1994-07-31	5	34,7
2010-07-10	2010-07-13	4	32,5
2021-06-19	2021-06-21	3	31,8
2022-08-03	2022-08-05	3	32,8



Rys.10. Liczba i okres trwania fal upałów, Gdańsk-Rębiechowo

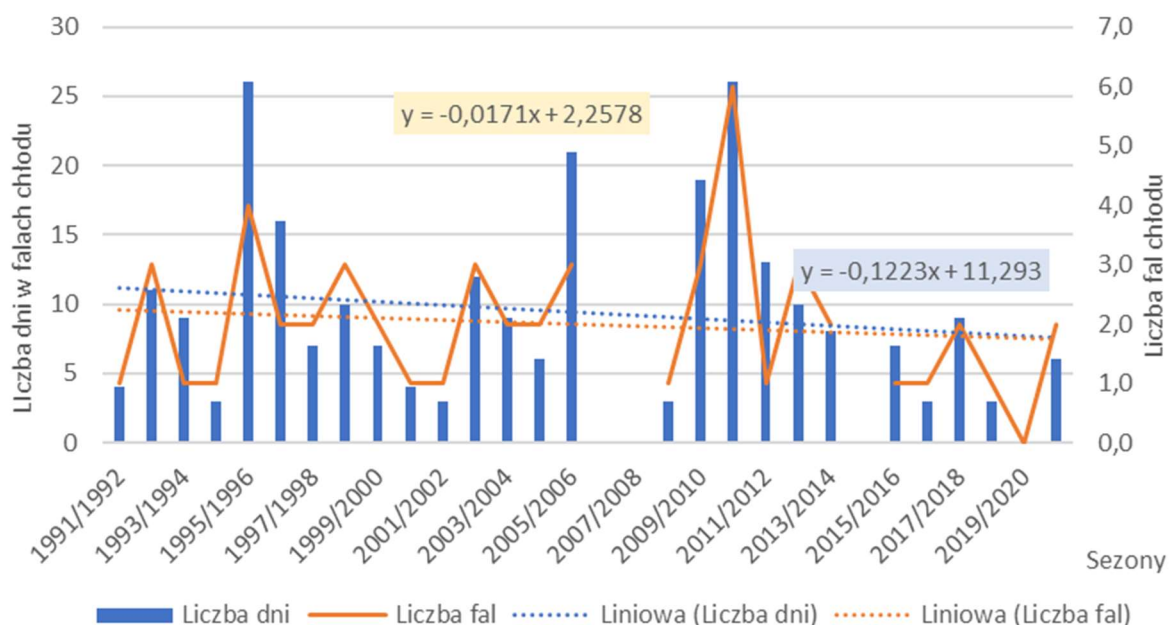
2.2.8 Noce tropikalne

Dni z temperaturą minimalną powyżej 20°C (noce tropikalne) występują niezwykle rzadko. W analizowanym wieloleciu takie zjawisko jest odnotowane od 2010 r. (rys. 11): w czterech latach na stacji Gdańsk-Rębiechowo (od 1 do 3 przypadków w roku) i ośmiu latach na stacji Gdańsk-Świbno (od 1 do 8 przypadków w roku). Wcześniej rzadkie zjawisko stało się coraz częstsze w analizowanym okresie, szczególnie na stacji Gdańsk-Świbno. Najwięcej nocy tropikalnych, aż 8, wystąpiło w 2018 r.



Rys.11. Dni z temperaturą minimalną >20°C, Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo

2.2.9 Fale chłodu



Rys.12. Liczba i okres trwania fal chłodu, Gdańsk-Rębiechowo

Fale chłodu, definiowane jako okresy z temperaturą minimalną poniżej -10°C utrzymującą się przez co najmniej 3 dni, występowały średnio dwa razy w roku, przeciętnie przez 5 kolejnych dni. W analizowanym okresie zidentyfikowano 54 epizody fal chłodu, najdłużej trwające 13 dni na przełomie stycznia i lutego 2012 r. (rys. 12, tab. 3). Największe natężeniem tego zjawiska odnotowano w sezonach zimowych 1995/1996 (4 fale o łącznej długości trwania 26 dni) i 2010/2011

(6 fal o łącznej długości trwania 26 dni). W dwóch sezonach zimowych opisywane zjawisko nie zaistniało. Analiza fal chłodu w wieloleciu wskazuje na słabą tendencję zmniejszania częstości ich występowania. Zmianie także ulega czas ich trwania z tendencją do krótszego utrzymywania się takich warunków termicznych.

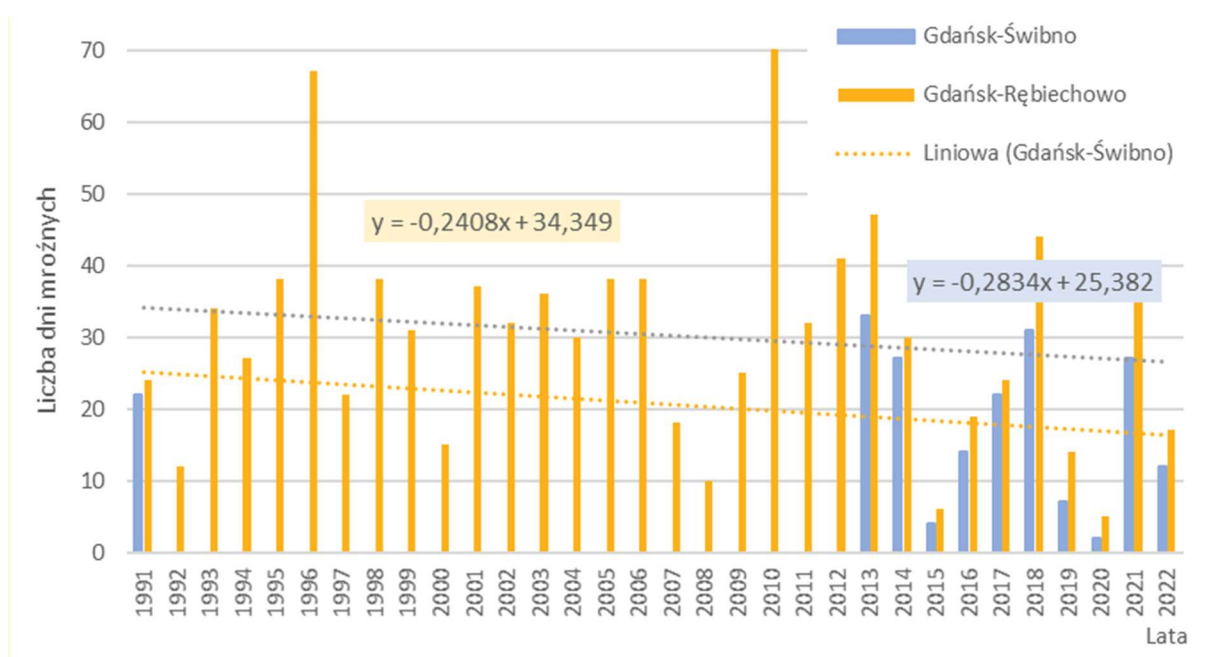
Tab. 2. Fale chłodu w sezonach 1991/1992-2021/2022, Gdańsk-Rębiechowo

Data rozpoczęcia fali chłodu	Data zakończenia fali chłodu	Liczba dni	Najniższa temperatura [°C]
1991-02-01	1991-02-03	3	-15,3
1991-02-05	1991-02-08	4	-14,1
1992-01-21	1992-01-24	4	-15,4
1992-12-24	1992-12-26	3	-10,4
1993-01-01	1993-01-05	5	-15,6
1993-03-03	1993-03-05	3	-18,2
1994-02-12	1994-02-20	9	-19,5
1995-01-04	1995-01-06	3	-20,0
1995-12-25	1996-01-02	9	-20,2
1996-01-23	1996-01-27	5	-20,6
1996-02-04	1996-02-12	9	-27,3
1996-03-07	1996-03-09	3	-18,0
1996-12-26	1997-01-05	11	-24,9
1997-01-08	1997-01-12	5	-13,5
1997-12-15	1997-12-18	4	-16,2
1998-03-11	1998-03-13	3	-13,0
1998-11-21	1998-11-23	3	-16,9
1998-12-01	1998-12-04	4	-18,2
1999-02-10	1999-02-12	3	-15,5
1999-11-21	1999-11-23	3	-14,8
2000-01-22	2000-01-25	4	-18,7
2001-02-02	2001-02-05	4	-24,8
2001-12-22	2001-12-24	3	-14,8
2002-12-08	2002-12-10	3	-17,7
2002-12-22	2002-12-26	5	-16,3
2003-01-05	2003-01-08	4	-25,5
2004-01-04	2004-01-06	3	-19,5
2004-01-22	2004-01-27	6	-24,8
2005-02-06	2005-02-08	3	-11,8
2005-02-27	2005-03-01	3	-11,6
2006-01-19	2006-01-28	10	-21,4
2006-02-27	2006-03-02	4	-13,3
2006-03-04	2006-03-10	7	-18,5
2009-01-04	2009-01-06	3	-21,0
2009-12-17	2009-12-22	6	-19,7
2010-01-14	2010-01-17	4	-18,4
2010-01-20	2010-01-28	9	-26,1
2010-11-30	2010-12-03	4	-15,2
2010-12-15	2010-12-21	7	-16,9
2010-12-27	2010-12-29	3	-19,5
2011-02-14	2011-02-16	3	-15,6
2011-02-21	2011-02-26	6	-22,7
2011-03-01	2011-03-03	3	-14,3
2012-01-27	2012-02-08	13	-26,1
2012-12-22	2012-12-24	3	-15,5

Data rozpoczęcia fali chłodu	Data zakończenia fali chłodu	Liczba dni	Najniższa temperatura [°C]
2013-01-24	2013-01-27	4	-14,9
2013-03-16	2013-03-18	3	-14,2
2014-01-22	2014-01-26	5	-18,8
2014-01-29	2014-01-31	3	-12,9
2016-01-02	2016-01-08	7	-16,9
2017-01-06	2017-01-08	3	-14,0
2018-02-07	2018-02-09	3	-15,9
2018-02-25	2018-03-02	6	-16,9
2019-01-23	2019-01-25	3	-12,3
2021-01-17	2021-01-19	3	-16,5
2021-02-06	2021-02-08	3	-16,0

2.2.10 Dni mroźne

Dni mroźnych (dni z temperaturą maksymalną poniżej 0°C) jest średnio 30 w roku. Charakterystyczna jest duża zmienność występowania takich warunków termicznych (rys. 13), od 5 dni w roku 2020 do 84 dni w roku 2010 (Gdańsk-Rębiechowo) i 33 dni w 2013 r.(Gdańsk-Świbno). Liczba dni mroźnych wykazuje tendencję spadkową w analizowany wieloletni, o około 3 dni/dekadę.

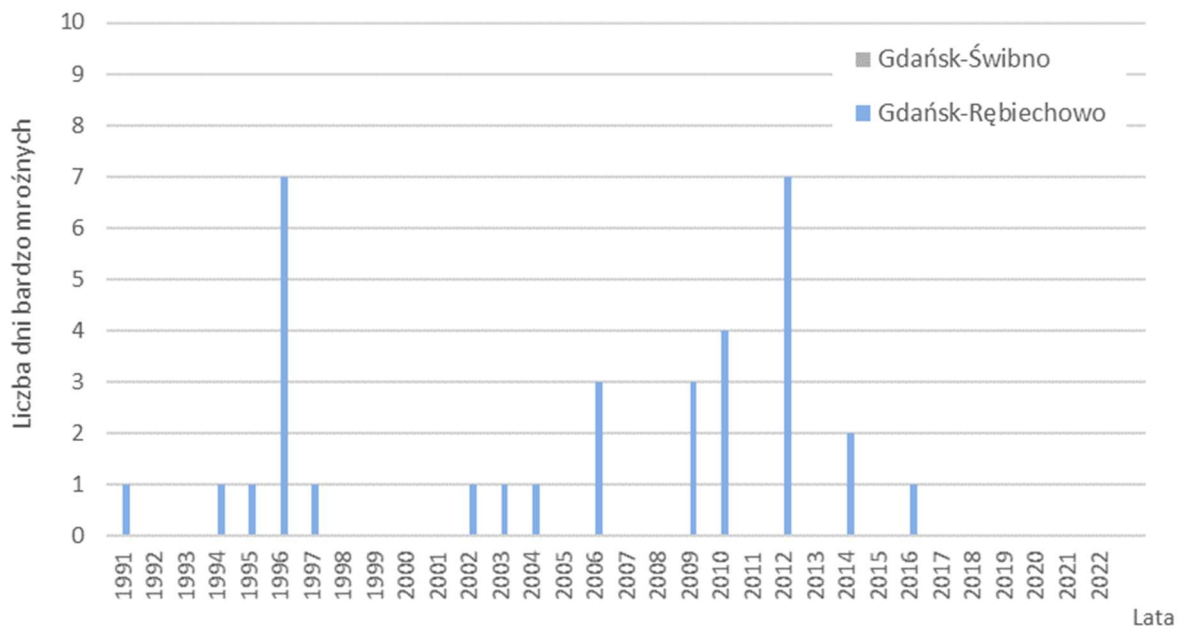


Rys.13. Liczba dni mroźnych (Tmax<0°C), Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno

2.2.11 Dni bardzo mroźne

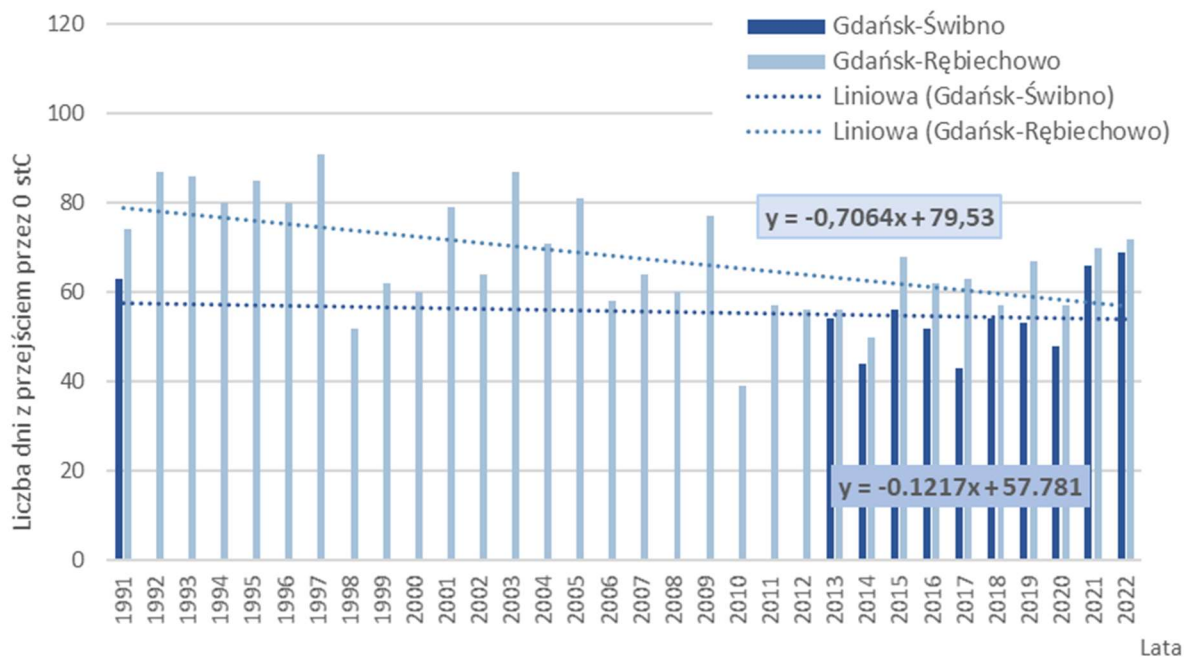
Dni z temperaturą maksymalną poniżej -10°C, określane jako dni bardzo mroźne, przeciętnie występują raz w roku. Zaznacza się duża zmienność liczby dni bardzo mroźnych w analizowanym wieloletni (rys. 14). Najwięcej takich dni pojawiło się w roku 1996 i 2012 (7 dni), natomiast aż w siedemnastu latach w analizowanym wieloletni nie wystąpiły takie warunki termiczne na stacji

Gdańsk-Rębiechowo. Na stacji Gdańsk-Świbno nie odnotowano w pomiarach od 2013 r. ani jednego przypadku dni bardzo mroźnych. Zauważany jest spadek liczby dni bardzo mroźnych.



Rys.14. Dni bardzo mroźne ($T_{max} < -10^{\circ}C$), Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno

2.2.12 Dni z temperaturą przejściową



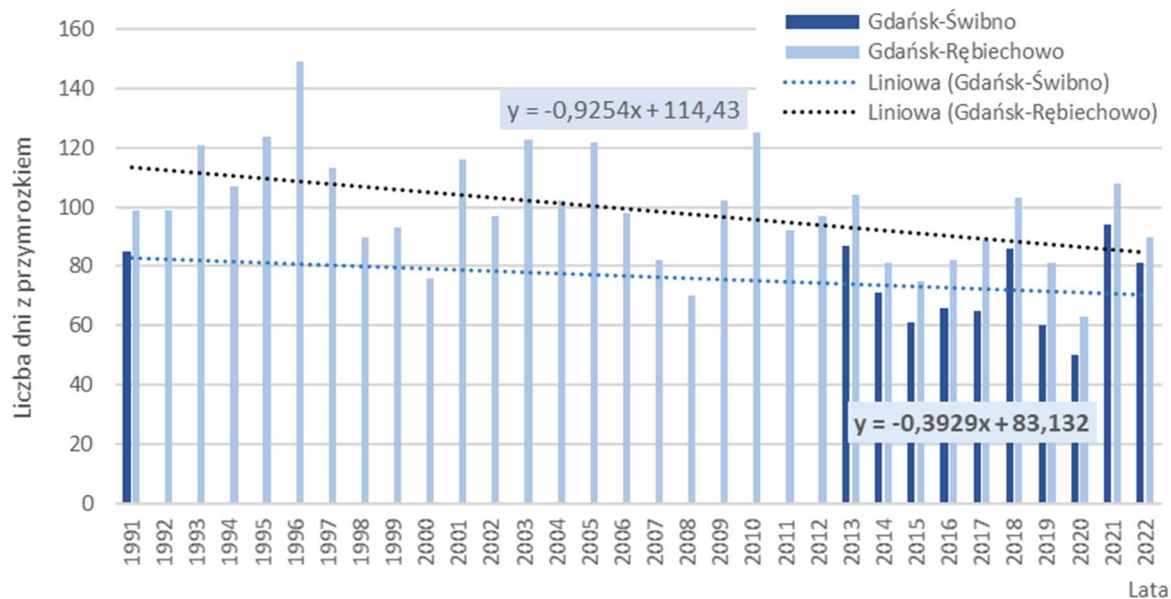
Rys.15. Dni z przejściem przez $0^{\circ}C$, Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno

Dni z temperaturą przejściową, tzn. dni w których temperatura powietrza przechodzi przez punkt $0^{\circ}C$, przeciętnie jest w roku 55 na stacji Gdańsk-Świbno i 68 na stacji Gdańsk-Rębiechowo (rys. 15). Zakres zmienności ich liczby w wieloleciu waha się od 39 dni w 2010 r. do 91 dni w 1997 r. (Gdańsk-

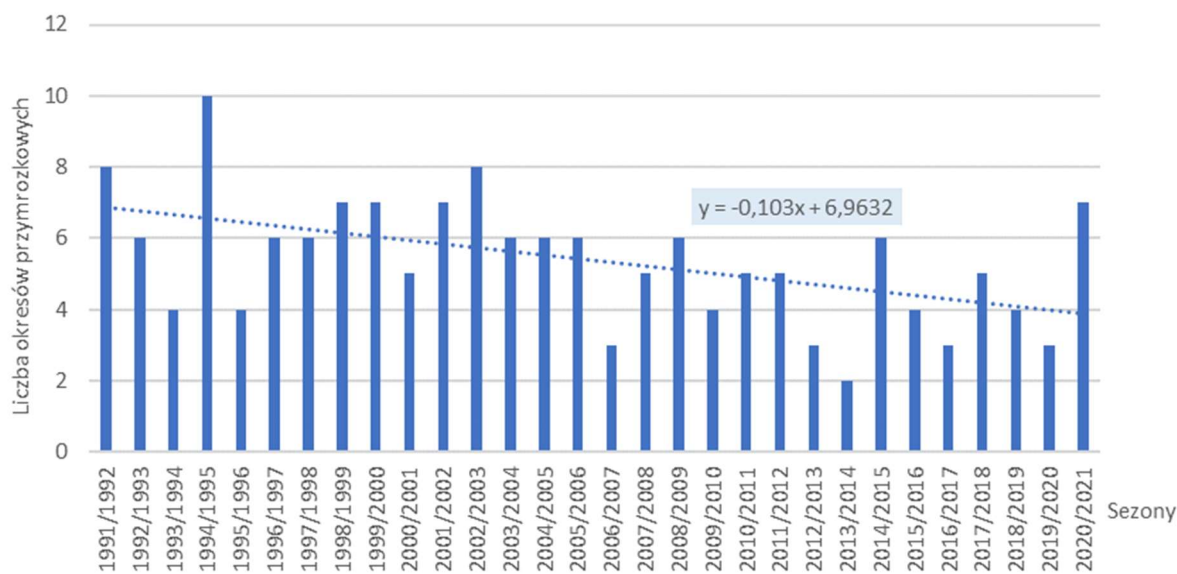
Rębiechowo). W badanym okresie stwierdzono zmniejszanie się liczby dni z przejściem temperatury przez 0°C o blisko 7 dni w ciągu dekady.

2.2.13 Dni i okresy przymrozkowe

Dni z temperaturą minimalną poniżej 0°C (dni przymrozkowe) jest średnio 99 w roku na stacji Gdańsk-Rębiechowo. Ich liczba w poszczególnych latach analizowanego okresu sięga od 63 dni w 2020 r. do 149 dni w 1996 r. (rys. 16). Liczba dni przymrozkowych wykazuje tendencję spadkową o blisko 4 dni w ciągu dekady.



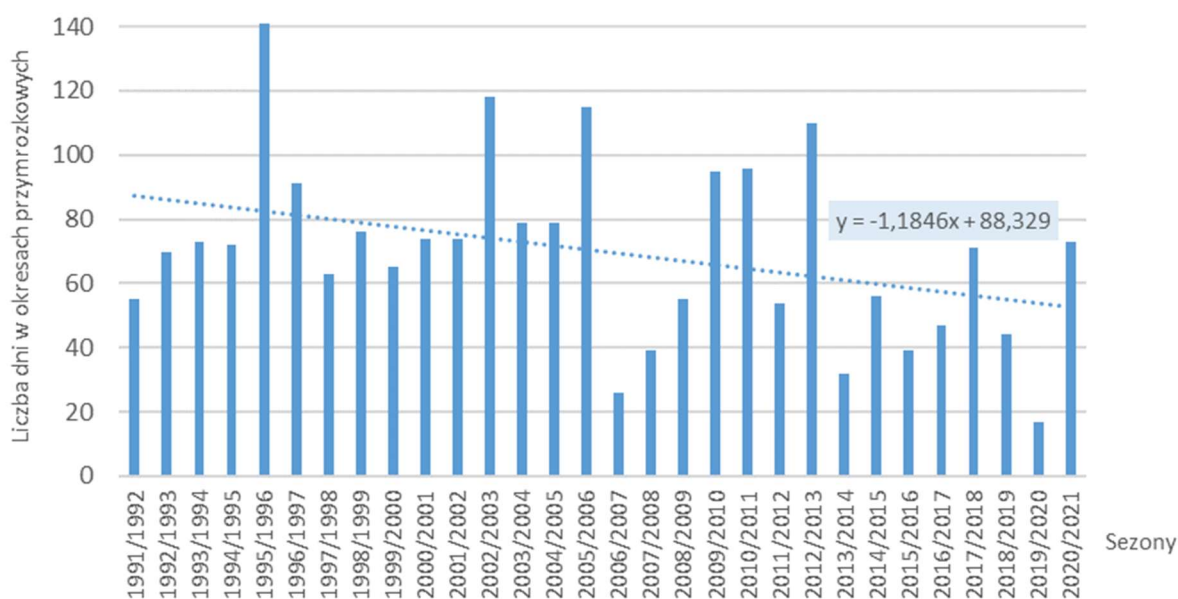
Rys.16. Dni przymrozkowe (Tmin<0°C), Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno



Rys.17. Okresy przymrozkowe, Gdańsk-Rębiechowo

Okresy przymrozkowe, definiowane jako okresy z dobową temperaturą minimalną poniżej 0°C utrzymującą się przez co najmniej 5 dni, występują średnio 5 razy w roku (rys. 17). Największe natężenie tego zjawiska odnotowano w sezonie chłodnym 1994/1995 (10 okresów przymrozkowych), najmniejszą ich liczbę natomiast w sezonie 2013/2014 (3 okresy przymrozkowe). W analizowanym wieloleciu zmniejsza się liczby okresów przymrozkowych średnio o 1 epizod na dekadę.

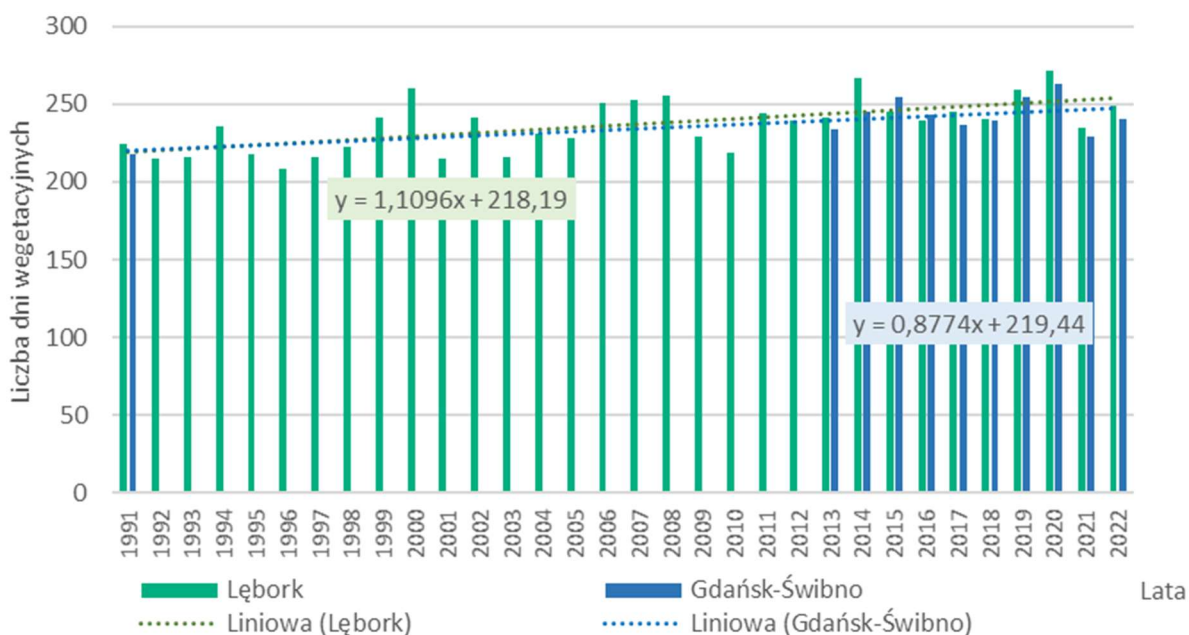
Sumaryczna długość okresów przymrozkowych wynosi średnio 70 dni w sezonie chłodnym. Liczba dni w okresach przymrozkowych w poszczególnych sezonach analizowanego wielolecia waha się od 26 w sezonie 2006/2007 do 141 w sezonie 1995/1996 (rys. 18). Najdłuższy okres przymrozkowy wystąpił od stycznia do kwietnia 1996 r., trwał 83 dni. Liczba dni w okresach przymrozkowych wykazuje silną tendencję silną spadkową, średnio blisko o 11 dni/dekadę.



Rys.18. Liczba dni w okresach przymrozkowych, Gdańsk-Rębiechowo

2.2.14 Dni wegetacyjne

Długość okresu wegetacyjnego (średniodobowa temperatura powietrza przekracza 5°C) wynosi średnio 222 dni. Roczna liczba dni wegetacyjnych zmienia się z 208 w 1996 r. do 271 dni 2020 roku (rys. 19). W analizowanym wieloleciu zaznacza się silny trend wydłużania okresu wegetacyjnego, o około 11 dni w dekadzie.

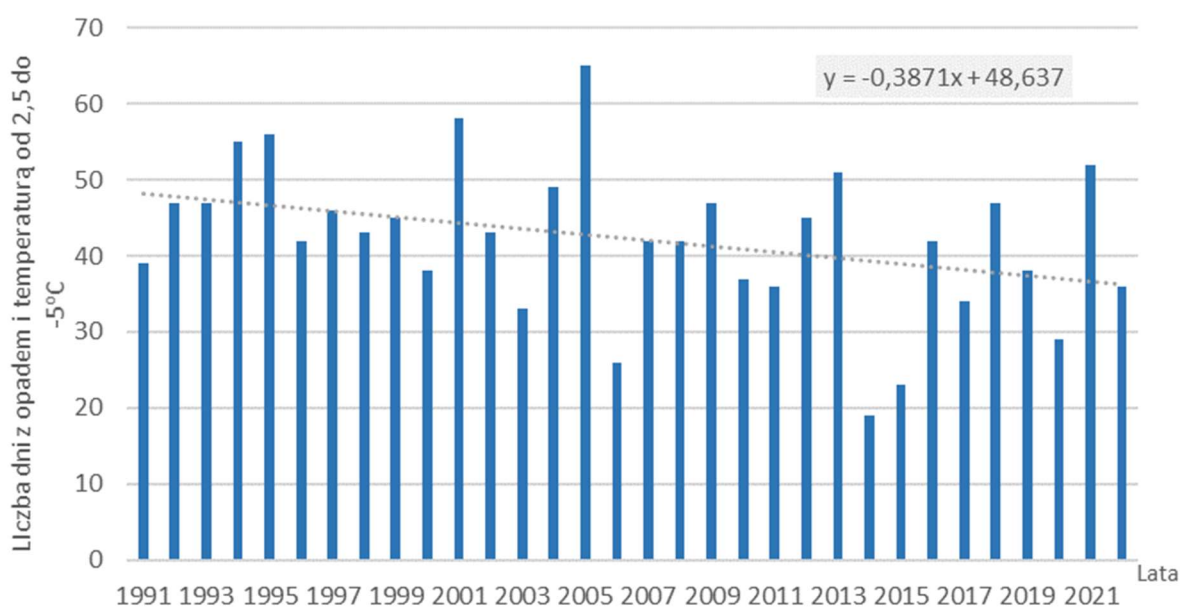


Rys.19. Okres wegetacyjny, Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno

2.3 Warunki termiczno-opadowe

2.3.1 Dni z temperaturą powietrza w przedziale od -5°C do +2,5°C i jednoczesnym wystąpieniem opadów atmosferycznych

Średnio w roku występuje 42 dni z opadem powyżej 1 mm i średniodobową temperaturą powietrza z przedziału wartości od -5°C od +2,5°C. W analizowanym wieloleciu liczba dni o takich warunkach termiczno-opadowych wynosiła od 19 w 2014 r. do 65 w 2005 r. (rys. 20). Liczba charakterystycznych pogodowo dni wykazuje tendencję spadkową, średnio o blisko 4 dni w ciągu dekady.

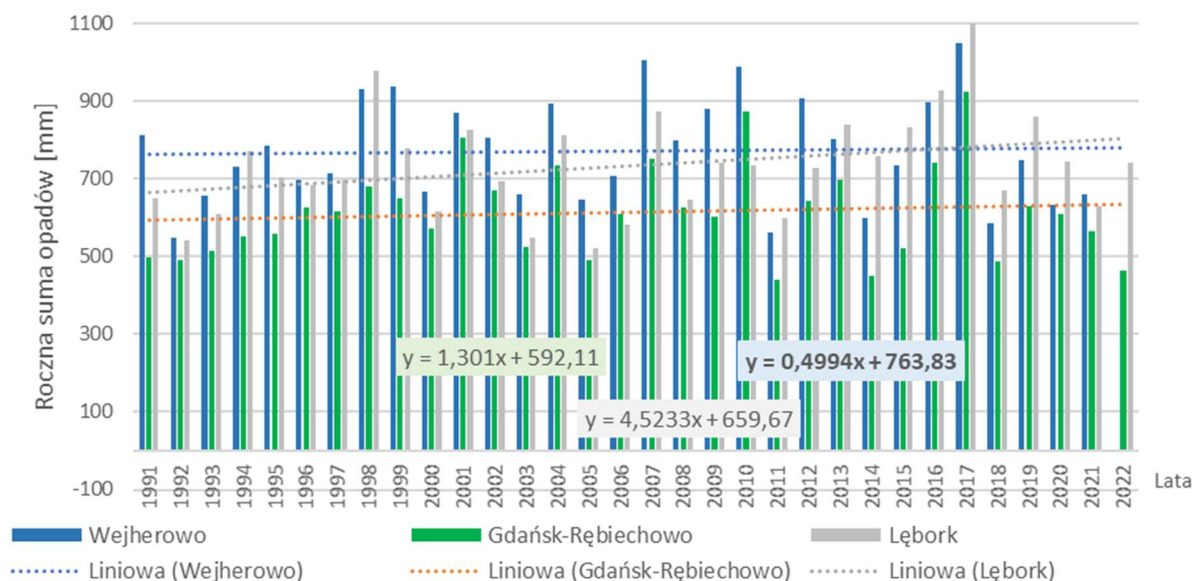


Rys.20. Dni z temperaturą od +2,5°C do -5°C i opadem, Gdańsk-Rębiechowo

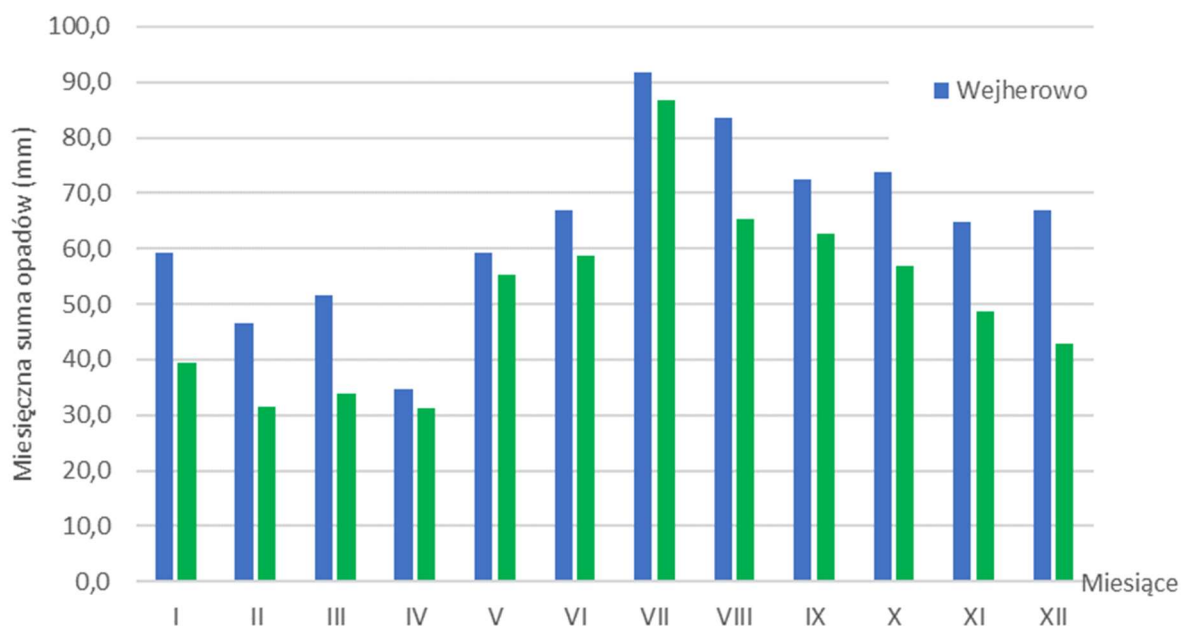
2.4 Warunki pluwialne (opady atmosferyczne)

2.4.1 Sumy roczne i miesięczne opadów

Średnie roczne opady atmosferyczne osiągają wartość około 771 mm na stacji w Wejherowie (613 mm na stacji Gdańsk-Rębiechowo, 734 mm na stacji Lębork). W analizowanym wieloleciu występuje duża zmienność rocznych sum opadów (rys. 21) od 545 mm w roku 1992 do 1051 mm w roku 2017. Analiza rocznych sum opadów wskazuje na tendencję wzrostową, średnio o blisko 5 mm/dekadę.



Rys.21. Przebieg wieloletni sum rocznych opadów atmosferycznych, Wejherowo, Gdańsk- Rębiechowo, Lębork

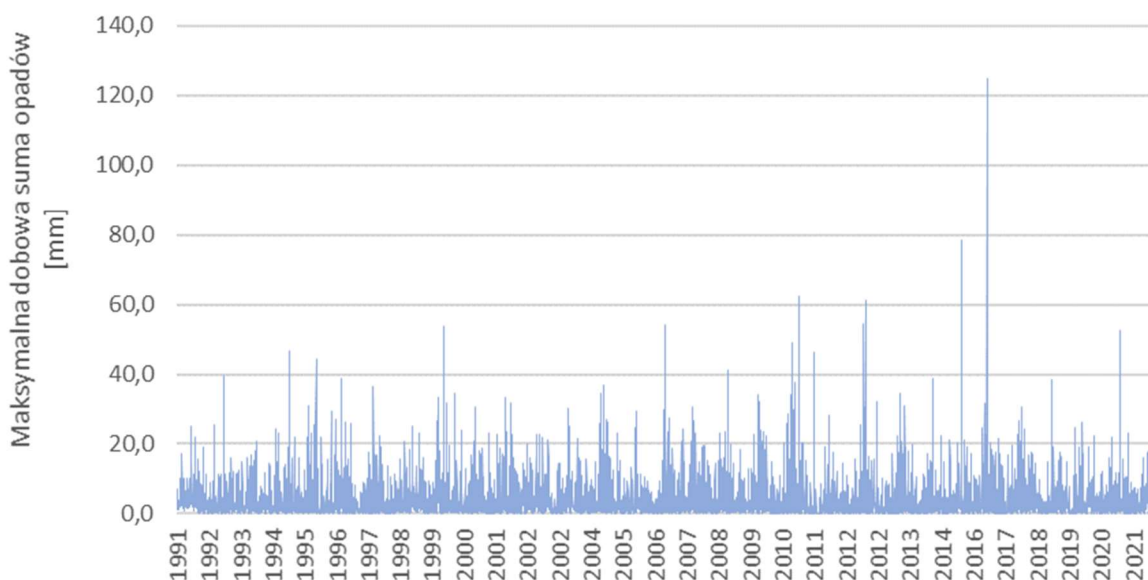


Rys.22. Średnie miesięczne sumy opadów atmosferycznych, Wejherowo, Gdańsk-Rębiechowo

W przebiegu rocznym największe średnie sumy opadów występują w lipcu (91,8 mm), natomiast najniższe są w kwietniu (36,6 mm) (rys. 22).

2.4.2 Maksymalne dobowe opady w miesiącu

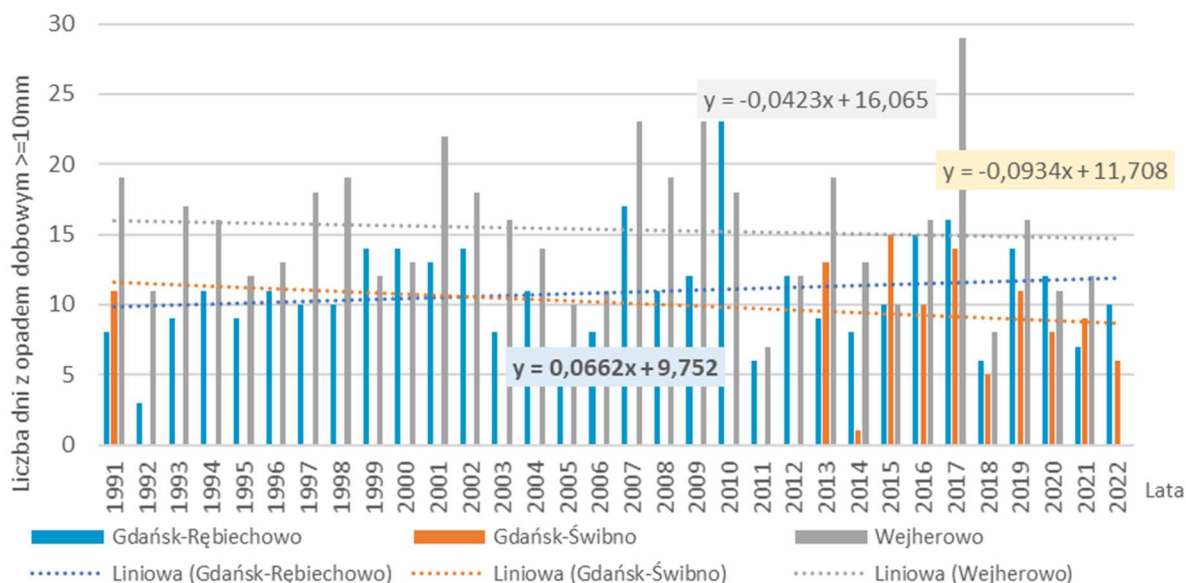
W przebiegu wieloletnim najwyższą wartość maksymalnych opadów dobowych na stacji Wejherowo (rys. 23) odnotowano 14 lipca 2016 r. (125 mm).



Rys.23. Przebieg wieloletni maksymalnych dobowych opadów atmosferycznych w miesiącu, Wejherowo

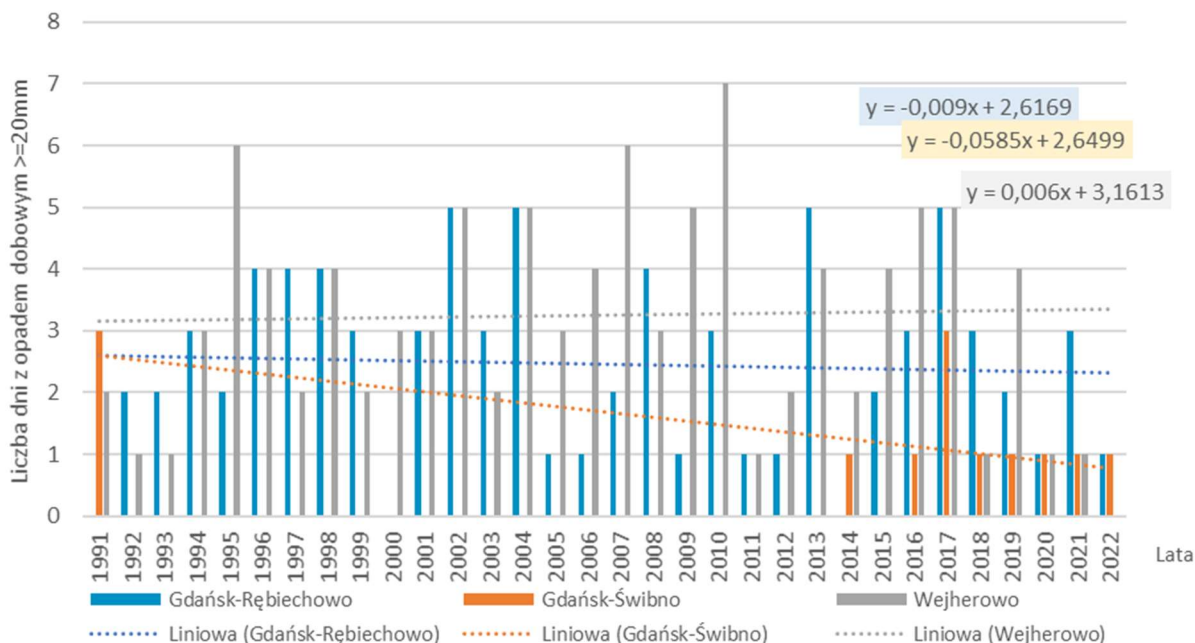
2.4.3 Dobowe opady o dużym natężeniu

Dobowe opady większe lub równe 10 mm występują przeciętnie 15 razy w roku na stacji Wejherowo (rys. 24). Na pozostałych stacjach meteorologicznych odnotowuje się w roku od 9 dni (Gdańsk-Świbno) do 11 dni (Gdańsk-Rębiechowo) z takim dobowym opadem. W przebiegu wieloletnim liczba opadów o takiej intensywności waha się od 7 dni w 2011 r. do 29 dni w 2017 r. W analizowanym wieloleciu liczba dni z opadem ≥ 10 mm wykazuje słabą tendencję spadkową (rys. 24).



Rys.24. Liczba dni z opadem większym bądź równym 10 mm, Wejherowo, Gdańsk- Rębiechowo, Gdańsk-Świbno

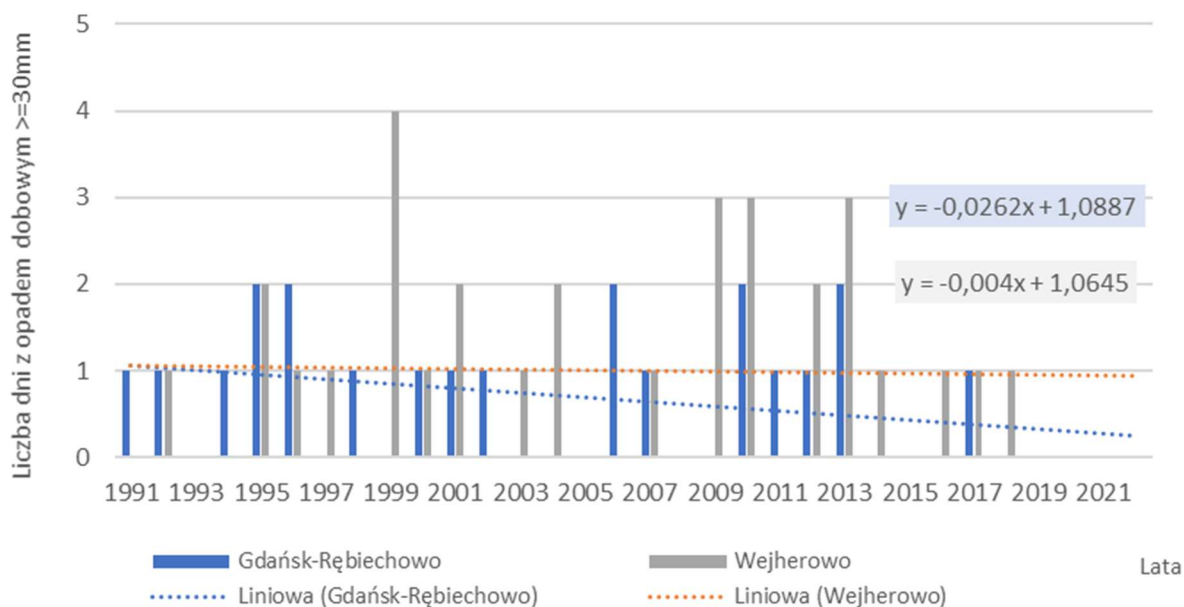
Przeciętnie trzy razy w roku na stacji Wejherowo występują opady większe lub równe 20 mm (rys. 25). Na pozostałych analizowanych stacji liczba epizodów takich opadów w ciągu roku wynosi średnio od 1 (Gdańsk-Świbno) do blisko 3 (Gdańsk-Rębiechowo). W wieloleciu liczba dni cechujących się takim opadem dobowym na stacji Wejherowo waha się od 1 (w sześciu latach) do 7 (2010 r.). Liczba dni z opadem o takim natężeniu nieznacznie się zwiększa w analizowanym okresie.



Rys.25. Liczba dni z opadem większym lub równym 20 mm, Wejherowo, Gdańsk- Rębiechowo, Gdańsk-Świbno

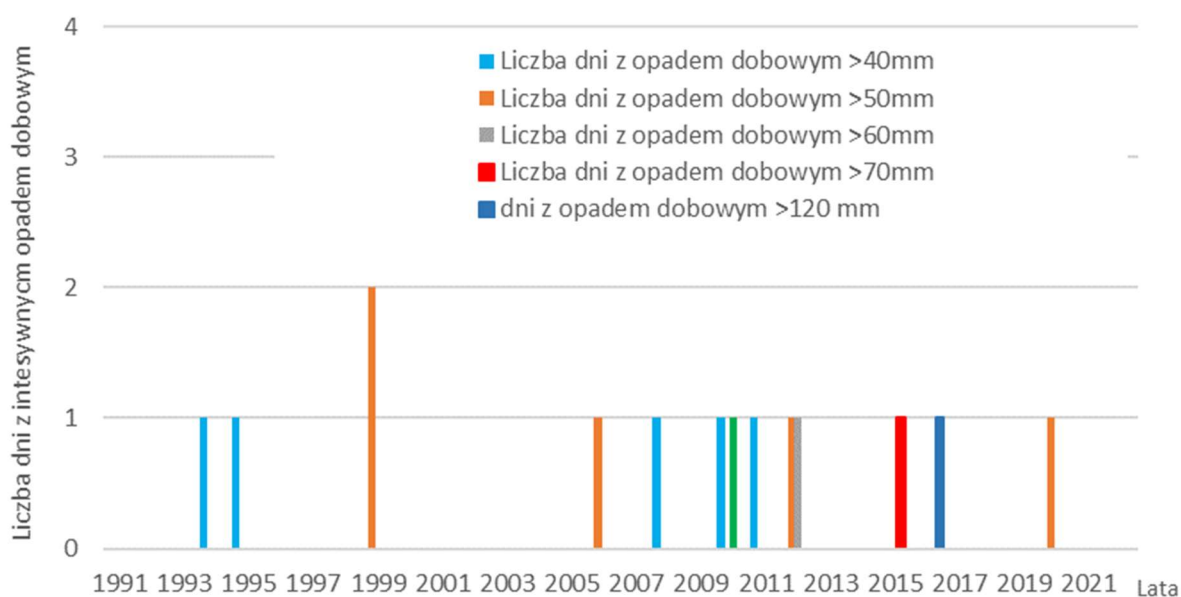
Opady dobowe większe lub równe 30 mm obserwuje się stosunkowo rzadko (rys. 26). W latach 1991-2022 odnotowano na stacji Wejherowo po jednym przypadku w dziesięciu latach, natomiast aż w trzynastu latach nie wystąpiły opady o takim natężeniu. Najwięcej dni z takim opadem (4 przypadki)

wystąpiło w 1999 r. W analizowanym wieloleciu nie zaznacza się wyraźna tendencja zmiany liczby dni z opadem dobowym większym lub równym 30 mm.



Rys.26. Liczba dni z opadem większym niż 30 mm, Wejherowo, Gdańsk- Rębiechowo

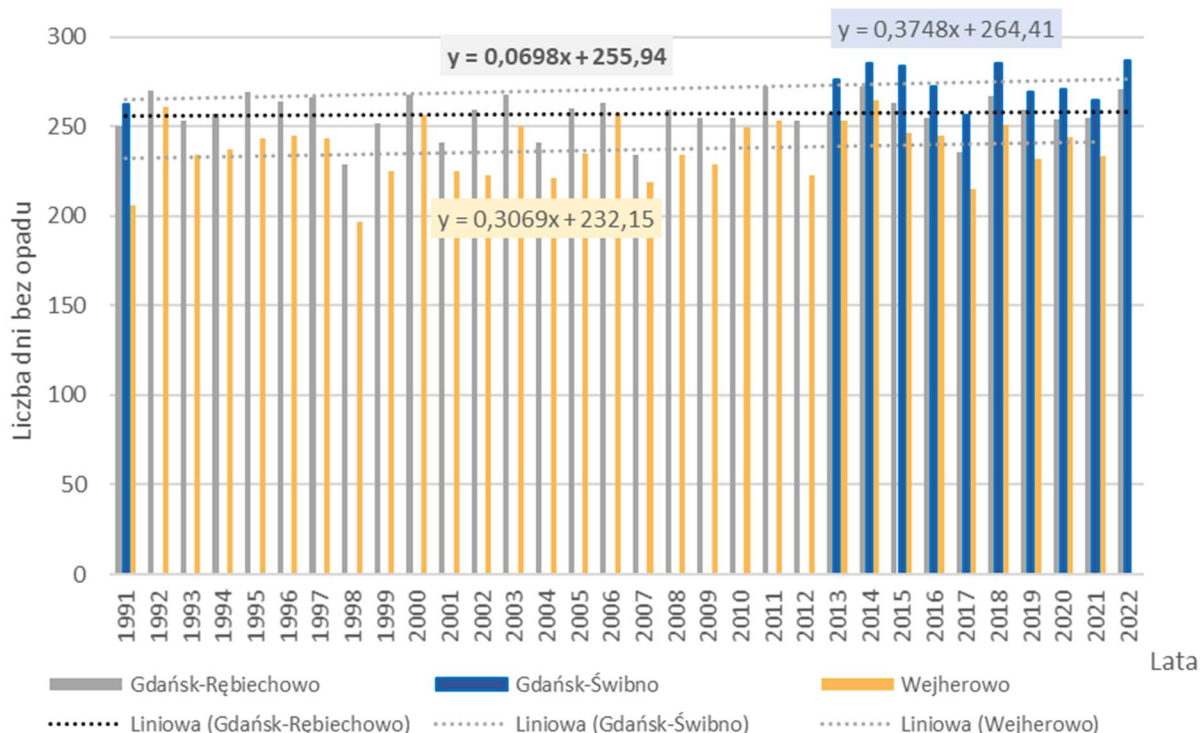
Opady dobowe o dużym natężeniu nie pojawiają się każdego roku, występują tylko pojedyncze w roku przypadki takich zdarzeń meteorologicznych na stacji Wejherowo (rys. 27). W latach 1991-2022 opady przekraczające lub równe 40 mm oraz przekraczające próg 50 mm odnotowano 5 razy. Opady dobowe przekraczające lub równe 60 mm i 70 mm wystąpiły odpowiednio 2 razy i 1 raz w ciągu 32-letniego okresu obserwacyjnego. W analizowanym wieloleciu tylko raz wystąpiły opady o najwyższym natężeniu, tzn. przekraczające 120 mm.



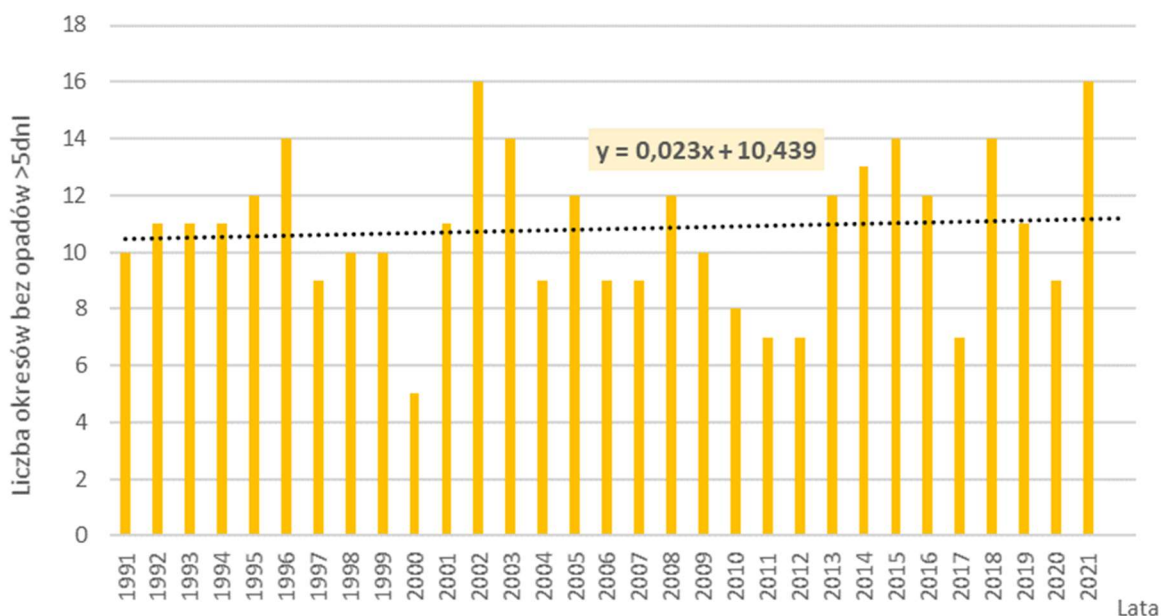
Rys.27. Liczba dni z opadem większym niż 40, 50, 60, 70, 80 mm, Wejherowo

2.4.4 Długotrwałe okresy bezopadowe

Dni bez opadu (opad<1mm) jest przeciętnie 237 w roku (stacja Wejherowo). W analizowanym okresie cechuje niewielka zmienność, od 197 dni w 1998 r. do 265 dni w 2014 r. Liczba dni bez opadu wykazuje tendencję wzrostową, średnio o 3 dni w ciągu dekady (rys. 28).



Rys.28. Liczba dni bez opadu, Wejherowo, Gdańsk- Rębiechowo, Gdańsk-Świbno

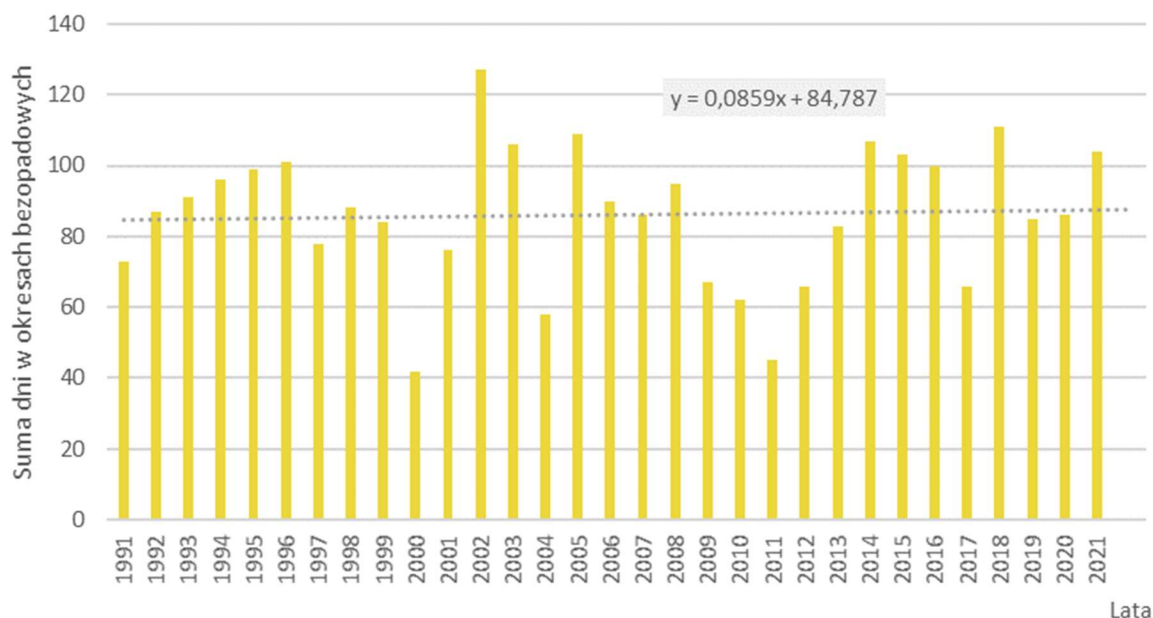


Rys.29. Liczba okresów bez opadu, Wejherowo

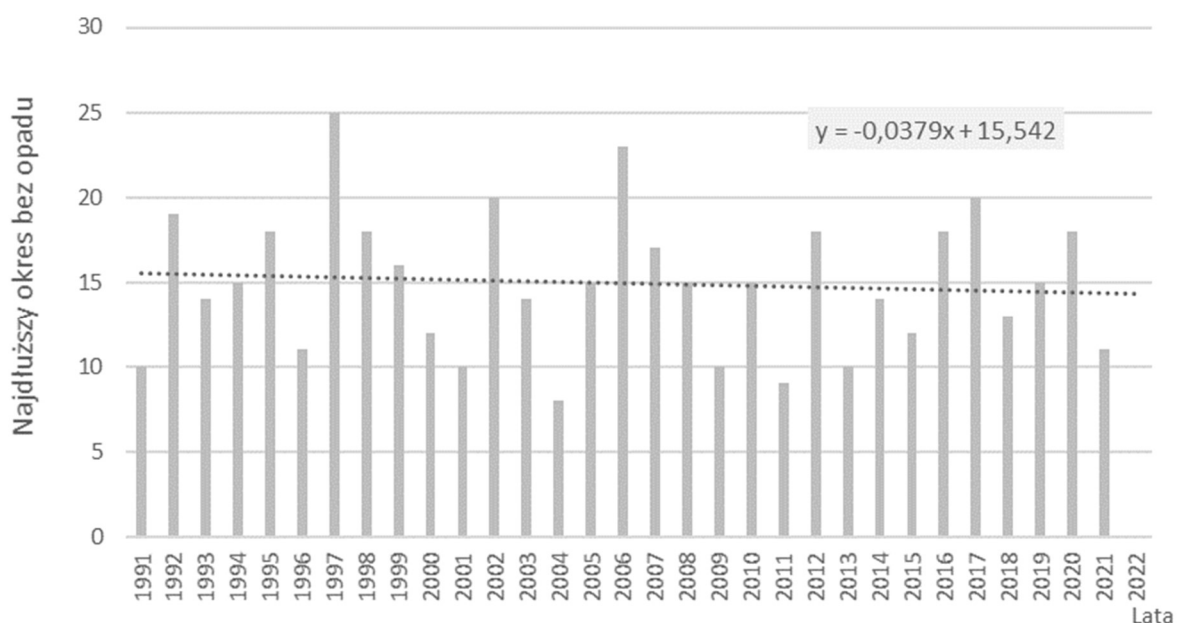
Okresy bezopadowe, definiowane jako trwające ponad 5 dni okresy bez opadu, występują na stacji Wejherowo przeciętnie 11 razy w roku (rys. 29). Największa ich liczba została odnotowana w 2002 r.

i 2021 r., tj. 16 epizodów ponad 5-dniowych ciągów bez opadów, najmniejsza natomiast, 5 epizodów, w roku 2000. W analizowanym okresie zaznaczyła się tendencja wzrostu liczby okresów bezopadowych o 0,2 przypadku w ciągu dekady.

Sumaryczna długość okresów bezopadowych wynosi w roku przeciętni 86 dni. W badanym wieloleciu wahała się od 42 dni w 2000 r. do 127 dni w 2002 r. (rys. 30). Suma dni w okresach bezopadowych w roku zwiększa się średnio o blisko jeden dzień w ciągu dekady.



Rys.30. Sumaryczna długość okresów bez opadu, Wejherowo



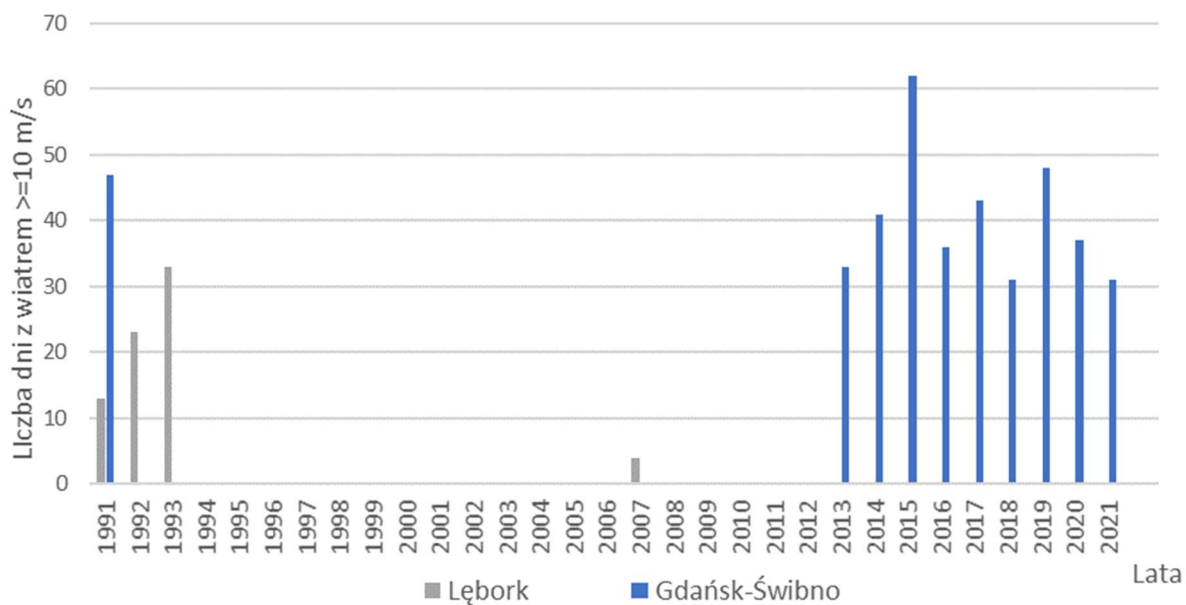
Rys.31. Najdłuższe okresy bezopadowe, Wejherowo

Najdłuższy okres bez opadu, trwający 25 dni, wystąpił od 5 sierpnia do 31 sierpnia 1997 r. (rys. 31). Czas trwania okresów bezopadowych ulega skróceniu, średnio o 0,4 dnia/dekadę.

2.5 Warunki anemometryczne

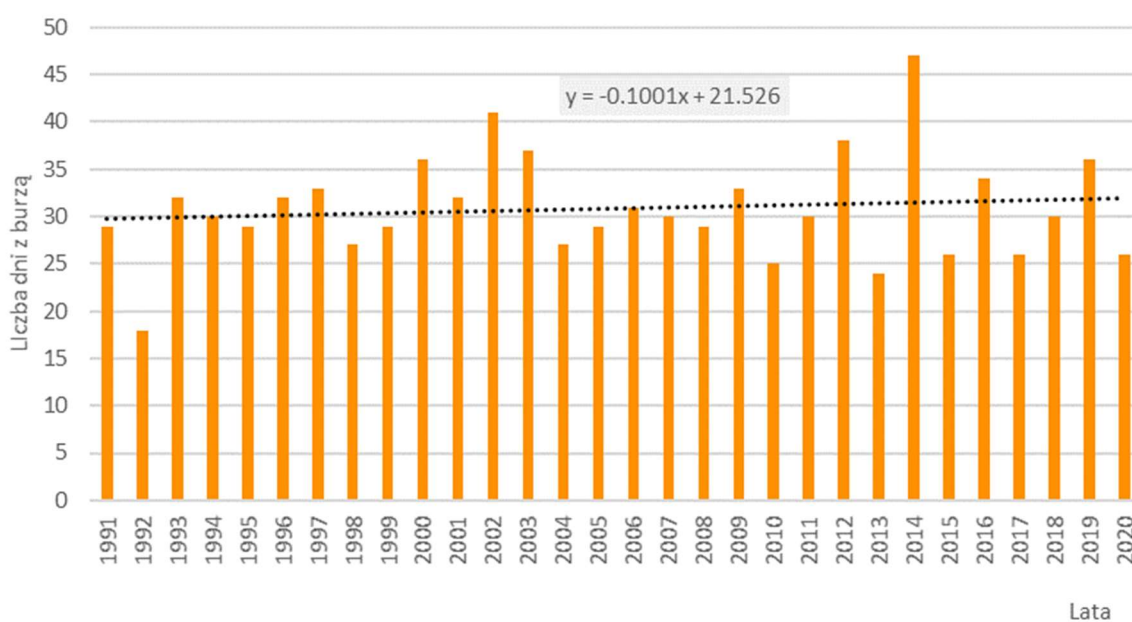
2.5.1 Silny i bardzo silny wiatr

Wiatr przekraczający prędkość 10 m/s występuje na stacji Gdańsk-Świbno średnio 41 razy w ciągu roku (rys. 32). Największą intensywność tego zjawiska w latach 2013-2021 odnotowano w 2015 r. (62 dni), najmniejszą natomiast w 2018 r. (31 dni). Z uwagi na zbyt krótki okres obserwacji trudno oceniać trend zmian występowania tego zjawiska na badanym obszarze.



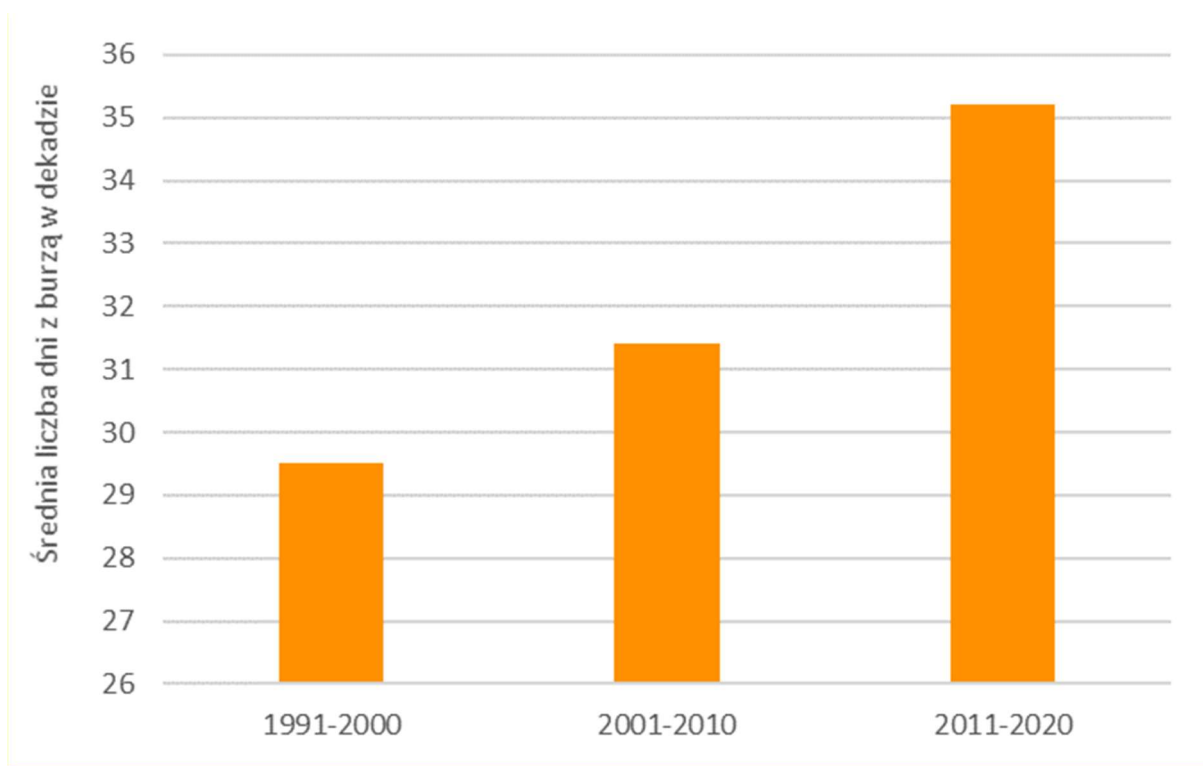
Rys.32. Liczba dni z wiatrem o prędkości większej niż 10 m/s w wieloleciu 1991-2022, Lębork

2.5.2 Burze



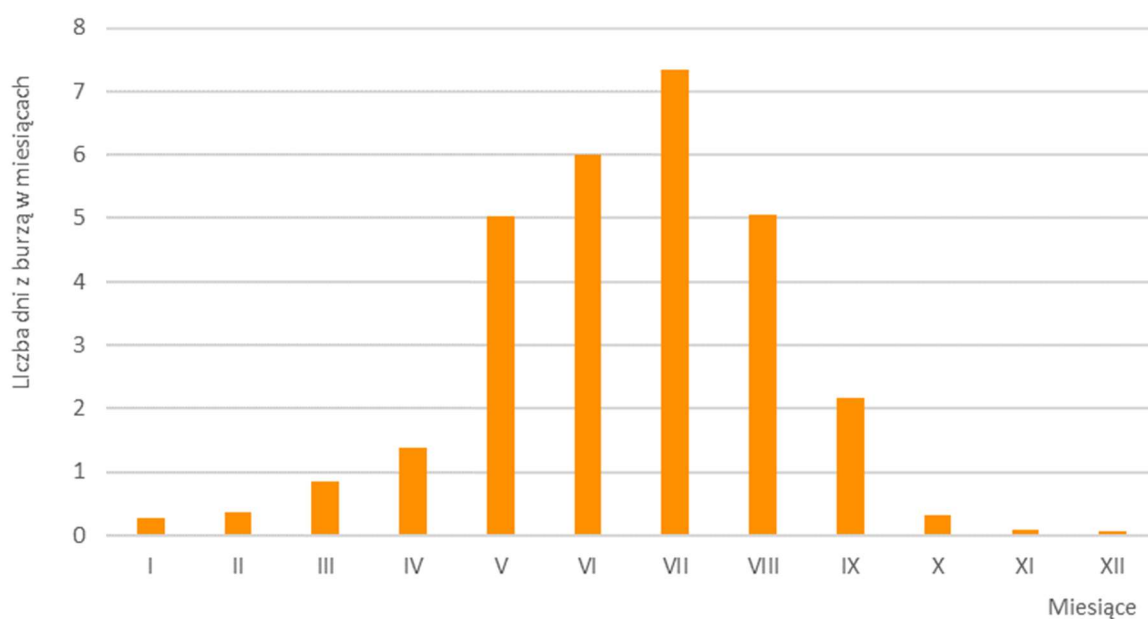
Rys.33. Liczba dni z burzą w wieloleciu 1991-2020, Lębork

Zjawisko burzy występuje średnio 31 razy w roku na stacji Lębork w okresie 1991-2020. Najwięcej burz, 47 epizodów, odnotowano w 2014 r., natomiast najmniej zjawisk meteorologicznych o takim charakterze, 18, było w 1992 r. (rys. 33). W wieloleciu zaznaczył się wzrost liczba dni z burzą, średnio o około 3 dni w ciągu dekady (rys. 34).



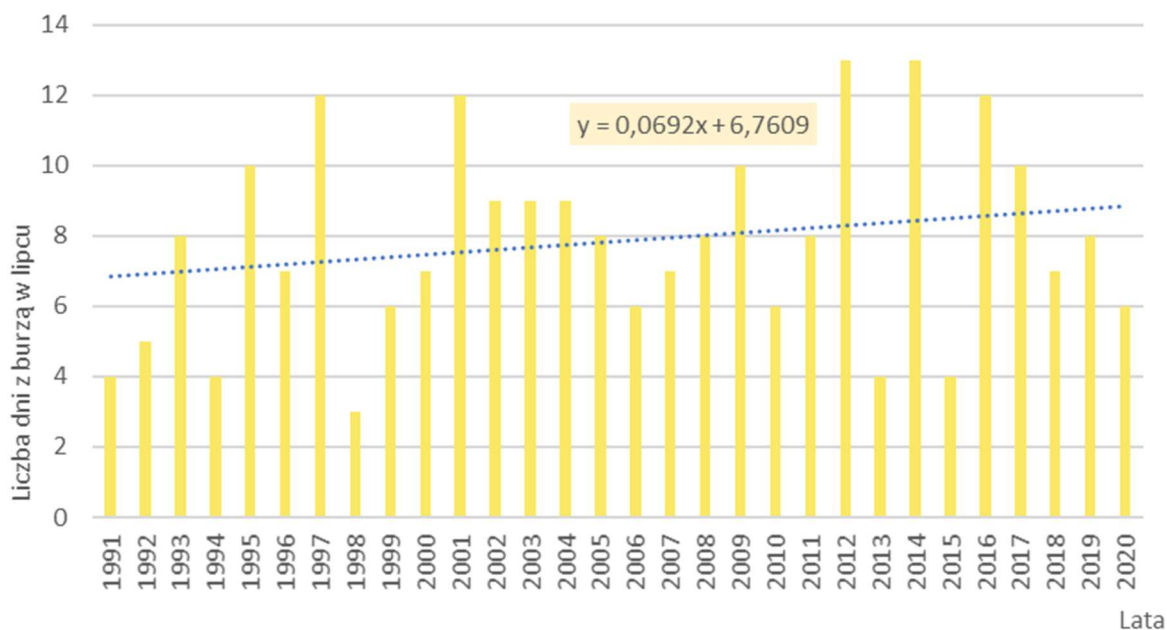
Rys.34. Średnia liczba dni z burzą w wieloleciu, Lębork

W przebiegu rocznym najwięcej burz przypada na okres letni, od czerwca do sierpnia. Najczęściej burze występują w lipcu i czerwcu, odpowiednio 7 i 6 dni w miesiącu (rys. 35). W chłodnej porze roku pojawiają się nieliczne zjawiska burzowe, najrzadziej w listopadzie i grudniu.



Rys.35. Przebieg roczny dni z burzą, Lębork

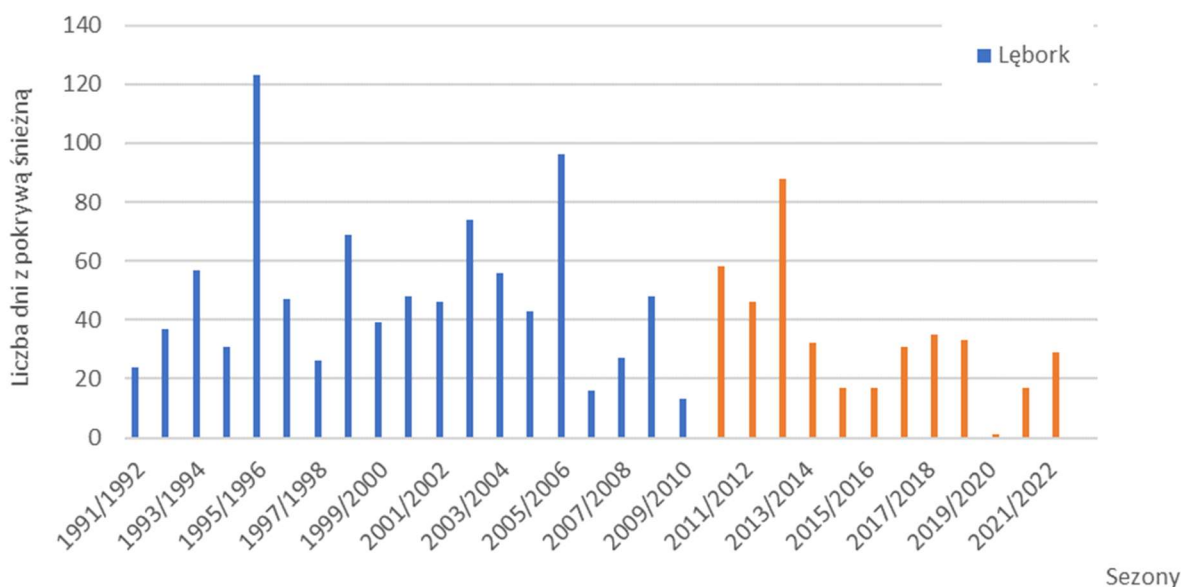
W analizowanym wieloleciu 1991-2020 obserwujemy się nieznaczne zwiększanie się liczby burz w miesiącu lipcu, charakteryzującym się największym natężeniem zjawisk burzowych w roku (rys. 36).



Rys.36. Liczba dni z burzą w lipcu, Lębork

2.6 Pokrywa śnieżna i opady śniegu

Pokrywa śnieżna występuje przeważnie od grudnia do marca. W analizowanym wieloleciu najwcześniej pokrywa śnieżna pojawia się w październiku, najpóźniej zanika w kwietniu.

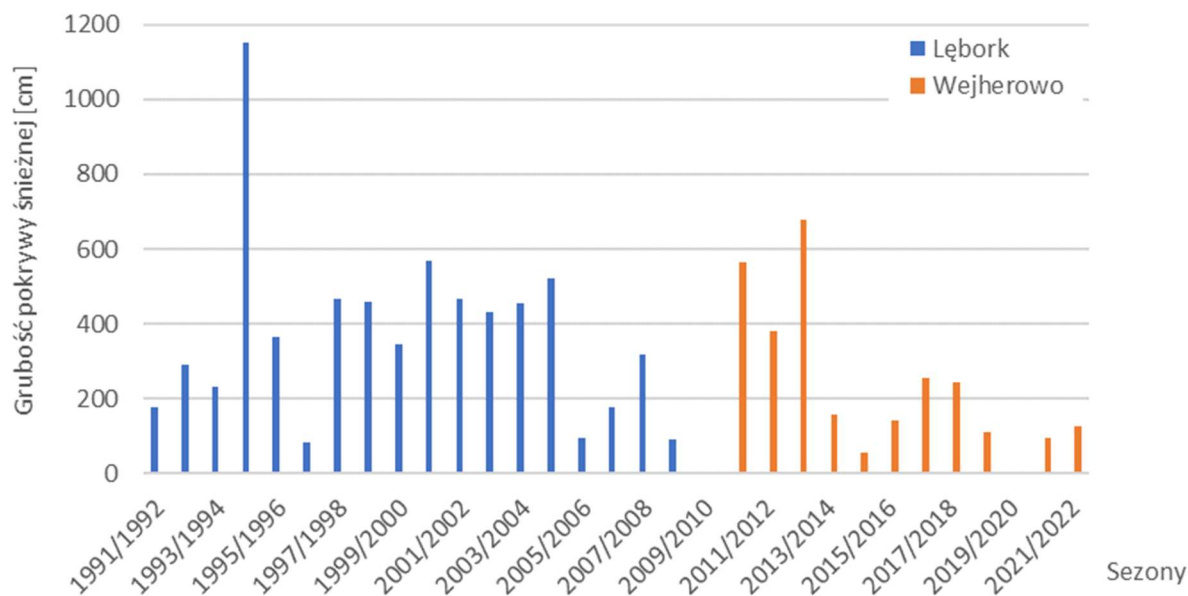


Rys.37. Liczba dni z pokrywą śnieżną w sezonach zimowych, Wejherowo, Lębork

Średnia wieloletnia liczba dni z pokrywą śnieżną wynosi 48 dni na stacji Lębork w okresie od 1991 r. do 2010 r. i 36 dni na stacji Wejherowo w okresie od 2011 r. do 2020 r. Najdłużej pokrywa śnieżna na stacji Lębork utrzymywała się przez 123 dni w sezonie zimowym 1995/1996, natomiast na stacji

Wejherowo 88 dni w sezonie zimowym 2012/2013 (rys. 37). Najkrócej pokrywa śnieżna na stacji Łębork zalegała w sezonie 2009/2010 (13 dni), a na stacji Wejherowo w sezonie zimowym 2019/2020 (2 dni). W analizowanym okresie zaznaczyła się tendencja spadkowa długości zalegania pokrywy śnieżnej.

Pokrywa śnieżna występowała we wszystkich sezonach zimowy na analizowanych stacjach. Najwyższa suma grubości pokrywy śnieżnej na stacji Łębork wynosiła 1150 cm w sezonie zimowym 1994/1995 i 677 mm na stacji Wejherowo w sezonie zimowym 2012/2013 (rys. 38). Największą wysokość pokrywy śnieżnej na stacji Łębork odnotowano w lutym 1991 r. – 41 cm, natomiast na stacji Wejherowo w styczniu 2011 r. – 33 cm.



Rys.38. Grubość pokrywy śnieżnej w wieloleciu, Wejherowo, Łębork

3 Prognozowane zmiany klimatu

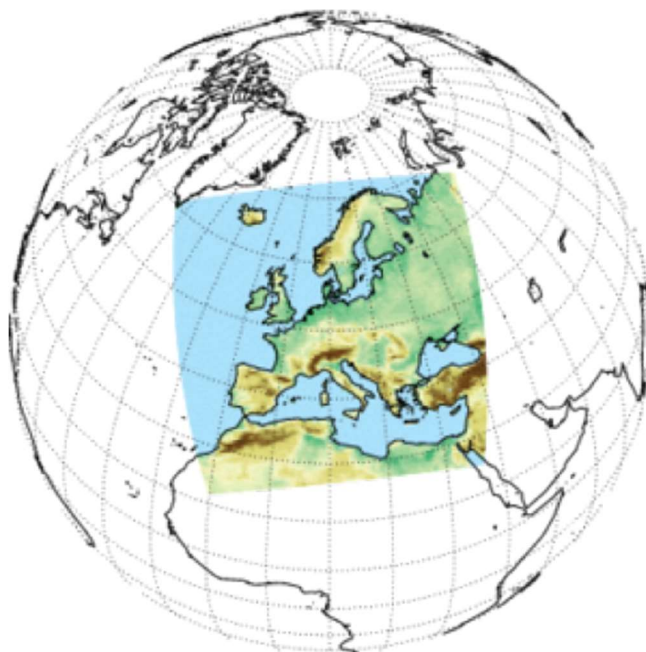
3.1 Uwagi metodyczne

Wyniki globalnych modeli klimatu (ang. GCM – Global Climate Models) ze względu na rozdzielczość nie są wystarczające na potrzeby planowania działań adaptacyjnych w poszczególnych krajach. Do tego celu stosowane są regionalne modele klimatu (ang. RCM – Regional Climate Models), wykorzystujące technikę dynamicznego skalowania dla zwiększenia rozdzielczości przestrzennej (ang. dynamical downscaling). Celem uzyskania lepszej reprezentacji cech lokalnych, wyniki prognoz regionalnych można poddać dalszemu procesowi skalowania statystycznego z wykorzystaniem dostępnych wyników obserwacji.

Wyniki modeli globalnych będących podstawą opracowania Raportów Oceny IPCC stanowią informację referencyjną dla opracowań regionalnych scenariuszy zmian klimatu. Aktualne wyniki pochodzą ze zbioru Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Na bazie tych wyników powstały projekcje regionalne w ramach międzynarodowej inicjatywy CORDEX, której częścią dla obszaru Europy jest EuroCORDEX (rys. 39). W ramach EuroCORDEX dostępne są zbiory symulacji

regionalnych modeli klimatycznych, w których wymuszenie zewnętrzne pochodzi ze zbioru CMIP5. Wyniki modeli z repozytorium EuroCORDEX stanowią dane wejściowe do badań nad regionalnymi oddziaływaniami zmian klimatu w różnych sektorach w większości krajów europejskich.

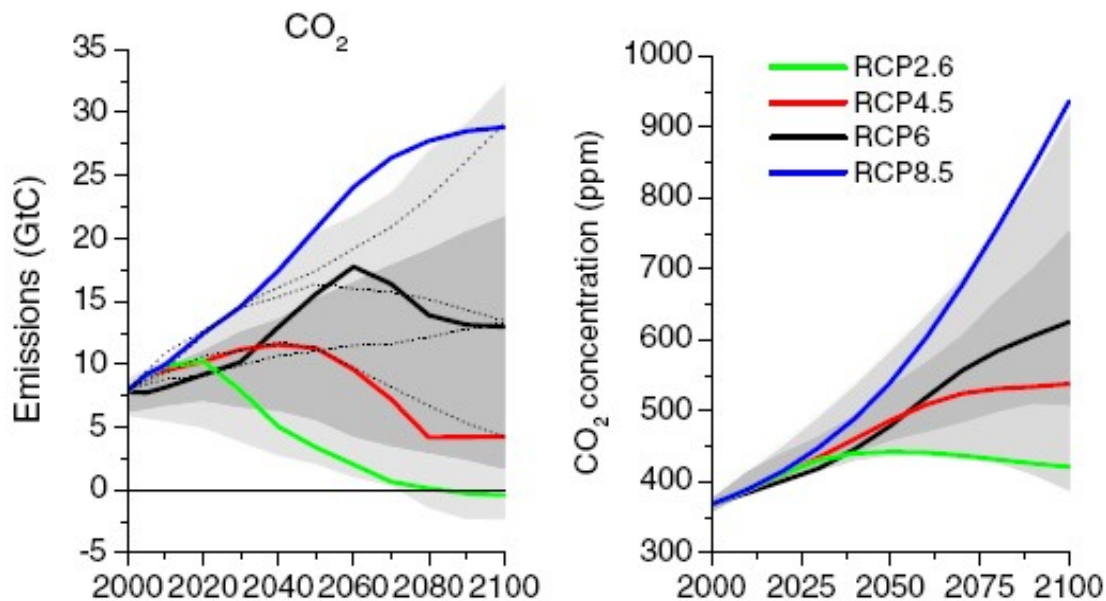
Wzorując się na licznych doświadczeniach europejskich, warunki przyszłego klimatu dla obszaru Polski opracowano w oparciu o symulacje klimatyczne udostępniane w ramach projektu EuroCORDEX. Wyniki EuroCORDEX dostępne są dla okresu 2006-2100. Wykorzystano dostępne symulacje regionalnych modeli klimatu dla obszaru obejmującego całą Europę, na siatce regularnej o rozdzielczości $0,11^\circ$ (ok. 12,5 km).



Rys.39. Domena obliczeniowa EuroCORDEX

Źródło: <https://euro-cordex.net/>

Klimat zależy od wielu czynników globalnych, wśród których najistotniejszym jest ilość gazów cieplarnianych w atmosferze. Zgodnie z wynikami analiz Międzyrządowego Panelu ds. Zmian Klimatu to gazy cieplarniane (głównie dwutlenek węgla) odpowiadają za obserwowany w wielu miejscach na świecie wzrost temperatury. W ostatnim sześćdziesięcioleciu średnie stężenie dwutlenku węgla w atmosferze wzrosło z 315 do ponad 415 milionowych części objętości (ppm) i rośnie o około 2 ppm/rok. Aby prognozować zmiany temperatury i innych parametrów klimatycznych, naukowcy starają się przewidzieć tempo zwiększania się zawartości dwutlenku węgla w atmosferze. W celu uchwycenia niepewności wynikających z możliwych alternatywnych ścieżek rozwoju gospodarczego i socjoekonomicznego, rozważane są różne, uzgodnione międzynarodowo, scenariusze, które co kilka lat podlegają uaktualnieniu (rys. 40).



Rys.40. Różnice projekcji emisji CO₂ (lewy panel) i prognozowanych stężeń CO₂ (prawy panel) pomiędzy scenariuszami RCP. Obszar zacieniony odpowiada 98. i 90. percentylowi (jasny i ciemny szary) – dane z literatury

Źródło: van Vuuren et al. (2011)

Analizy zmian temperatury i opadu przeprowadzono dla dwóch scenariuszy emisyjnych (zgodnie z literaturą tematu i dostępnością danych), opisanych akronimami RCP¹ 4.5 oraz RCP 8.5:

- RCP 4.5 – scenariusz umiarkowany, zakładający wprowadzenie nowych technologii dla uzyskania wyższej niż obecnie redukcji emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcie w 2100 roku koncentracji CO₂ nie przekraczającej 540 ppm (względem 410 ppm w 2020 roku) oraz wymuszenia radiacyjnego 4,5 W/m²;
- RCP 8.5 – scenariusz ekstrapolacyjny, zakładający utrzymanie aktualnego tempa wzrostu emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcie w 2100 roku koncentracji CO₂ na poziomie 940 ppm (względem 410 ppm w 2020 roku) oraz wymuszenia radiacyjnego 8,5 W/m², nazywany „business as usual”.

Scenariusze RCP 4.5 i RCP 8.5 pokazują zmiany klimatu w przypadku podjęcia działań mających na celu ograniczenie emisji gazów cieplarnianych (RCP 4.5) oraz braku takich działań (RCP 8.5). Niższe wartości RCP niż RCP 4.5 są korzystniejsze dla środowiska i ludzi, ale ich osiągnięcie będzie wymagało bardzo rygorystycznych działań ograniczających emisję gazów cieplarnianych i tym samym łagodzących zmiany klimatu.

3.1.1 Wyniki modeli klimatu

Podstawowe parametry meteorologiczne pozwalające na określenie ekspozycji i wrażliwości na zmiany klimatu to:

¹ Representative Concentration Pathways – Reprezentatywne Ścieżki Stężenia (RCP) – scenariusze zmian klimatu służące do prognozowania przyszłych stężeń gazów cieplarnianych; opisują one przyszłe stężenia gazów cieplarnianych. Są formalnie przyjęte przez Międzyrządowy Panel ds. Zmian Klimatu (IPCC).

- temperatura średniodobowa [°C],
- dobowa temperatura maksymalna [°C],
- dobowa temperatura minimalna [°C],
- dobowa suma opadu [mm/doba].

Z repozytorium EuroCORDEX pobrano wszystkie dostępne dla powyższych czterech parametrów realizacje. Dla każdego parametru dostępne było kilkanaście realizacji. Pojedyncza unikatowa realizacja jest jednoznacznie określona poprzez połączenie akronimu regionalnego modelu (RCM) wykorzystanego jako narzędzie obliczeniowe do downscalingu dynamicznego oraz akronimu globalnego modelu (GCM), którego wyniki zostały wykorzystane jako tzw. warunki brzegowe do symulacji.

Do obliczenia projekcji zmian klimatu zastosowano dodatkowo skalowanie statystyczne w oparciu o historyczne dane bazujące na obserwacjach oraz podejście wiążkowe, pozwalające na ocenę niepewności projekcji.

3.1.2 Historyczne dane meteorologiczne

Jako dane referencyjne, pozwalające na wykorzystanie technik statystycznych, wykorzystano pola temperatury i opadu uzgodnione przestrzennie do siatki regularnej, bazujące na obserwacjach naziemnych lub będące wynikiem reanaliz:

- IMGW – dane przygotowane na potrzeby pracy przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, to pomiary z sieci stacji meteorologicznych interpolowane do siatki regularnej wzorowanej na siatce EuroCORDEX, zagęszczonej dwukrotnie do rozdzielczości około 0,055°;
- E-OBS – dane w rozdzielczości dobowej obejmujące pole sumy opadu oraz pola temperatury minimalnej, średniej i maksymalnej dobowej w Europie z repozytorium ECA&D (European Climate Assessment & Dataset). Pełen zestaw danych obejmuje okres od 01.01.1950 i jest ciągle aktualizowany. Dane są udostępniane na regularnej siatce o rozdzielczości 0,25°;
- Reanaliza ERA5 – wytworzona w oparciu o metodę asymilacji danych 4DVar z CY41R2 systemu Integrated Forecast System (IFS) organizacji ECMWF. ERA5 zawiera dane globalne o rozdzielczości około 31 km;
- UERRA (ang. *Uncertainties in Ensembles of Regional ReAnalyses*) – nowa eksperymentalna reanaliza regionalna dla Europy, uwzględniająca podejście wiążkowe.

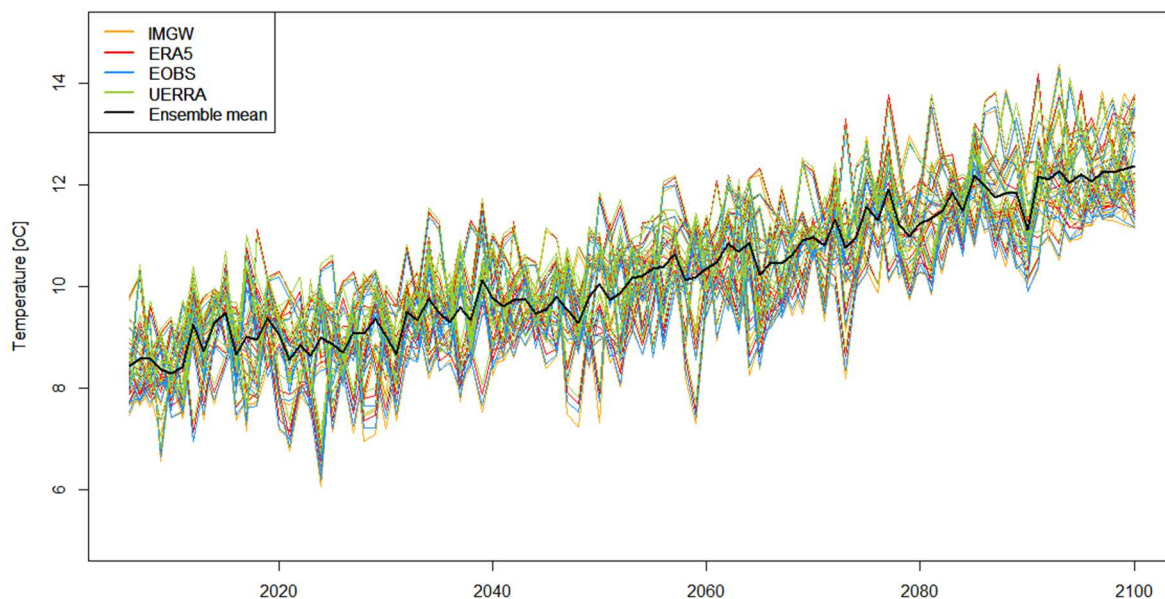
3.1.3 Statystyczne skalowanie projekcji klimatycznych (downscaling)

Na potrzeby zastosowania statystycznego skalowania historyczne pola zmiennych meteorologicznych zostały poddane interpolacji do siatki EuroCORDEX w domenie EUR-11.

Dla każdej realizacji pobranej z repozytorium EuroCORDEX wykonano statystyczne skalowanie (*downscaling*) z wykorzystaniem pakietu statystycznego R (funkcje z pakietu QMAP) względem bazujących na obserwacjach danych historycznych, dla okresu referencyjnego 2006-2018.

Na podstawie zależności, które zostały ustalone indywidualnie dla każdego modelu dla okresu referencyjnego, wykonano skalowanie obejmujące cały okres analiz – do roku 2100. W wyniku zastosowania statystycznego skalowania, dzięki wykorzystaniu metody mapowania kwantyli, uzyskano

redukcję błędu średniego, poprawę rozrzutu wartości ekstremalnych oraz lepsze przybliżenie rozkładu gęstości prawdopodobieństwa.



Rys.41. Finalna projekcja temperatury średniej rocznej na podstawie scenariusza RCP 8.5

Po wykonaniu statystycznego skalowania powstały niezależne wiązki bazujące na opisanych powyżej różnych zestawach danych obserwacyjnych. Rysunek 41 przedstawia przykładowy przebieg temperatur średnich rocznych prognozowanych przez indywidualne regionalne modele klimatu po zastosowaniu procedury statystycznego skalowania z wykorzystaniem czterech różnych zestawów danych referencyjnych oraz scenariusz finalny, obliczony jako średnia wiązki, dla scenariusza RCP 8.5. Finalna projekcja zmian została obliczona jako średnia arytmetyczna wszystkich indywidualnych realizacji tworzących wiązkę.

3.1.4 Prognozowane zmiany temperatury i opadu

Na podstawie czterech podstawowych parametrów (temperatury średniodobowej, dobowej temperatury minimalnej, dobowej temperatury maksymalnej i sumy dobowej opadu) obliczony został zestaw indeksów klimatycznych pozwalających na ocenę zmiany narażenia w mieście Reda na termiczne i opadowe warunki średnie i ekstremalne. Analiza została wykonana dla dwóch scenariuszy rozwoju: RCP 4.5 i RCP 8.5. Zmiany w warunkach przyszłego klimatu analizowano na podstawie wartości rocznych (do 2050 roku) oraz średniomiesięcznych w trzech horyzontach czasowych: dla roku 2030 (jako średnia z dziesięciolecia 2026-2035), dla roku 2040 (jako średnia z dziesięciolecia 2036-2045) oraz 2050 (jako średnia z dziesięciolecia 2046-2055). Dla warunków klimatu bieżącego przeprowadzono obliczenia dla roku 2010, obliczonego jako średnia z lat 2006-2015. Analiza wartości średniorocznych została wsparta dodatkowo o analizę trendów liniowych wyznaczonych jako liniowe funkcje regresji analizowanych zmiennych. Charakter rozwojowy danego wskaźnika opisano następującą funkcją liniową:

$$y = a \cdot x + b,$$

gdzie:

a – współczynnik kierunkowy prostej regresji (tangens kąta nachylenia),

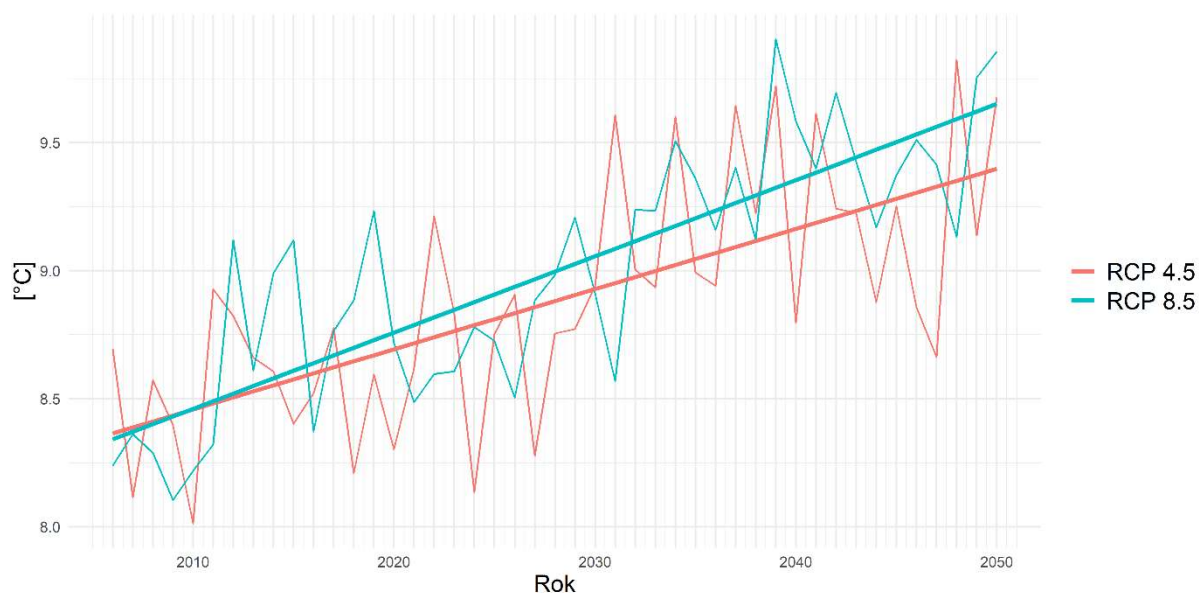
b – wyraz wolny (wartość w punkcie przecięcia prostej regresji z osią y, dla $x = 0$).

Anomalie w ujęciu wartości średniomiesięcznych analizowanych parametrów wyznaczono jako różnice pomiędzy wartościami dla rozpatrywanych horyzontów czasowych: 2030 (jako średnia z lat 2026-2035) oraz 2050 (jako średnia z lat 2046-2055) względem klimatu bieżącego – 2010 (jako średnia z lat 2006-2015).

3.2 Prognozowane zmiany temperatury – średnie warunki termiczne

3.2.1 Średnia roczna temperatura powietrza

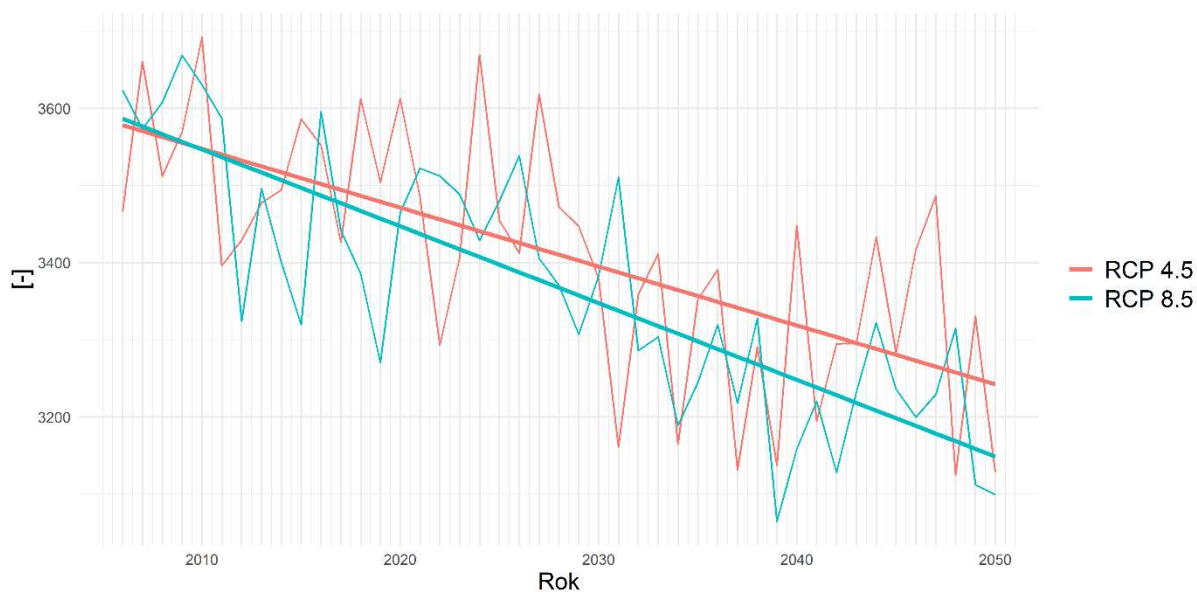
Z prognozy wynika, iż dla wartości temperatury średniej rocznej w obu scenariuszach występuje trend wzrostowy (rys. 42). Jak wskazują proste regresji, wzrost temperatur szybszy będzie w RCP 8.5. Ma on w scenariuszu ekstrapolacyjnym wynieść w ciągu analizowanego okresu około 1,3°C wobec 1,0°C w scenariuszu umiarkowanym.



RCP	b	a
RCP 4.5	8.34e+00	2.35e-02
RCP 8.5	8.31e+00	2.98e-02

Rys.42. Średnia roczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.2.2 HDD – stopniodni z temperaturą średnią dobową < 18°C



Rys.43. HDD – stopniodni z temperaturą średnią dobową < 18°C, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Prognoza stopniodni dla średniej dobowej temperatury powietrza poniżej 18°C wykazuje w obu scenariuszach tendencję spadkową, która silniejsza jest w scenariuszu ekstrapolacyjnym (rys. 43). Do roku 2050 spadek HDD wynieść ma około 340 w RCP 4.5, w RCP 8.5 zaś około 440, co stanowi odpowiednio 9% i 12% wartości początkowej.

3.2.3 Liczba dni wegetacyjnych ($T_{sr} > 5^{\circ}\text{C}$)

Liczba dni wegetacyjnych, ze średniodobową temperaturą powietrza powyżej 5°C, wykazuje w perspektywie kolejnych dekad tendencję wzrostową (rys. 44). Ma ona być silniejsza w RCP 8.5. Do 2050 roku nastąpić ma wzrost o około 17 dni w scenariuszu umiarkowanym, w ekstrapolacyjnym zaś o około 26. Stanowi to odpowiednio 7% i 11% wartości na początku analizy.

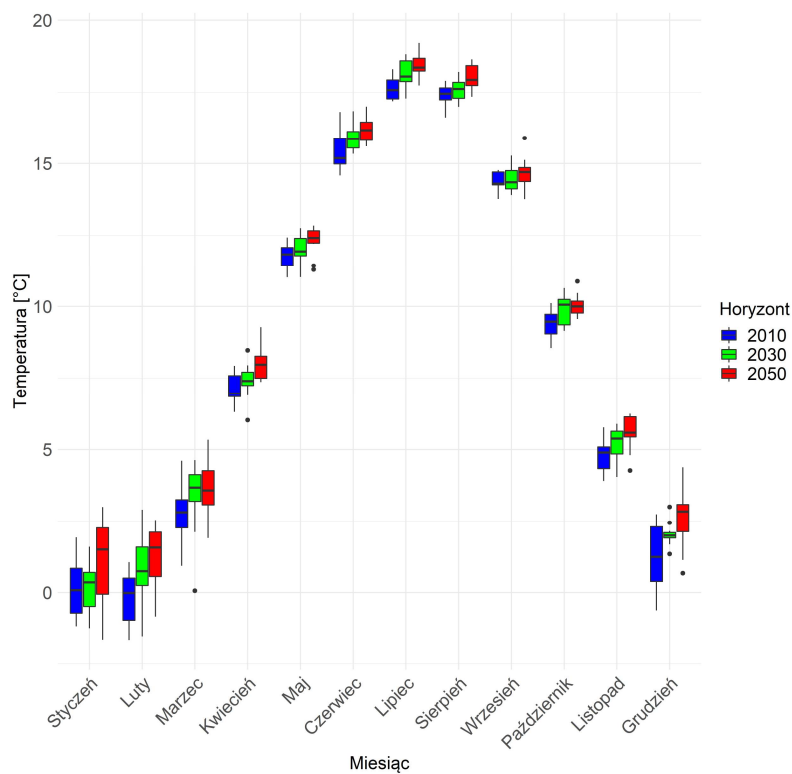


Rys.44. Liczba dni wegetacyjnych ($T_{\text{śrd}} > 5^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda

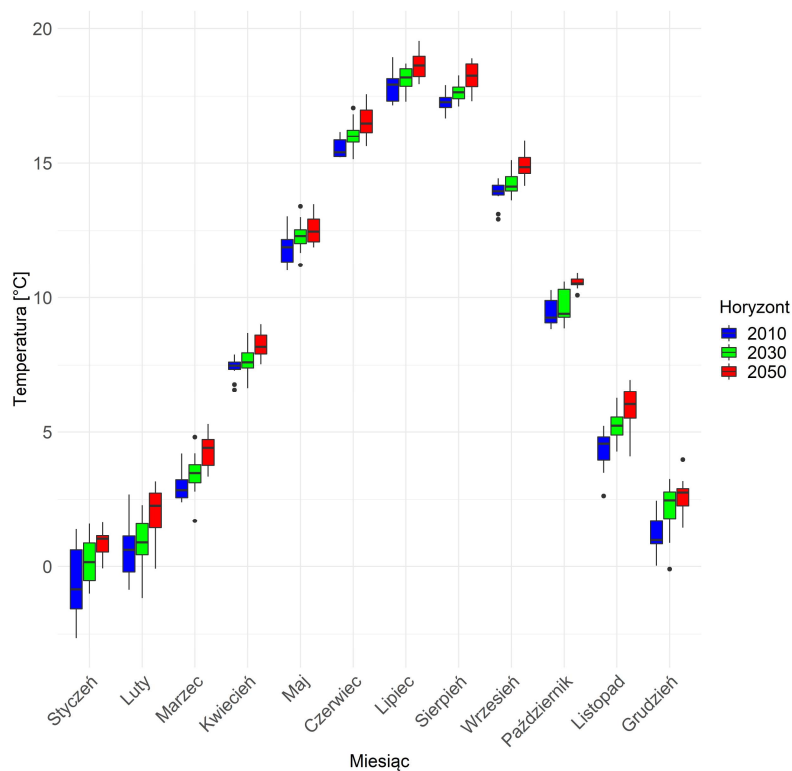
3.2.4 Temperatura średniomiesięczna

Na rysunkach od 45 do 50 przedstawiono wartości średniomiesięcznej temperatury dla trzech horyzontów czasowych: 2010, 2030 oraz 2050 dla obu scenariuszy RCP 4.5 i RCP 8.5.

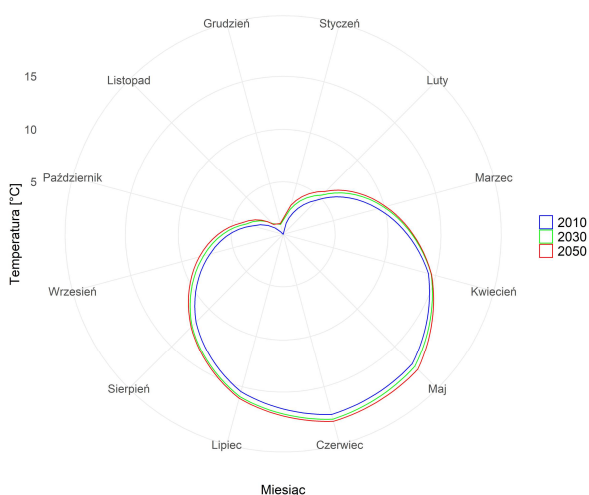
Z wykresów na rys. 46 i 48 wynika, że w obu scenariuszach klimatycznych następowało będzie ocieplenie we wszystkich porach roku. Wielkości tych zmian lepiej widoczne są na diagramach na rys. 45 i 46, z których odczytać można także zmienność temperatur średniomiesięcznych w poszczególnych latach badanych dekad. Wykres pudełkowy pokazuje wartości środkowe – mediany (pozioma linia wewnątrz pudełka), kwartyle dolne i górne (rozpiętość pudełka), percentyle 5. i 95. (zasięg wąsów) oraz ewentualne wartości odstające (kropki oddalone). Wynika z nich, że bardziej zmienne na obszarze Redy są i będą zimy niż miesiące ciepłe, choć w RCP 8.5 w horyzoncie roku 2050 także miesiące od maja do sierpnia wykazują znaczne rozstępy międzykwartyłowe. Oznacza to, że temperatury w zimie mogą bardziej różnić się w kolejnych latach.



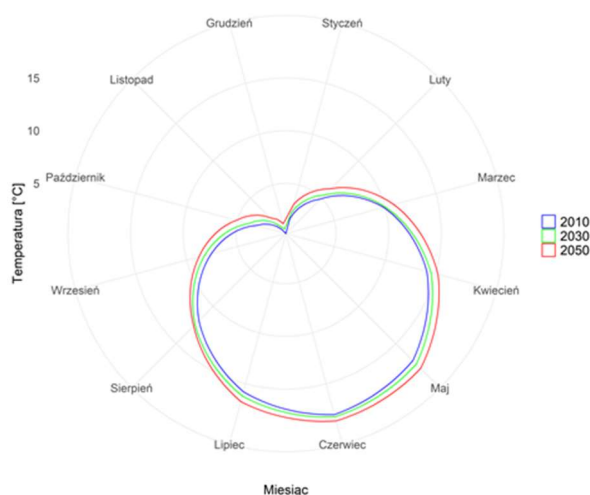
Rys.45. Średnia miesięczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 4.5



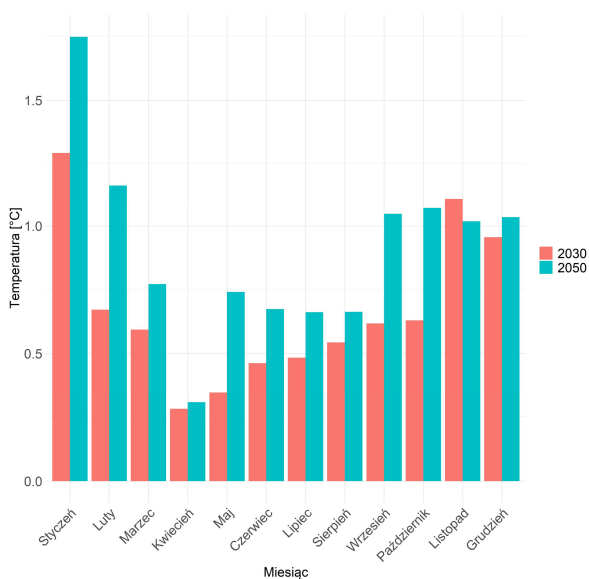
Rys.46. Średnia miesięczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 8.5



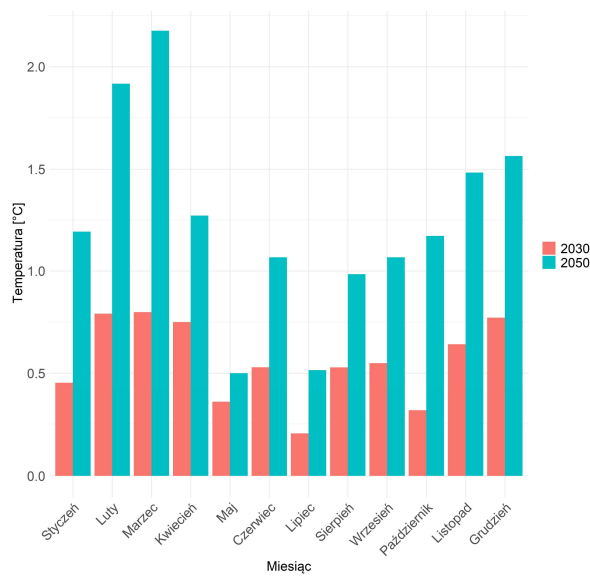
Rys.47. Średnia miesięczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów 2010, 2030 oraz 2050; scenariusz RCP 4.5



Rys.48. Średnia miesięczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów 2010, 2030 oraz 2050; scenariusz RCP 8.5



Rys.49. Anomalia średniej miesięcznej temperatury powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 4.5



Rys.50. Anomalia średniej miesięcznej temperatury powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 8.5

Same anomalie, czyli różnice między dekadami horyzontów 2030 i 2050 a dekadą bazową (2010), w kolejnych miesiącach roku najlepiej widoczne są na diagramach słupkowych na rys. 49 i 50. Wynika z nich, że większy wzrost temperatur następować będzie w miesiącach chłodnych niż ciepłych, co wiąże się ze złagodzeniem zim większym niż zaostrenie lata. Różnice w większości miesięcy większe są w scenariuszu ekstrapolacyjnym, w którym widoczne jest ponadto, że rozpędzają się one w ciągu analizowanego okresu. O ile w RCP 4.5 w większości miesięcy wzrost jest większy (nieraz znacznie)

w ciągu pierwszych 20 lat niż kolejnych, o tyle w RCP 8.5 jest przeważnie odwrotnie. W październiku, kiedy w horyzoncie 2050 roku nastąpić ma największe podwyższenie temperatury średniej aż o blisko 2°C, wzrost w horyzoncie roku 2030 wynosi 0,75°C. Podobne, a nawet większe różnice widoczne są w niektórych innych miesiącach; w marcu na drugą połowę analizowanego okresu przypada około 85% wzrostu temperatury średniomiesięcznej.

Podsumowując, należy stwierdzić, że prognozowany jest wzrost średnich temperatur w każdym miesiącu, a szczególnie w miesiącach zimowych.

3.3 Prognozowane zmiany temperatury – fale upałów

3.3.1 Średnia roczna temperatura maksymalna

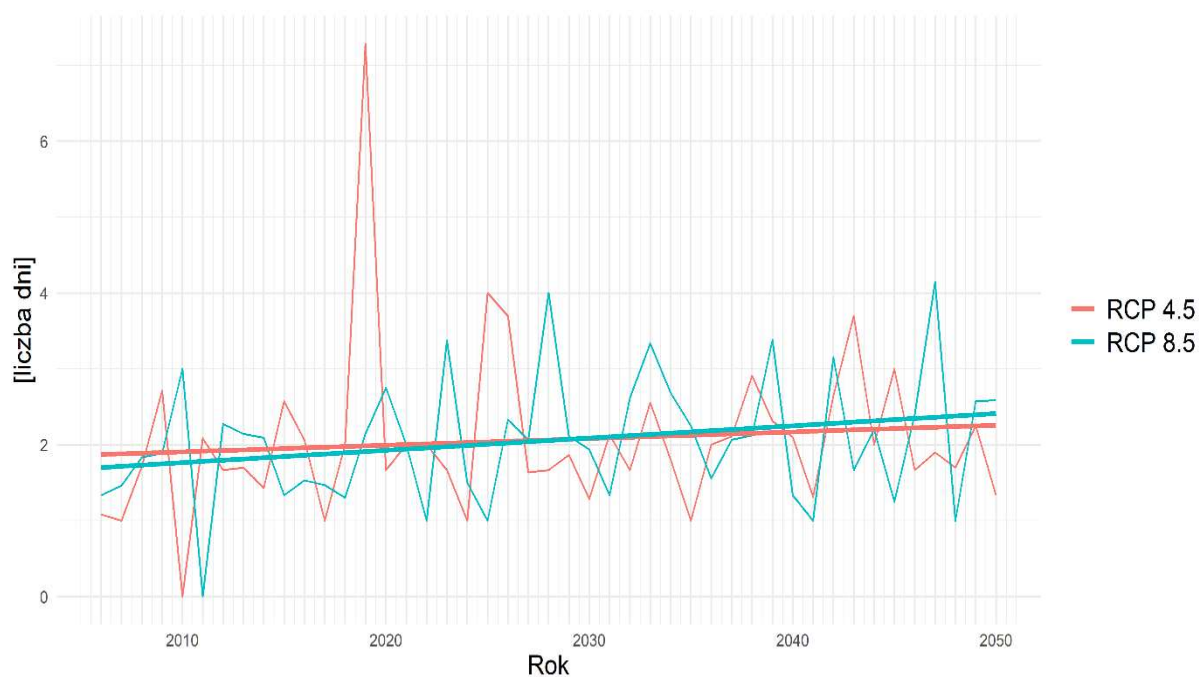


RCP	b	a
RCP 4.5	1.12e+01	2.26e-02
RCP 8.5	1.11e+01	2.92e-02

Rys.51. Średnia roczna temperatura maksymalna, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Prognoza w obu scenariuszach klimatycznych wskazuje na wzrost dobowych temperatur maksymalnych w nadchodzących dekadach (rys. 51). Linie trendu wskazują, że w scenariuszu ekstrapolacyjnym ma on być nieco szybszy i wynieść w ciągu okresu analizy blisko 1,3°C wobec około 1,0°C w scenariuszu umiarkowanym.

3.3.2 Liczba dni upalnych ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) w roku

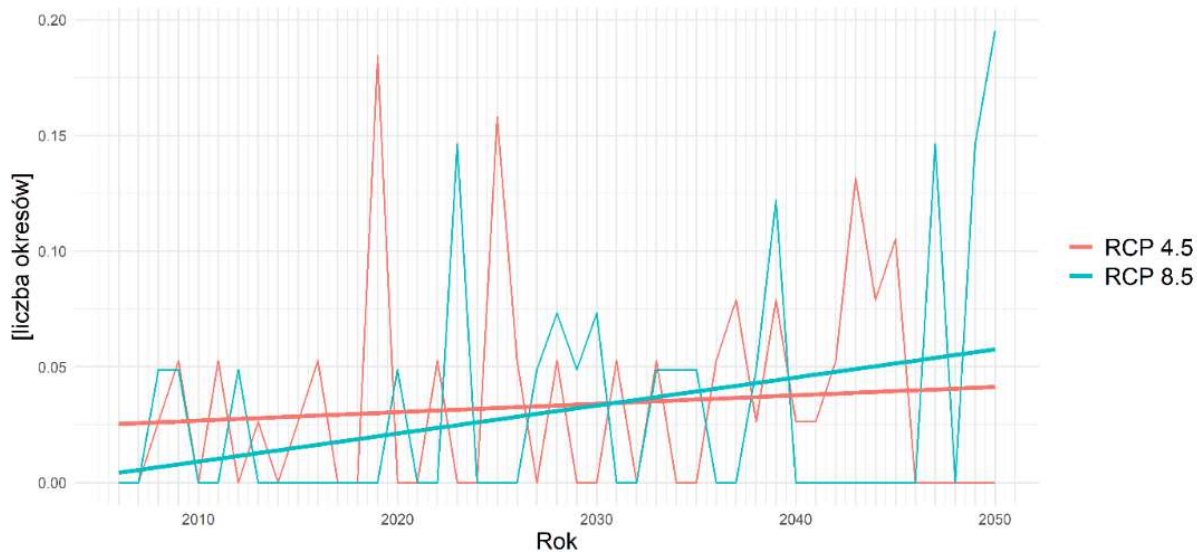


Rys.52. Liczba dni upalnych ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda

Ze względu na klimat morski liczba dni upalnych o temperaturze maksymalnej przekraczającej 30°C jest w Redzie bardzo niewielka, około 2 w roku. Wartość ta waha się w kolejnych latach tylko względnie istotnie, gdyż rzeczywiste różnice nie przekraczają zasadniczo dwóch dni rocznie. Choć współczynniki kierunkowe prostych regresji są dodatnie, wzrost w ciągu analizowanego okresu jest praktycznie niezauważalny (rys. 52).

3.3.3 Liczba fal upałów (co najmniej 3 dni z $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) w dekadzie

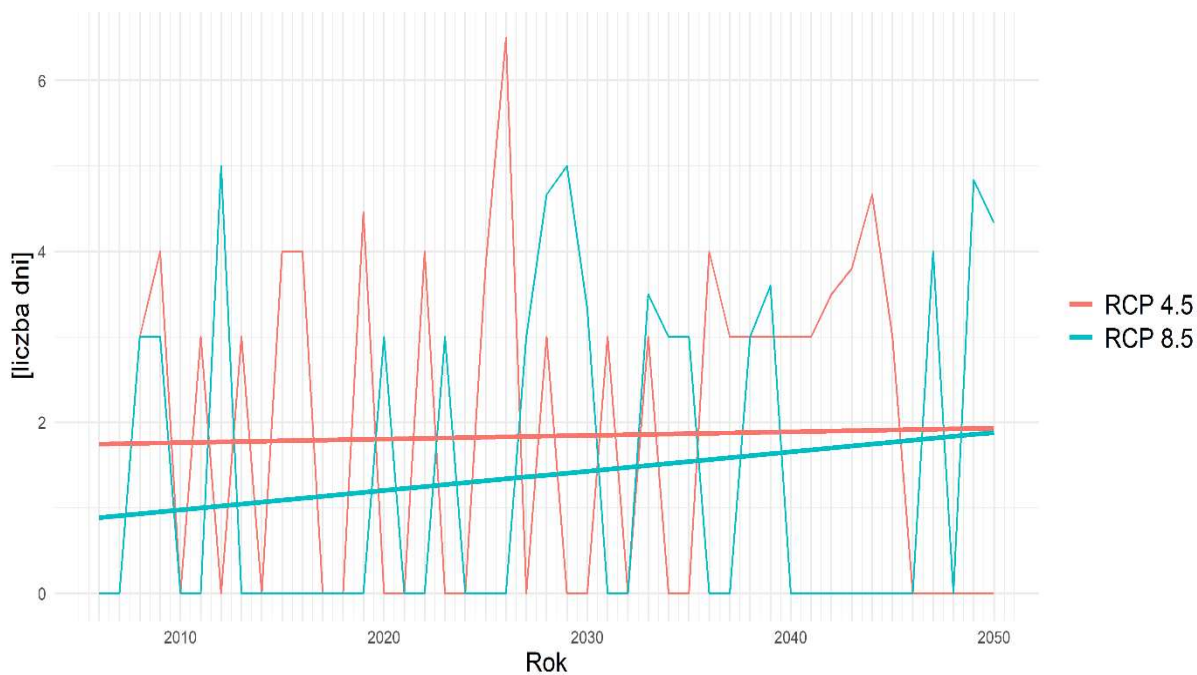
Fale upałów, czyli okresy co najmniej trzech kolejnych dni z dobową temperaturą maksymalną przekraczającą 30°C , są w Redzie zjawiskiem praktycznie niewystępującym. Mimo iż w scenariuszu ekstrapolacyjnym stwierdzić można trend wzrostowy częstości ich występowania, wartość funkcji regresji linowej na końcu badanego okresu wskazuje na prawdopodobieństwo wystąpienia fali upałów w ciągu dekady wartości zaledwie 6% (rys. 53).



RCP	b	a
RCP 4.5	2.5e-02	3.64e-04
RCP 8.5	3.03e-03	1.21e-03

Rys.53. Liczba fal upałów (co najmniej 3 dni z Tmax > 30°C), uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.3.4 Średnia długość trwania fal upałów

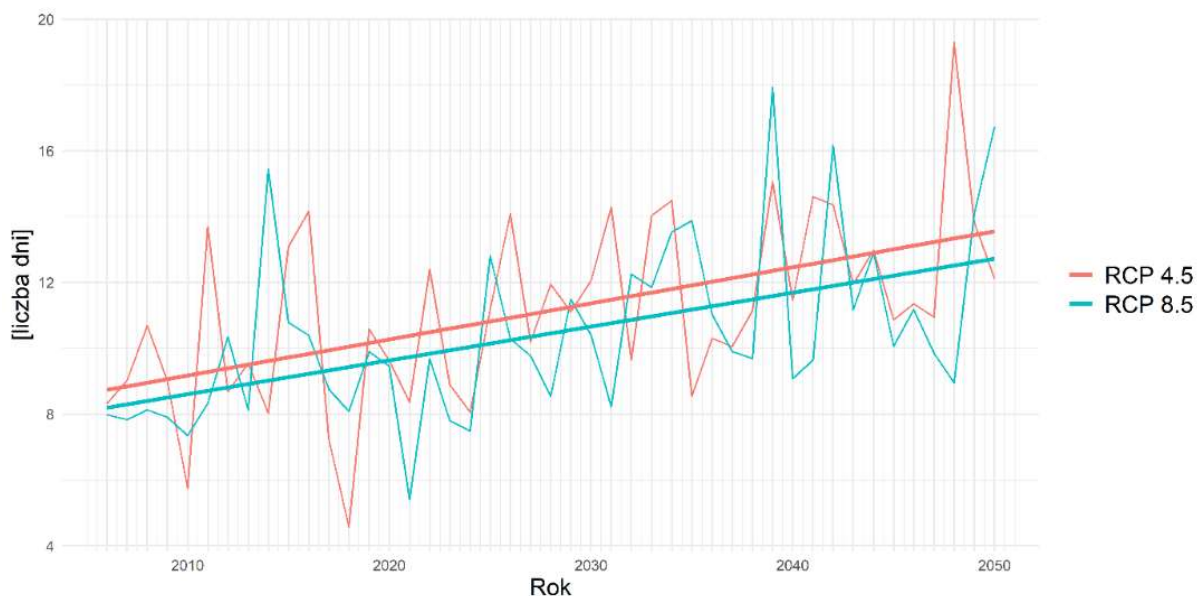


RCP	b	a
RCP 4.5	1.74e+00	4.22e-03
RCP 8.5	8.64e-01	2.26e-02

Rys.54. Średnia długość trwania fal upałów, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Ponieważ w większości dekad fale upałów w ogóle nie występują, nie można mówić o trendzie zmian długości ich trwania. Te sporadyczne epizody, gdy już nastąpią, mogą, jak wynika z prognozy, sięgać czterech dni (rys. 54).

3.3.5 Liczba dni gorących ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$) w roku



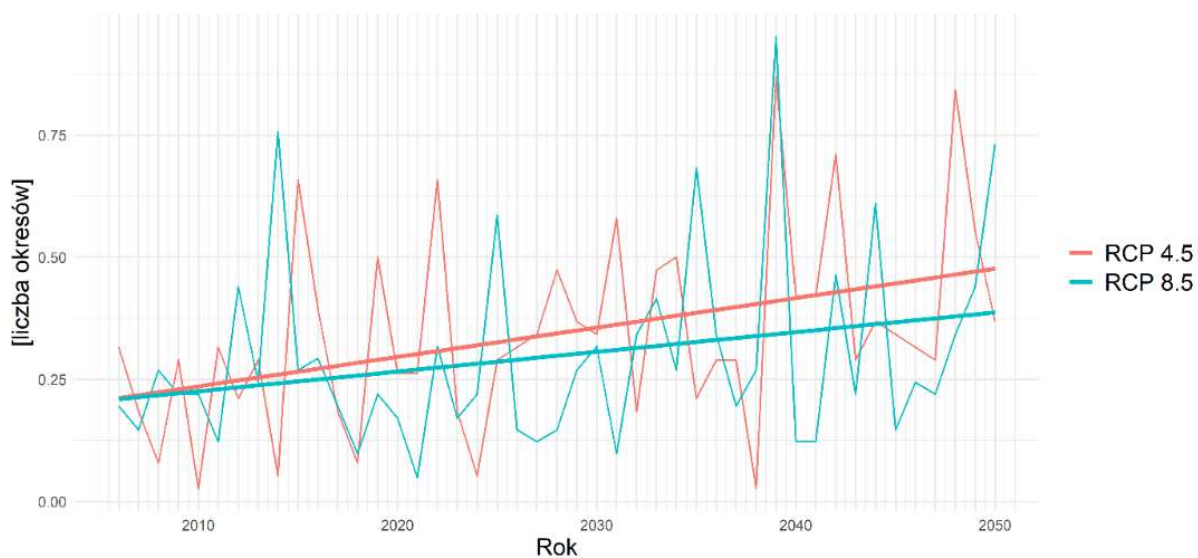
RCP	b	a
RCP 4.5	8.62e+00	1.1e-01
RCP 8.5	8.09e+00	1.03e-01

Rys.55. Liczba dni gorących ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba dni gorących z maksymalną temperaturą powietrza przekraczającą 25°C wykazuje w obu scenariuszach tendencję wzrostową o podobnej wartości. Jak wskazują proste regresji, w ciągu analizowanego okresu nastąpić ma wzrost o blisko 5 dni, co stanowi połowę wartości początkowej (rys. 55).

3.3.6 Liczba okresów długości co najmniej 5 dni z $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$ w dekadzie

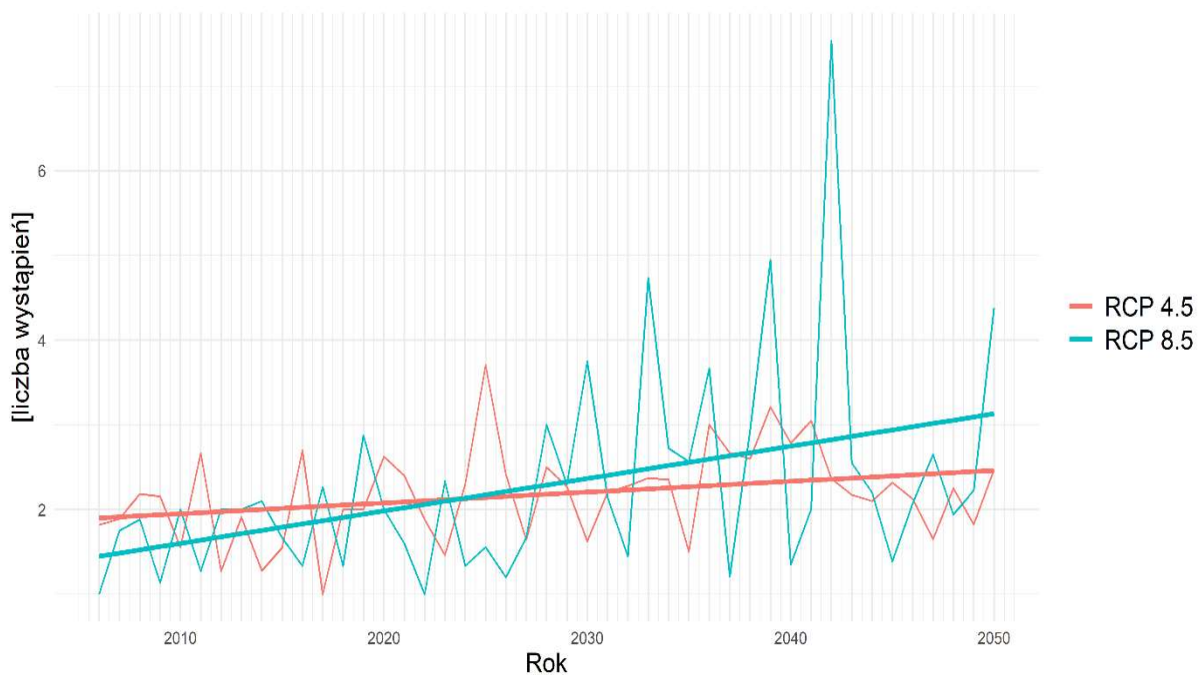
Choć zjawisko wystąpienia co najmniej pięciu następujących po sobie dni gorących z temperaturą maksymalną przekraczającą 25°C jest w Redzie niezwykle rzadkie, w obu scenariuszach klimatycznych dostrzegalna jest tendencja wzrostowa tego indeksu. Choć jak wskazują linie trendu, w scenariuszu umiarkowanym ma on być w ciągu analizowanego okresu dwukrotny (w ekstrapolacyjnym nieco mniejszy), prawdopodobieństwo wystąpienia takiego okresu w ciągu dekady pozostać ma nadal poniżej 50% (rys. 56).



RCP	b	a
RCP 4.5	2.05e-01	6.02e-03
RCP 8.5	2.05e-01	4.04e-03

Rys.56. Liczba okresów długości co najmniej 5 dni z $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$, uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.3.7 Liczba nocy tropikalnych ($T_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$) w dekadzie



RCP	b	a
RCP 4.5	1.89e+00	1.28e-02
RCP 8.5	1.41e+00	3.83e-02

Rys.57. Liczba nocy tropikalnych ($T_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda

Prognoza wskazuje, że liczba nocy tropikalnych z temperaturą minimalną powyżej 20°C będzie rosta (rys. 57). W RCP 4.5 trend jest bardzo nieznaczny, tak że aż do końca analizowanego okresu spodziewać się można około 2 takich przypadków w dekadzie, w RCP 8.5 jednak wartość indeksu do 2050 roku wzrosnąć ma o około 1,5, co stanowi różnicę dwukrotną. Także zmienność w kolejnych latach jest w scenariuszu ekstrapolacyjnym znacznie większa niż w umiarkowanym.

3.4 Prognozowane zmiany temperatury – fale chłodu

3.4.1 Średnia roczna temperatura minimalna

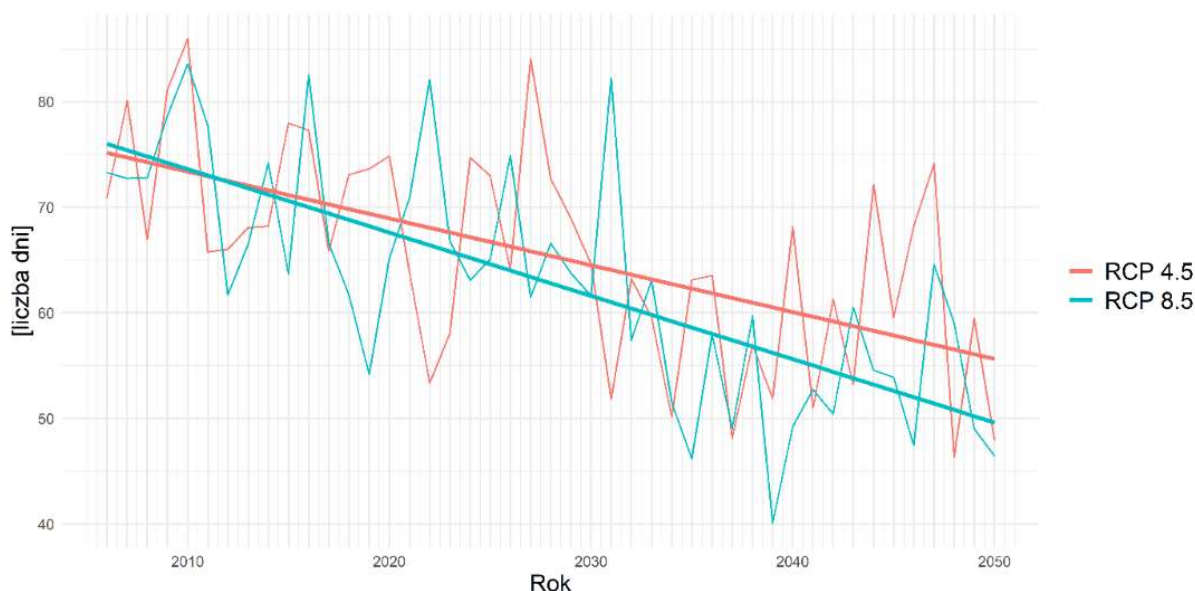


Rys.58. Średnia roczna temperatura minimalna, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Średnia roczna temperatura minimalna wykazuje w analizowanym okresie w obu scenariuszach wyraźną tendencję wzrostową. Jak wskazują proste regresji, jest ona nieco większa w RCP 8.5. Średnia roczna temperatura minimalna ma zgodnie ze scenariuszem ekstrapolacyjnym wzrosnąć o około 1,5°C wobec 1,2°C w scenariuszu umiarkowanym (rys. 58).

3.4.2 Liczba dni przymrozkowych ($T_{min} < 0^{\circ}C$) w roku

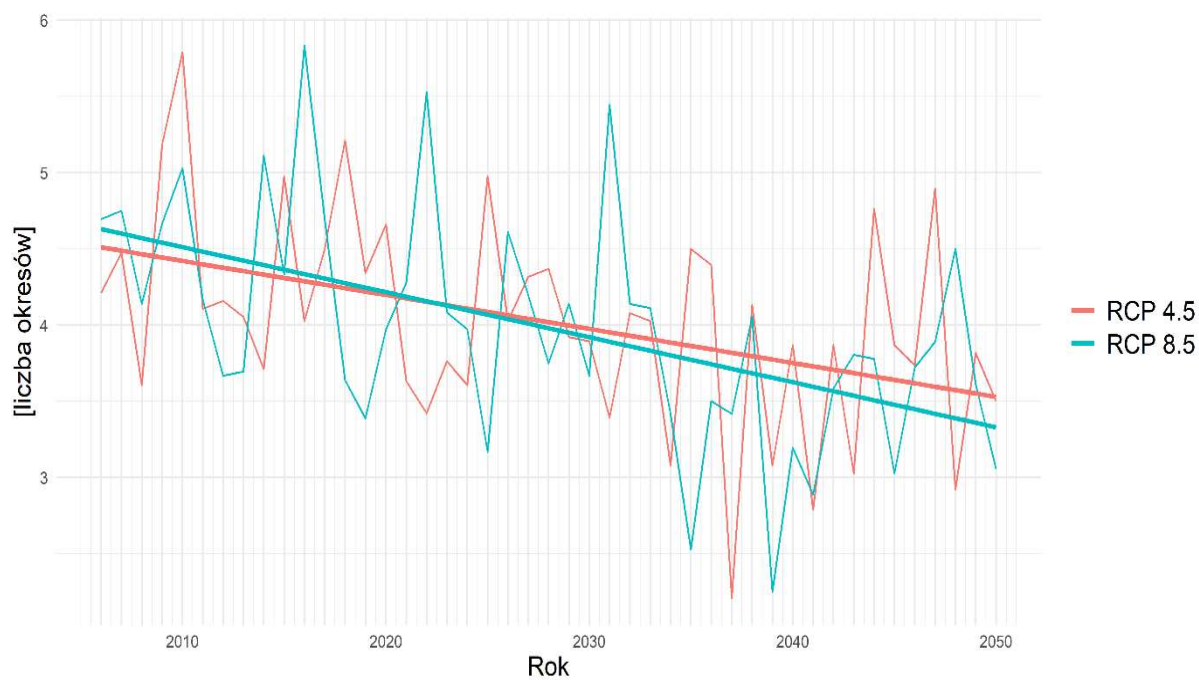
W analizowanym okresie w obu scenariuszach prognozowany jest wyraźny spadek liczby dni przymrozkowych. Jak wynika z linii trendu, ma on być szybszy w scenariuszu ekstrapolacyjnym (rys. 59). Z początkowej wartości około 75 dni z temperaturą minimalną poniżej $0^{\circ}C$ zgodnie z RCP 8.5 na końcu analizowanego okresu pozostać ma 50, co oznacza ubytek o jedną trzecią. W RCP 4.5 ma on wynieść około 20 dni.



Rys.59. Liczba dni przymrozkowych ($T_{min} < 0^{\circ}C$), uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.4.3 Liczba okresów przymrozkowych (co najmniej 5 dni z $T_{min} < 0^{\circ}C$) w dekadzie

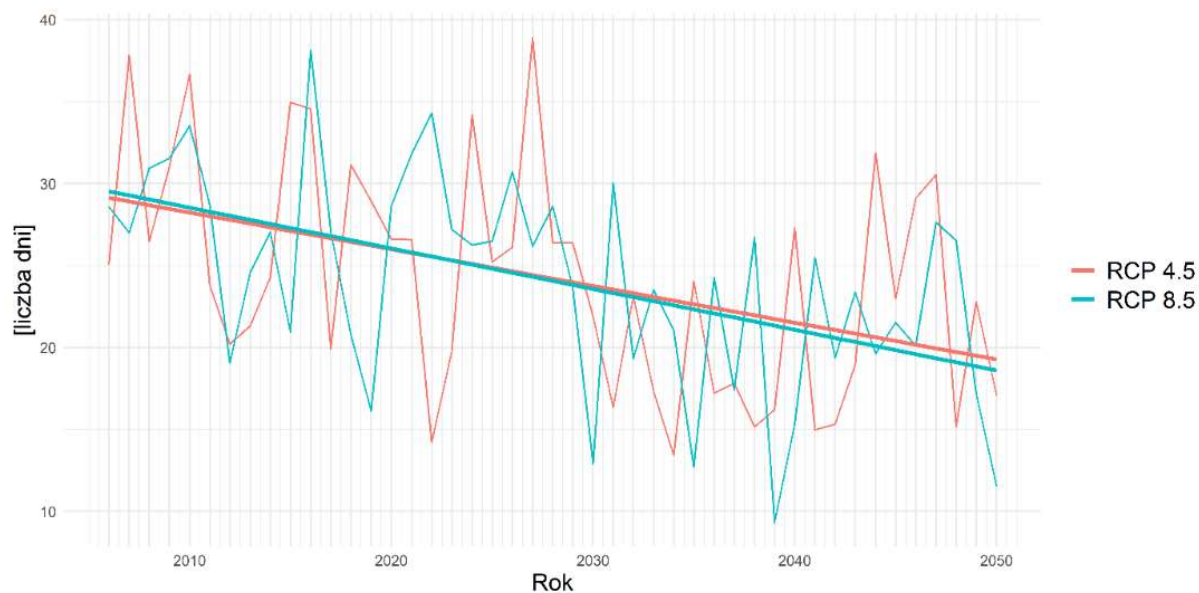
Liczba okresów przymrozkowych, definiowanych jako ciąg co najmniej 5 dni z temperaturą minimalną mniejszą od $0^{\circ}C$, dla obu scenariuszy wykazuje w analizowanym okresie tendencję spadkową (rys. 60). Jak wskazują linie trendu, szybszy spadek nastąpić ma w RCP 8.5. Wyniesie on w ciągu analizowanego okresu około 1,3 w skali dekady wobec około 1,0 w RCP 4.5, co stanowi odpowiednio około 28% i 22%.



RCP	b	a
RCP 4.5	4.53e+00	-2.23e-02
RCP 8.5	4.66e+00	-2.95e-02

Rys.60. Liczba okresów przymrozkowych (co najmniej 5 dni z $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.4.4 Liczba dni mroźnych ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) w roku

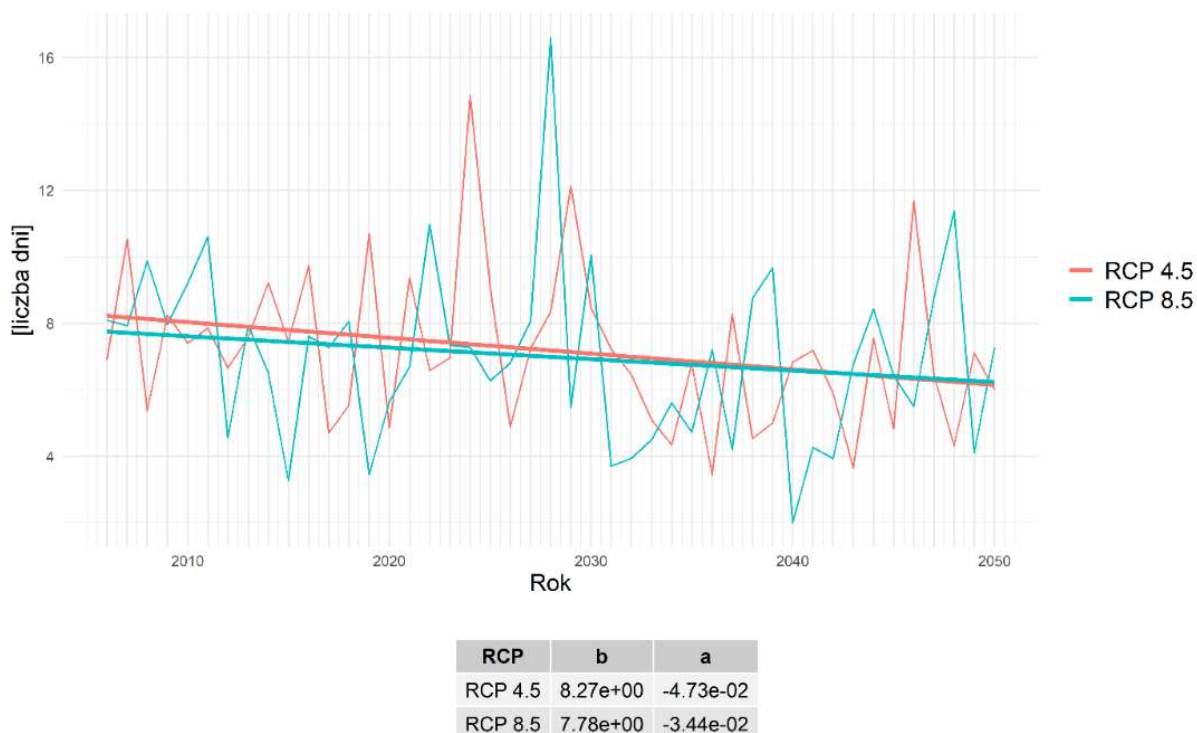


RCP	b	a
RCP 4.5	2.93e+01	-2.24e-01
RCP 8.5	2.98e+01	-2.48e-01

Rys.61. Liczba dni mroźnych ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba dni mroźnych, definiowana jako liczba dni z temperaturą maksymalną poniżej 0°C, w obu scenariuszach wykazuje w analizowanym okresie wyraźną tendencję spadkową (rys. 61). W przypadku tego indeksu nie ma widocznych różnic pomiędzy oboma scenariuszami klimatycznymi. Tak w RCP 4.5, jak w RCP 8.5 liczba dni mroźnych w roku spada w ciągu okresu analizy z początkowej wartości blisko 30 o około 10, co stanowi ubytek o jedną trzecią.

3.4.5 Liczba dni bardzo mroźnych ($T_{min} < -10^{\circ}C$) w roku

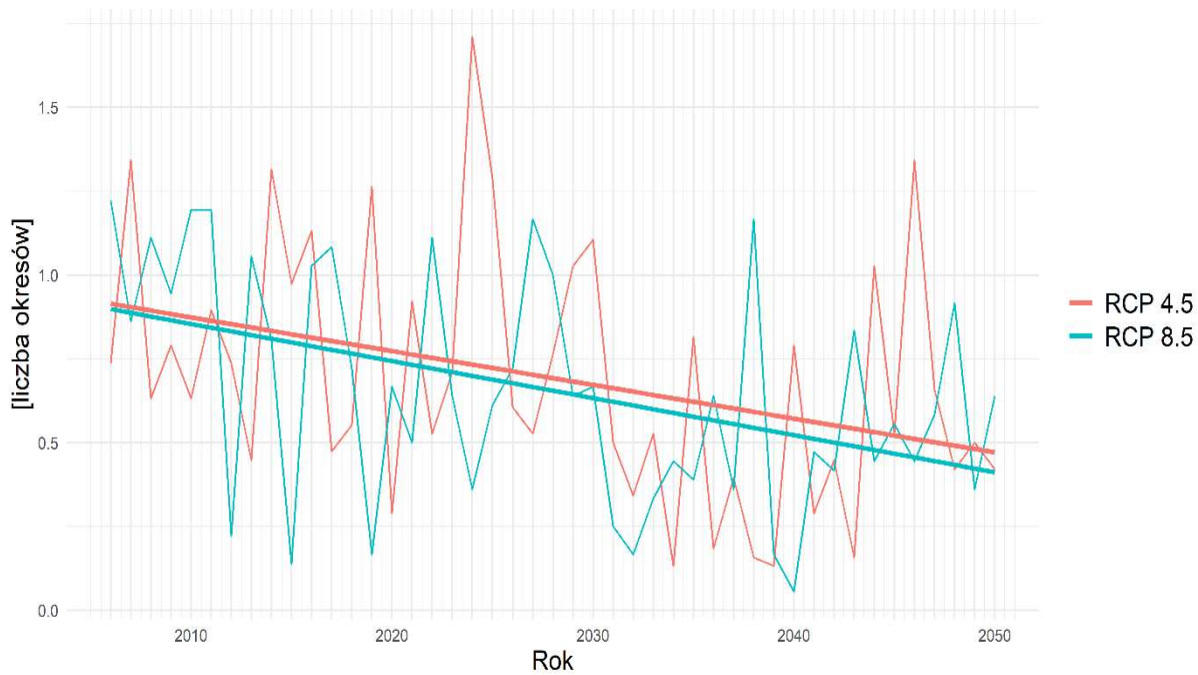


Rys.62. Liczba dni bardzo mroźnych ($T_{min} < -10^{\circ}C$), uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba dni bardzo mroźnych, definiowana jako liczba dni z temperaturą minimalną mniejszą od $-10^{\circ}C$, w obu scenariuszach wykazuje tendencję spadkową (rys. 62). Proste regresji w RCP 4.5 i RCP 8.5 są do siebie zbliżone. Spadek w ciągu analizowanego okresu wyniesie około 2 dni, co stanowi jedną czwartą początkowej wartości 8 dni w roku.

3.4.6 Liczba fal chłodu (co najmniej 3 dni z $T_{min} < -10^{\circ}C$) w dekadzie

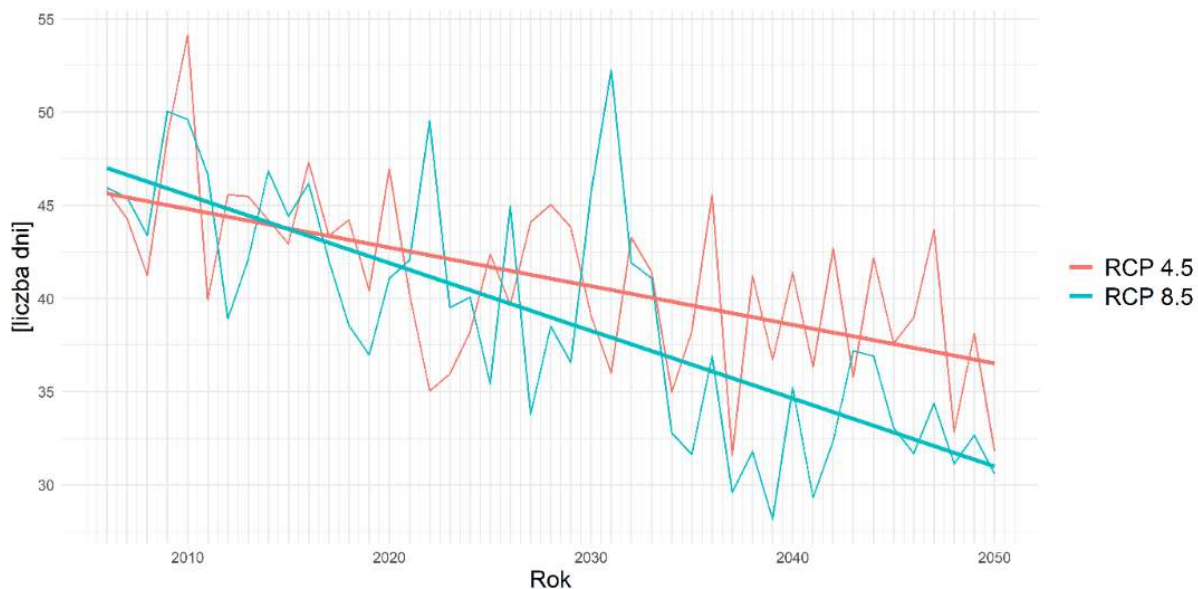
Liczba fal chłodu, definiowana jako liczba okresów długości co najmniej trzech dni z dobową temperaturą minimalną niższą niż $-10^{\circ}C$, w obu scenariuszach wykazuje tendencję spadkową. Linie trendu w RCP 4.5 i RCP 8.5 są do siebie w przypadku tego indeksu bardzo zbliżone (rys. 63). Z początkowej wartości poniżej 1 przypadku w ciągu dekady ubyć ma około połowy.



RCP	b	a
RCP 4.5	9.24e-01	-1.01e-02
RCP 8.5	9.09e-01	-1.11e-02

Rys.63. Liczba fal chłodu (co najmniej 3 dni z $T_{min} < -10^{\circ}C$), uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.4.7 Liczba dni z przejściem przez $0^{\circ}C$ w roku



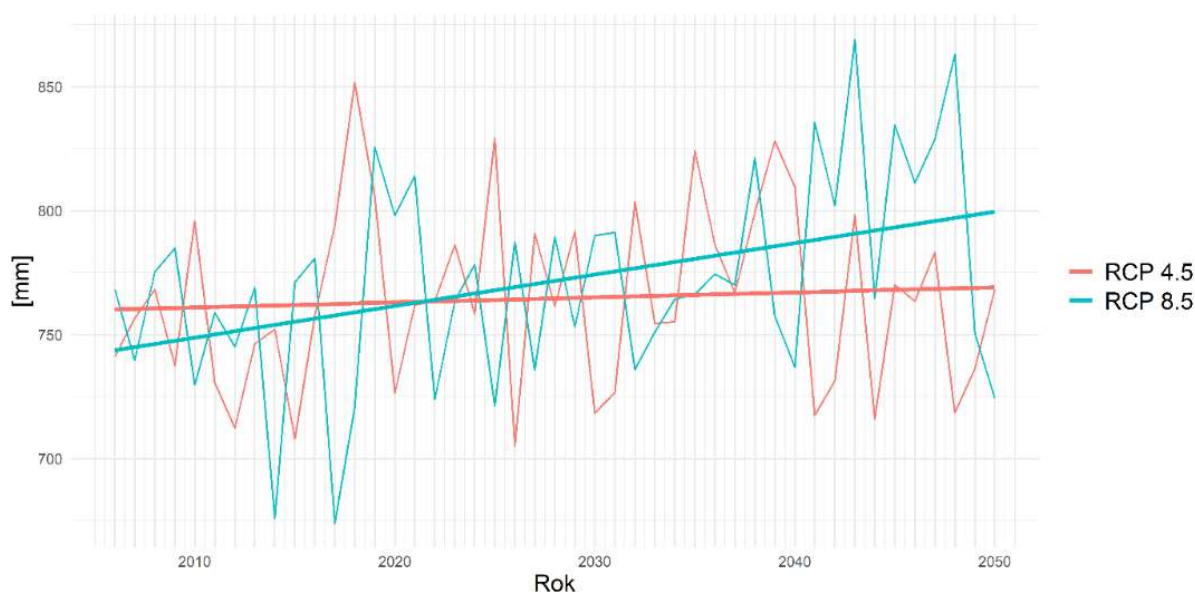
RCP	b	a
RCP 4.5	4.58e+01	-2.07e-01
RCP 8.5	4.74e+01	-3.64e-01

Rys.64. Liczba dni z przejściem przez $0^{\circ}C$, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba dni z przejściem przez 0°C, w których temperatura dobowo minimalna jest niższa od 0°C, maksymalna zaś wyższa od tej wartości, wykazuje w obu scenariuszach tendencję spadkową (rys. 64). Ma ona być wyraźnie silniejsza w scenariuszu ekstrapolacyjnym. Jak wskazują proste regresje, w RCP 8.5 w ciągu analizowanego okresu liczba takich dni zmniejszy się o około 16, w RCP 4.5 zaś o około 9, co stanowi odpowiednio około 34% i około 20% wartości początkowej.

3.5 Prognozowane zmiany opadu – średnie warunki opadowe

3.5.1 Roczna suma opadu



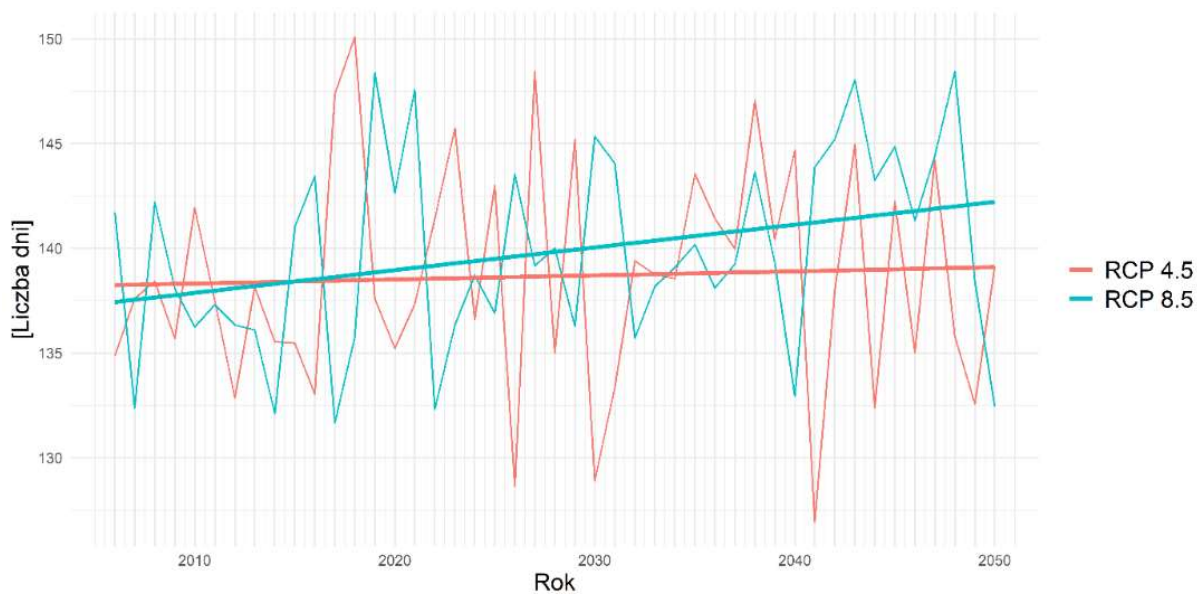
Rys.65. Roczna suma opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Roczna suma opadu dla miasta Reda w obu scenariuszach wykazuje dla analizowanego okresu tendencję wzrostową (rys. 65). W scenariuszu RCP 8.5 prognozuje się bardziej dynamiczny wzrost niż w scenariuszu RCP 4.5. W ujęciu wartości średniorocznych, na przestrzeni analizowanych 45 lat, w scenariuszu RCP 4.5 zakres prognozowanej sumy opadu będzie się zmieniał od 705 mm do 851,5 mm, w scenariuszu RCP 8.5 natomiast od 673,9 do 868,9 mm.

3.5.2 Liczba dni z opadem dobowym wyższym od 1 mm

Liczba dni z opadem, definiowana jako liczba dni, w których prognozowany jest opad wyższy od 1 mm, dla miasta Reda wykazuje w obu scenariuszach trend wzrostowy (rys. 66). Wzrost w scenariuszu RCP 8.5 jest bardziej dynamiczny niż w scenariuszu RCP 4.5. W analizowanym okresie w scenariuszu

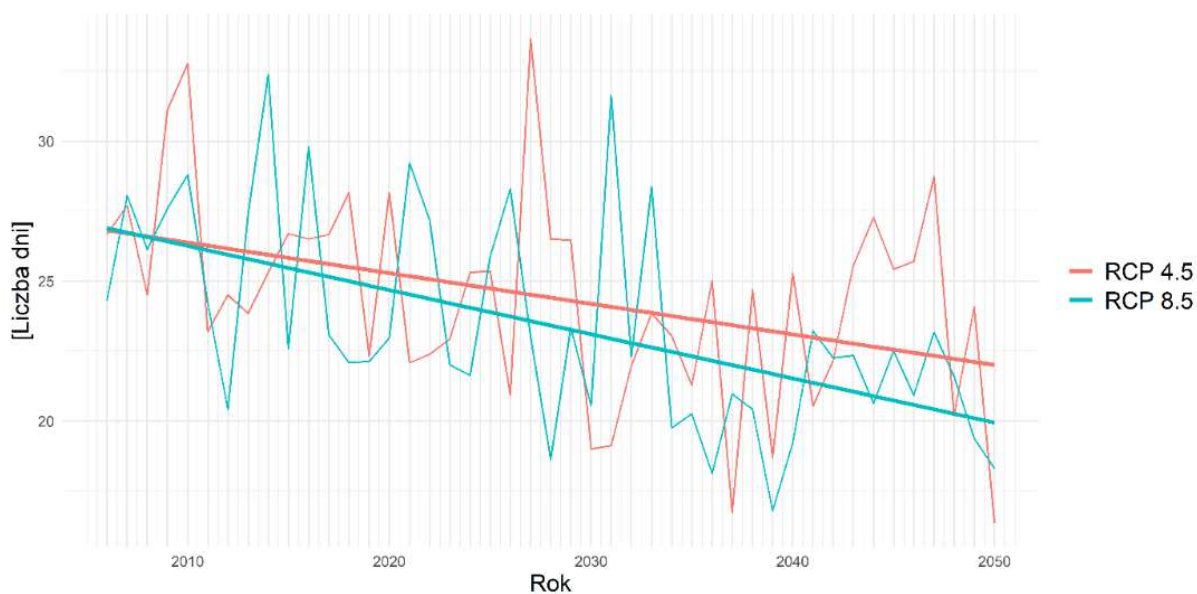
RCP 4.5 prognozowana jest zmienność od 126,9 do 150 dni, w scenariuszu RCP 8.5 natomiast od 131,7 do 148,4 dni.



RCP	b	a
RCP 4.5	1.38e+02	1.94e-02
RCP 8.5	1.37e+02	1.09e-01

Rys.66. Liczba dni z opadem dobowym wyższym od 1 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.5.3 Liczba dni z opadem przy temperaturze od -5°C do 2,5°C



RCP	b	a
RCP 4.5	2.69e+01	-1.09e-01
RCP 8.5	2.7e+01	-1.58e-01

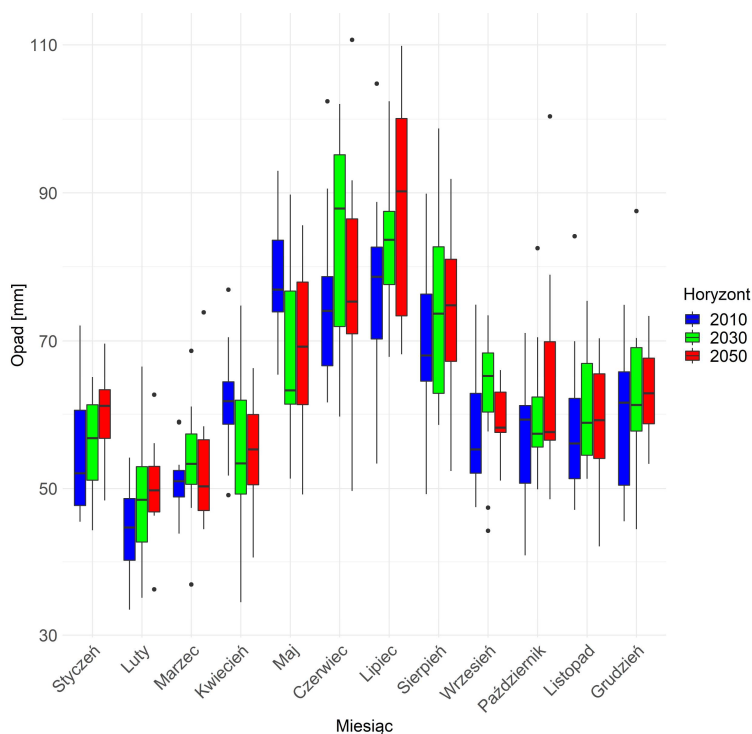
Rys.67. Liczba dni z opadem przy temperaturze od -5°C do 2,5°C, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba dni z opadem przy temperaturze od -5°C do $2,5^{\circ}\text{C}$ dla miasta Reda wykazuje w obu scenariuszach tendencję spadkową (rys. 67). W scenariuszu RCP 8.5 prognozowany jest bardziej dynamiczny spadek niż w scenariuszu RCP 4.5. W analizowanym okresie w scenariuszu RCP 4.5 wartość tego wskaźnika waha się od 14,3 do 33,6 dni, w scenariuszu RCP 8.5 natomiast od 16,8 do 32,4 dni.

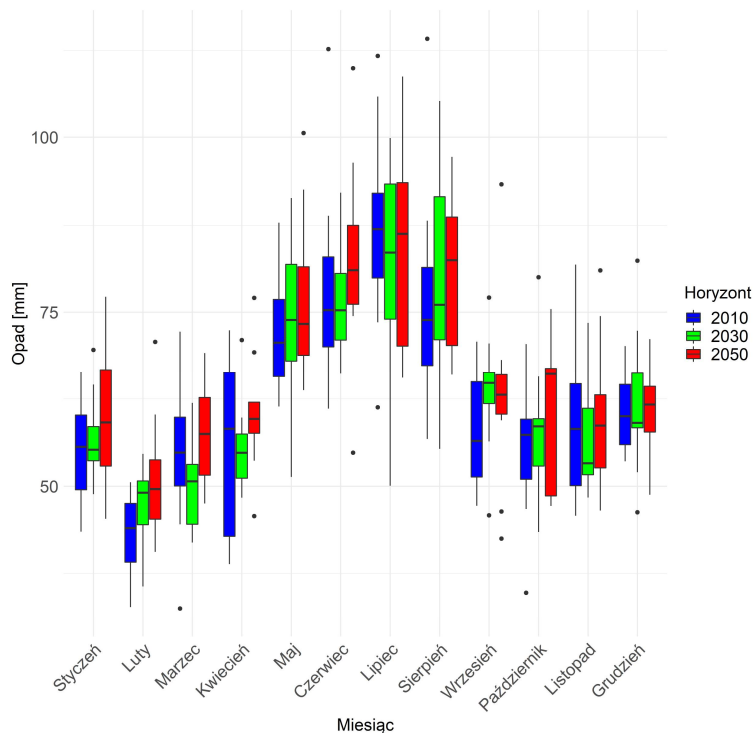
3.5.4 Miesięczna suma opadu

Na rysunkach od 68 do 73 przedstawiono wartości sumy miesięcznej opadu dla trzech horyzontów czasowych: 2010, 2030 oraz 2050 dla obu scenariuszy RCP 4.5 i RCP 8.5.

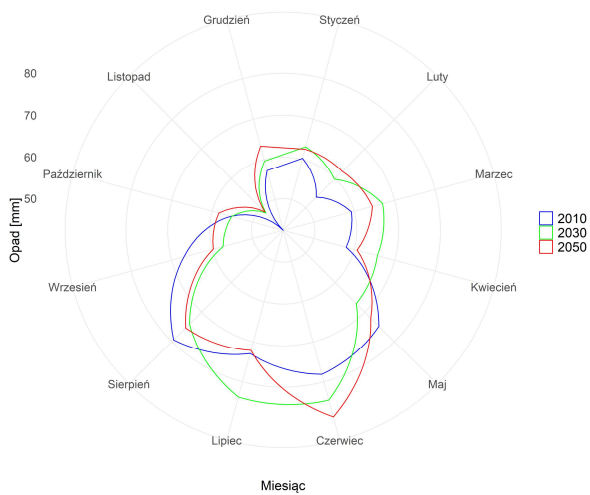
Prognoza średniej miesięcznej sumy opadu zmienia się w zależności od pory roku. Prawie we wszystkich miesiącach w obu scenariuszach dane charakteryzuje tendencja wzrostowa (poziome linie na diagramach pudełkowych – mediany, rys. 68 i 69). Wyjątek stanowi miesiąc kwiecień i maj w scenariuszu RCP 4.5. W scenariuszu RCP 8.5 w miesiącach: styczniu, marcu, kwietniu, czerwcu i listopadzie w horyzoncie do 2030 roku prognozowany jest spadek względem roku 2010, a następnie, w horyzoncie 2050, wzrost, natomiast w scenariuszu RCP 4.5 takie zmiany wystąpiły w maju. Największą zmianę względem dekady 2006-2015 można odnotować dla czerwca i lipca w scenariuszu RCP 4.5 oraz dla sierpnia w scenariuszu RCP 8.5.



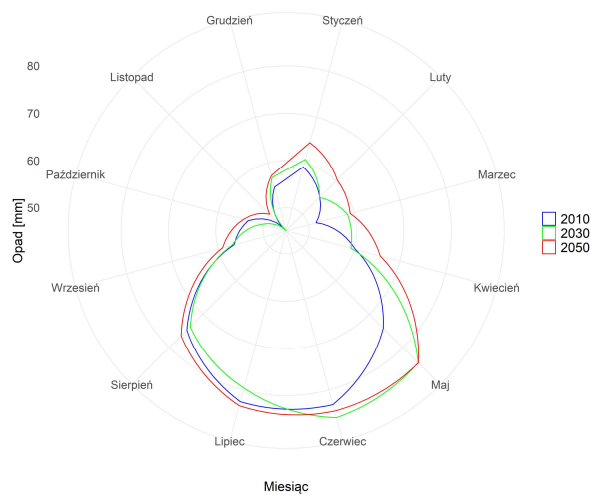
Rys.68. Suma miesięczna opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 4.5



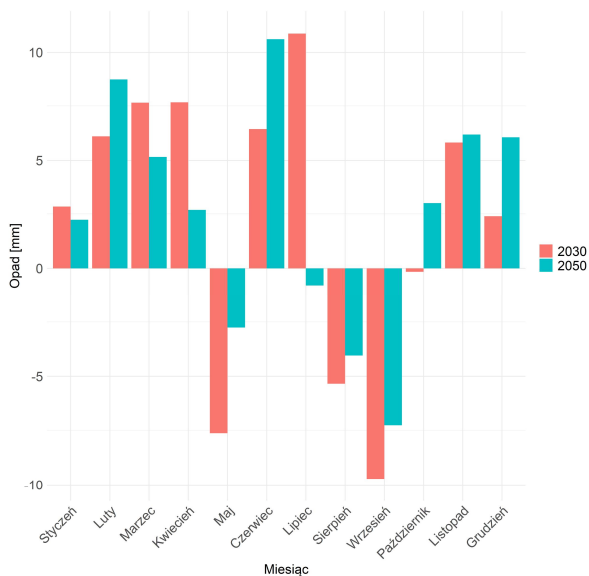
Rys.69. Suma miesięczna opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 8.5



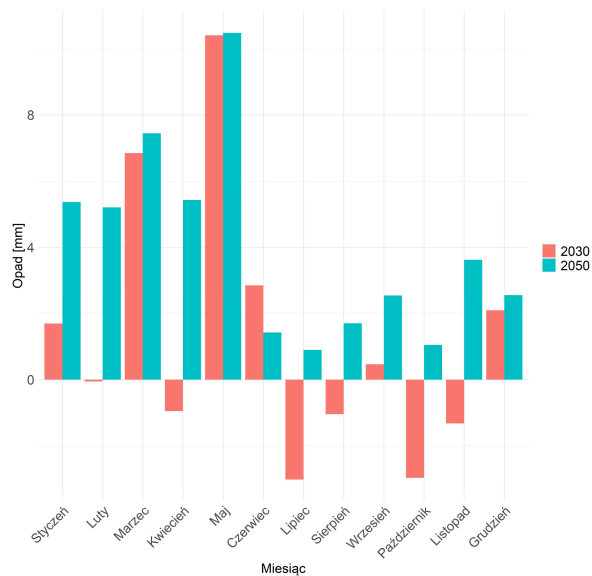
Rys.70. Suma miesięczna opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów: 2010, 2030 i 2050; scenariusz RCP 4.5



Rys.71. Suma miesięczna opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów: 2010, 2030 i 2050; scenariusz RCP 8.5



Rys.72. Anomalia sumy miesięcznej opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 4.5



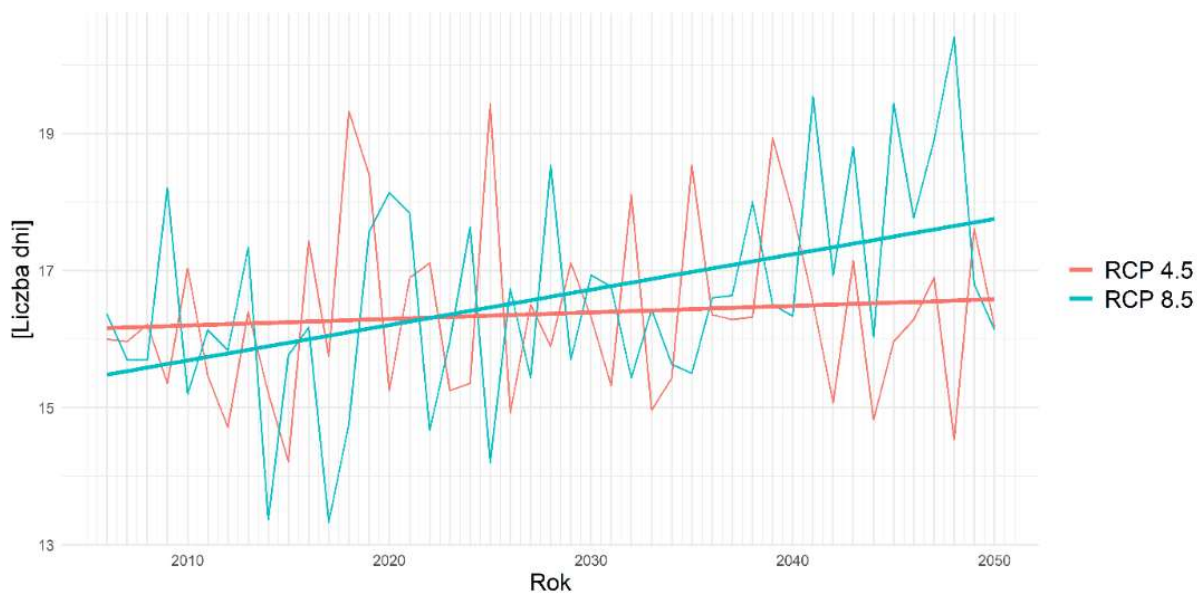
Rys.73. Anomalia sumy miesięcznej opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 8.5

Podsumowując, należy stwierdzić, że prognozowany jest wzrost sum opadów w prawie każdym miesiącu.

3.6 Prognozowane zmiany opadu – opad ekstremalny

3.6.1 Liczba dni z opadem dobowym powyżej 10 mm w dekadzie

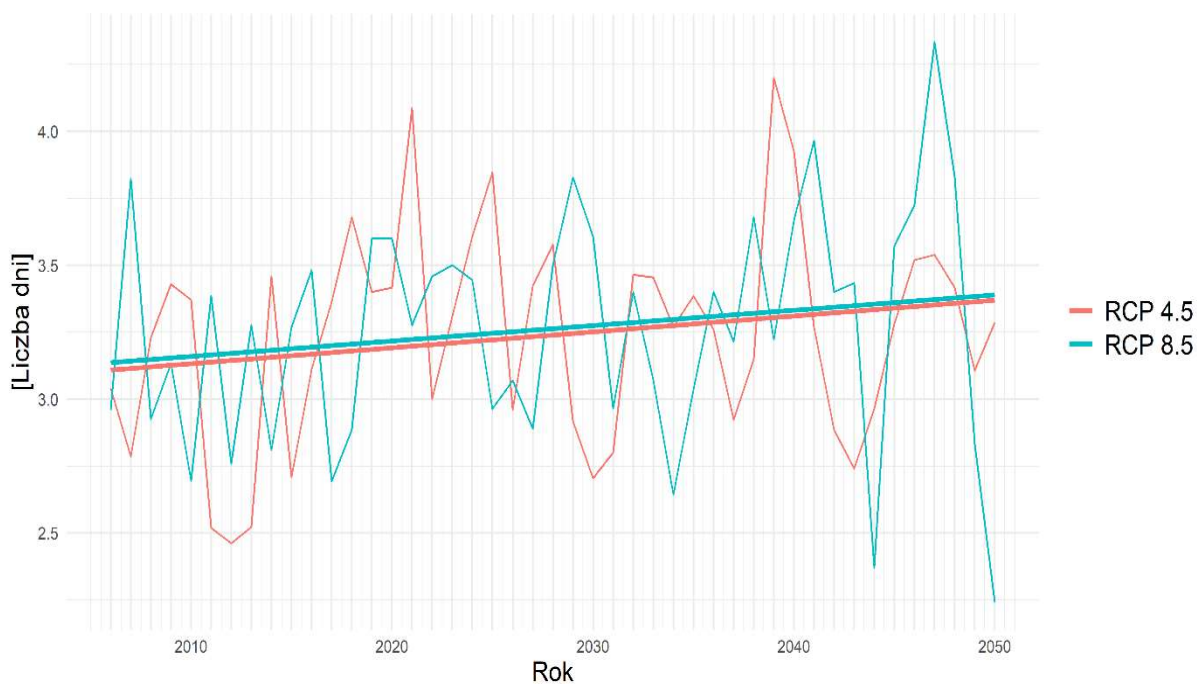
Liczba dni z opadem powyżej 10 mm dla miasta Reda w obu scenariuszach wykazuje dla analizowanego okresu tendencję wzrostową (rys. 74). W scenariuszu RCP 8.5 prognozuje się bardziej dynamiczny wzrost niż w scenariuszu RCP 4.5. W ujęciu wartości średniodekadowych, na przestrzeni analizowanych 45 lat, w scenariuszu RCP 4.5 zakres prognozowanego wskaźnika będzie się zmieniał od 14,2 do 19,4, w scenariuszu RCP 8.5 natomiast od 13,3 do 20,4 dni.



RCP	b	a
RCP 4.5	1.62e+01	9.52e-03
RCP 8.5	1.54e+01	5.16e-02

Rys.74. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 10 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.6.2 Liczba dni z opadem dobowym powyżej 20 mm w dekadzie



RCP	b	a
RCP 4.5	3.1e+00	5.92e-03
RCP 8.5	3.13e+00	5.74e-03

Rys.75. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 20 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba dni z opadem powyżej 20 mm dla miasta Reda w obu scenariuszach wykazuje dla analizowanego okresu tendencję wzrostową (rys. 75). Pomimo różnic pomiędzy scenariuszami w ujęciu poszczególnych lat, parametry linii trendów są takie same. W ujęciu wartości średniodekadowych, na przestrzeni analizowanych 45 lat, w scenariuszu RCP 4.5 zakres prognozowanego wskaźnika będzie się zmieniał od 2,46 do 4,2, w scenariuszu RCP 8.5 natomiast od 2,2 do 4,3 dni.

3.6.3 Liczba dni z opadem dobowym powyżej 30 mm w dekadzie



RCP	b	a
RCP 4.5	1.8e+00	2.7e-03
RCP 8.5	1.67e+00	2.99e-03

Rys.76. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 30 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba dni z opadem powyżej 30 mm dla miasta Reda w obu scenariuszach wykazuje dla analizowanego okresu tendencję wzrostową (rys. 76). W analizowanym okresie prognozowany wzrost jest zbliżony w obu scenariuszach. W ujęciu wartości średniodekadowych w scenariuszu RCP 4.5 zakres prognozowanego wskaźnika będzie się zmieniał od 1,2 do 2,5 dni, w scenariuszu RCP 8.5 natomiast od 1,1 do 2,3 dni.

3.6.4 Liczba dni z opadem dobowym powyżej 40 mm w dekadzie



Rys.77. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 40 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba dni z opadem powyżej 40 mm dla miasta Reda dla analizowanego okresu wykazuje trend wzrostowy w scenariuszu RCP 8.5, natomiast w scenariuszu RCP 4.5 widoczny jest trend silnie zbliżony do trendu bocznego (bardzo małe nachylenie kąta) – rys. 77. W ujęciu wartości średniodekadowych zakres prognozowanego wskaźnika będzie się zmieniał od 1 w obu scenariuszach do 2,2 dni w scenariuszu RCP 4.5, a w scenariuszu RCP 8,5 do 2,4 dni.

3.6.5 Liczba dni z opadem dobowym powyżej 50 mm w dekadzie

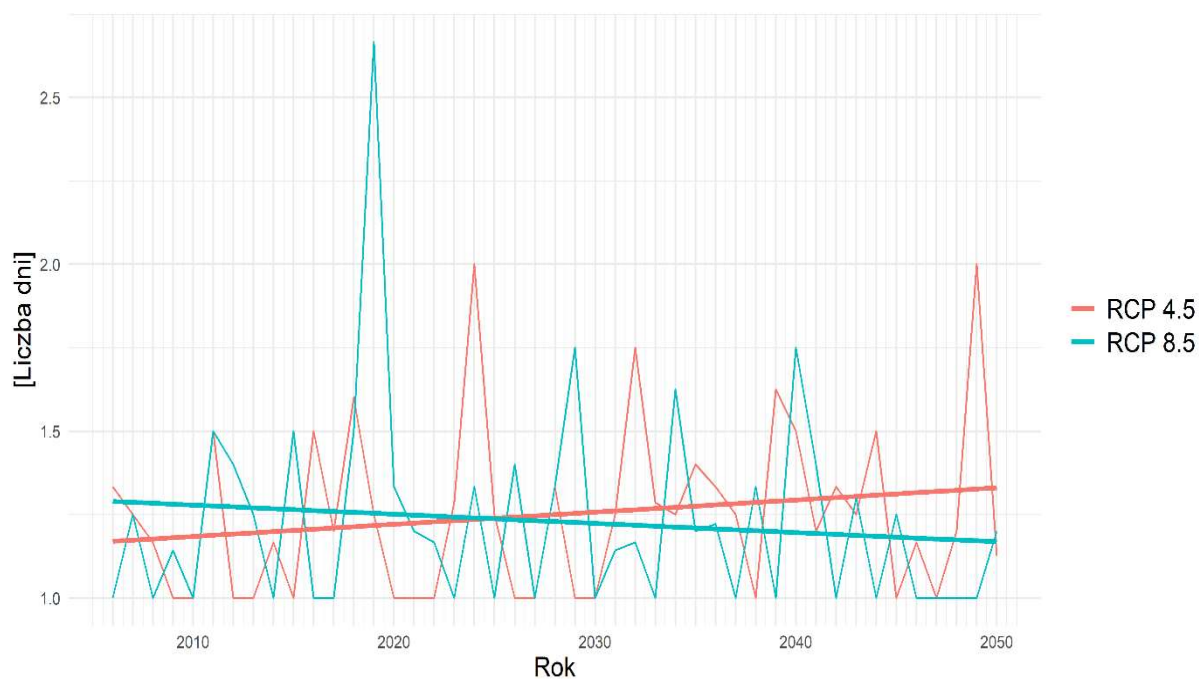
Liczba dni z opadem powyżej 50 mm dla miasta Reda wykazuje dla analizowanego okresu trend wzrostowy w scenariuszu RCP 4.5, natomiast w scenariuszu RCP 8.5 widoczny jest trend silnie zbliżony do trendu bocznego (bardzo małe nachylenie kąta) – rys. 78. W ujęciu wartości średniodekadowych, w analizowanym okresie, zakres prognozowanego wskaźnika będzie się zmieniał od 1 do 2 dni w scenariuszu RCP 4.5, natomiast w scenariuszu RCP 8.5 od 1 do 2,4 dni.



Rys.78. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 50 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda

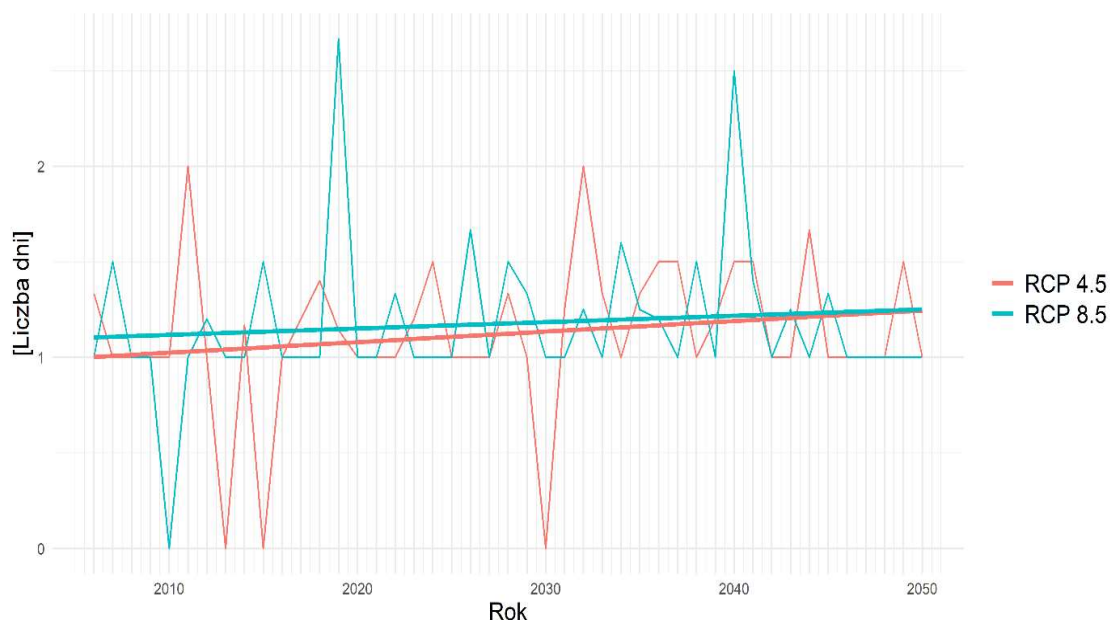
3.6.6 Liczba dni z opadem dobowym powyżej 60 mm w dekadzie

Liczba dni z opadem powyżej 60 mm dla miasta Reda w każdym ze scenariuszy charakteryzuje się dla analizowanego okresu inną tendencją rozwojową (rys. 79). W scenariuszu RCP 4.5 prognozowany jest trend rosnący, a w scenariuszu RCP 8.5 malejący. W ujęciu wartości średniodekadowych, w analizowanym okresie, zakres prognozowanego wskaźnika będzie się zmieniał od 1 do 2 dni w scenariuszu RCP 4.5 oraz od 1 do 2,7 dni w scenariuszu RCP 8.5.



Rys.79. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 60 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.6.7 Liczba dni z opadem dobowym powyżej 70 mm w dekadzie



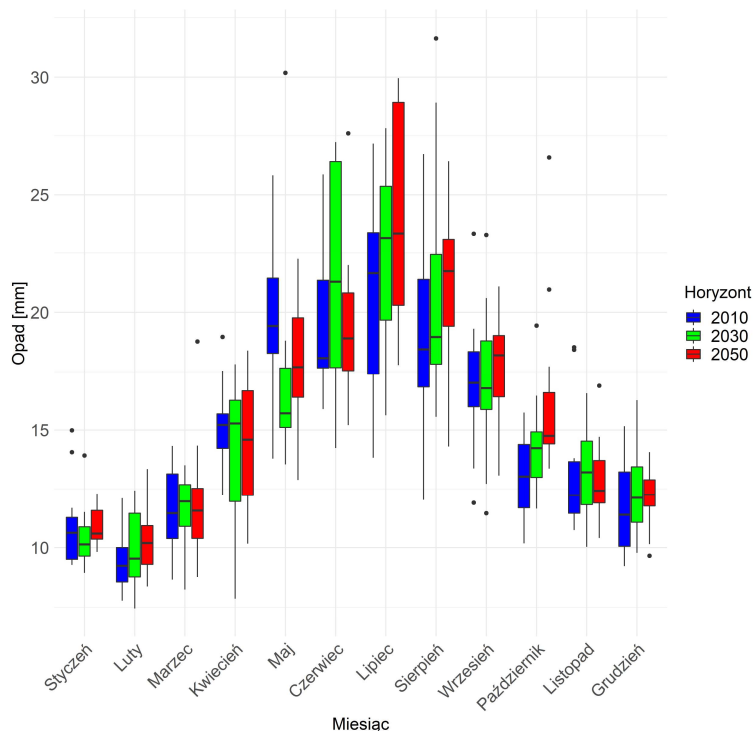
Rys.80. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 70 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba dni z opadem powyżej 70 mm dla miasta Reda w obu scenariuszach charakteryzuje się dla analizowanego okresu trendem wzrostowym. W przypadku scenariusza RCP 4.5 wzrost będzie bardziej dynamiczny (rys. 80). W ujęciu wartości średniodekadowych, w analizowanym okresie, w scenariuszu RCP 4.5 nie przekroczy 2 dni, natomiast w scenariuszu RCP 8.5 dojdzie do 2,6 dni. Należy nadmienić, iż prognozowana częstotliwość występowania liczby dni z opadem powyżej 70 mm jest mniejsza niż innych wskaźników analizowanych w niniejszym raporcie, taki opad pojawia się zdecydowanie rzadziej.

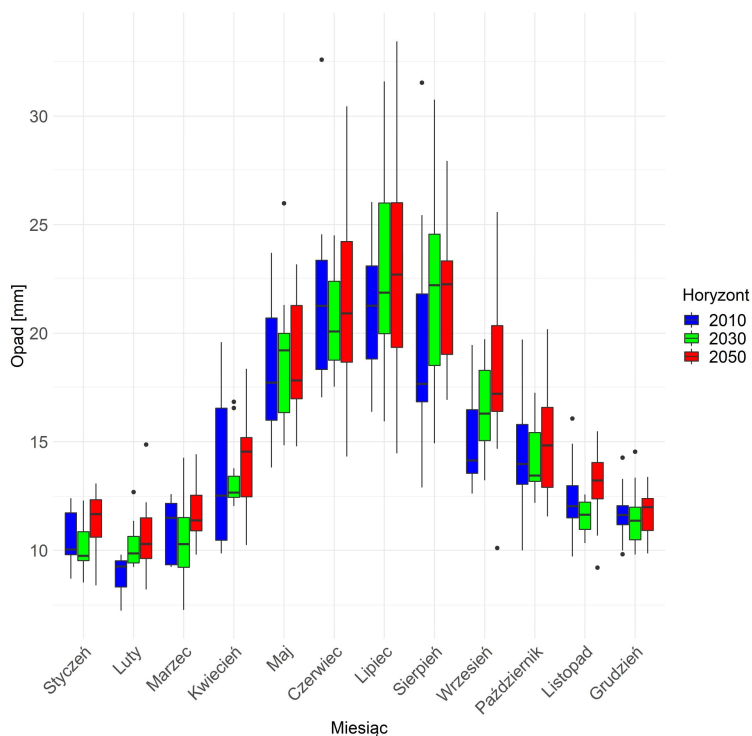
3.6.8 Maksymalny opad dobowy w miesiącu

Na rysunkach od 81 do 86 przedstawiono wartości maksymalnego opadu dobowego w miesiącu dla trzech horyzontów czasowych: 2010, 2030 oraz 2050, dla obu scenariuszy RCP 4.5 i RCP 8.5.

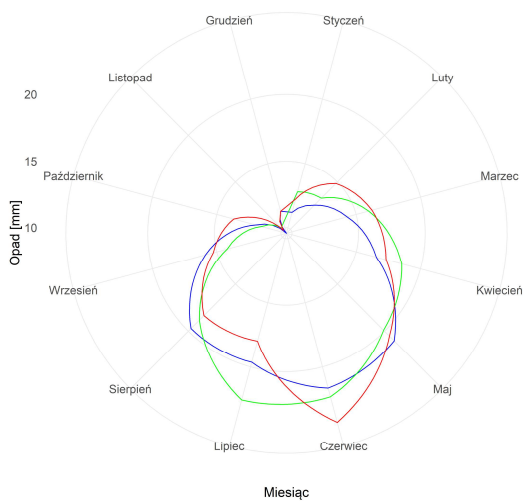
Prognozę maksymalnego opadu dobowego w miesiącu charakteryzuje wysoka zmienność w analizowanych dekadach, o czym świadczy wielkość diagramów pudełkowych prezentowanych na rys. 81 i 82. Największą zmianę względem dekady 2006-2015 można odnotować dla czerwca i lipca w scenariuszu RCP 4.5 oraz dla kwietnia, lipca i września w scenariuszu RCP 8.5 (rys. 83 i 84). Spadek wartości wskaźnika prognozuje się dla marca i maja w scenariuszu RCP 4.5 oraz dla kwietnia w scenariuszu RCP 8.5.



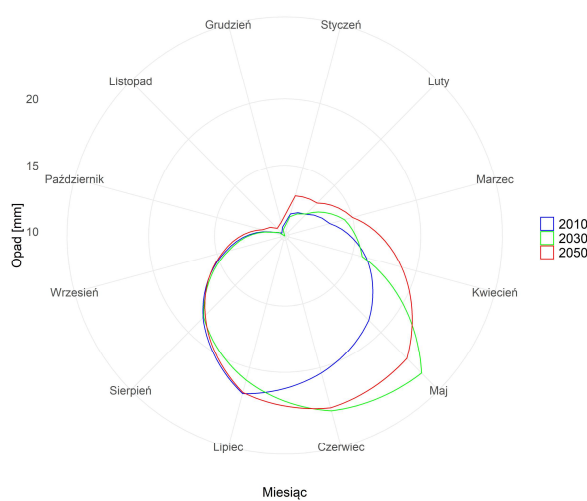
Rys.81. Maksymalny opad dobowy w miesiącu, uśredniony dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 4.5



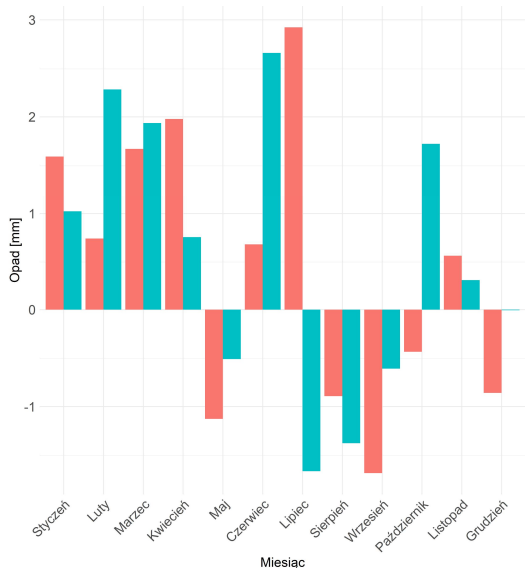
Rys.82. Maksymalny opad dobowy w miesiącu, uśredniony dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 8.5



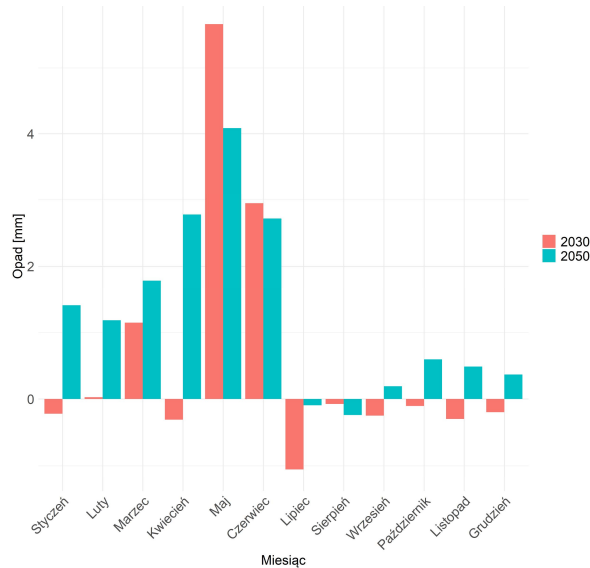
Rys.83. Maksymalny opad dobowy w miesiącu, uśredniony dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów: 2010, 2030 i 2050; scenariusz RCP 4.5



Rys.84. Maksymalny opad dobowy w miesiącu, uśredniony dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów: 2010, 2030 i 2050; scenariusz RCP 8.5



Rys.85. Anomalia maksymalnego opadu dobowego, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 4.5



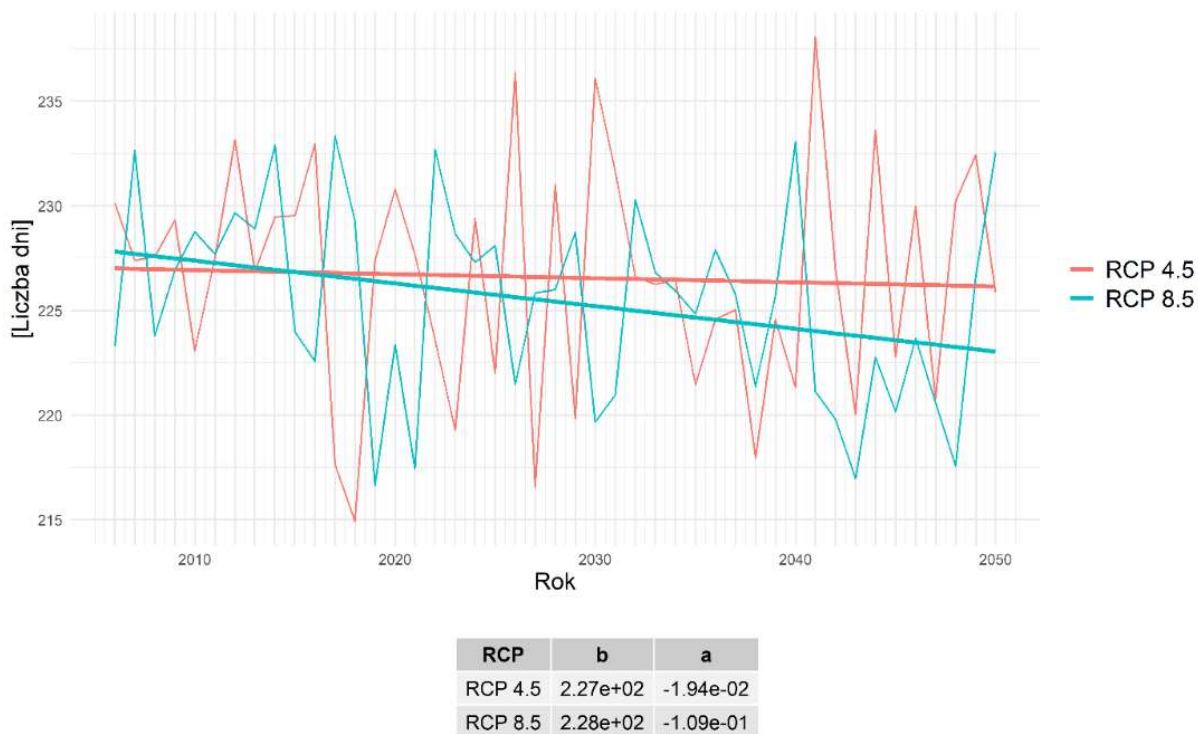
Rys.86. Anomalia maksymalnego opadu dobowego, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 8.5

Podsumowując, należy stwierdzić, że prognozowany jest wzrost maksymalnego opadu dobowego prawie w każdym miesiącu.

3.7 Wskaźniki suszy

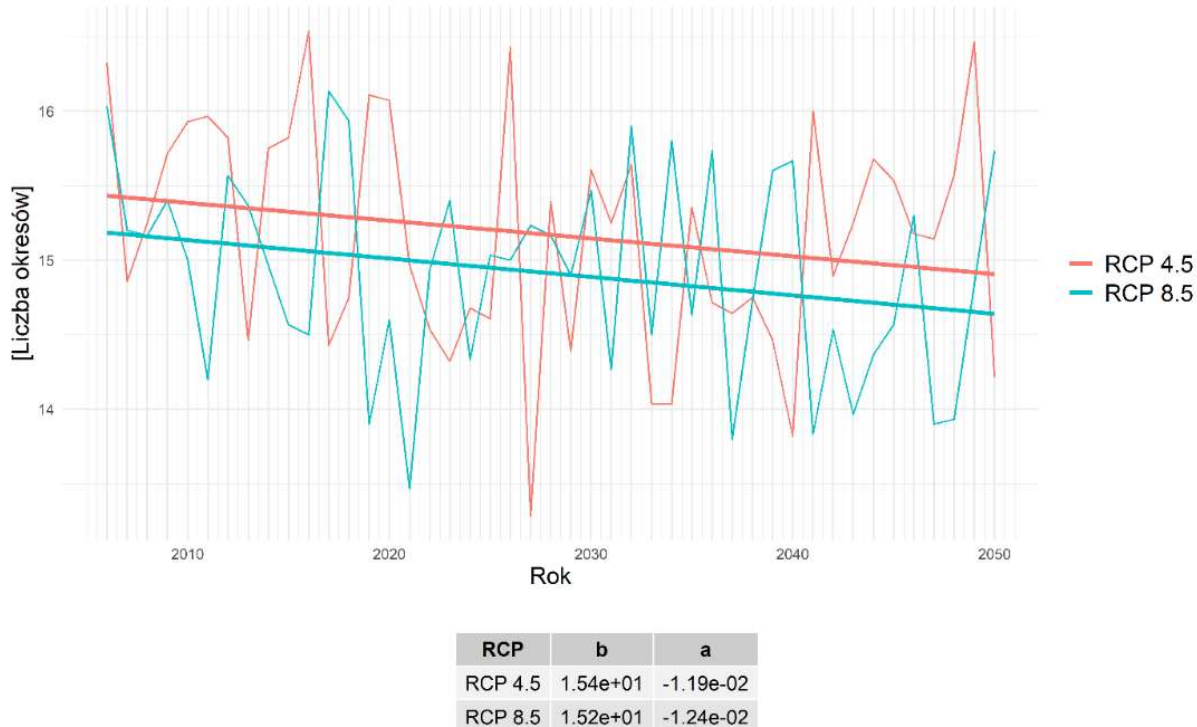
3.7.1 Liczba dni bez opadu w roku

Liczba dni bez opadu dla miasta Reda w obu scenariuszach wykazuje dla analizowanego okresu tendencję spadkową (rys. 87). W scenariuszu RCP 4.5 prognozowany spadek jest nieznaczny, w scenariuszu RCP 8.5 natomiast bardziej dynamiczny. W ujęciu wartości średniorocznych w scenariuszu RCP 4.5, w analizowanym okresie, zakres prognozowanego wskaźnika będzie się zmieniał od 214,9 do 238 dni, w RCP 8.5 natomiast od 216 do 233,3 dni.



Rys.87. Liczba dni bez opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda

3.7.2 Liczba okresów bez opadu długości co najmniej 5 dni w dekadzie

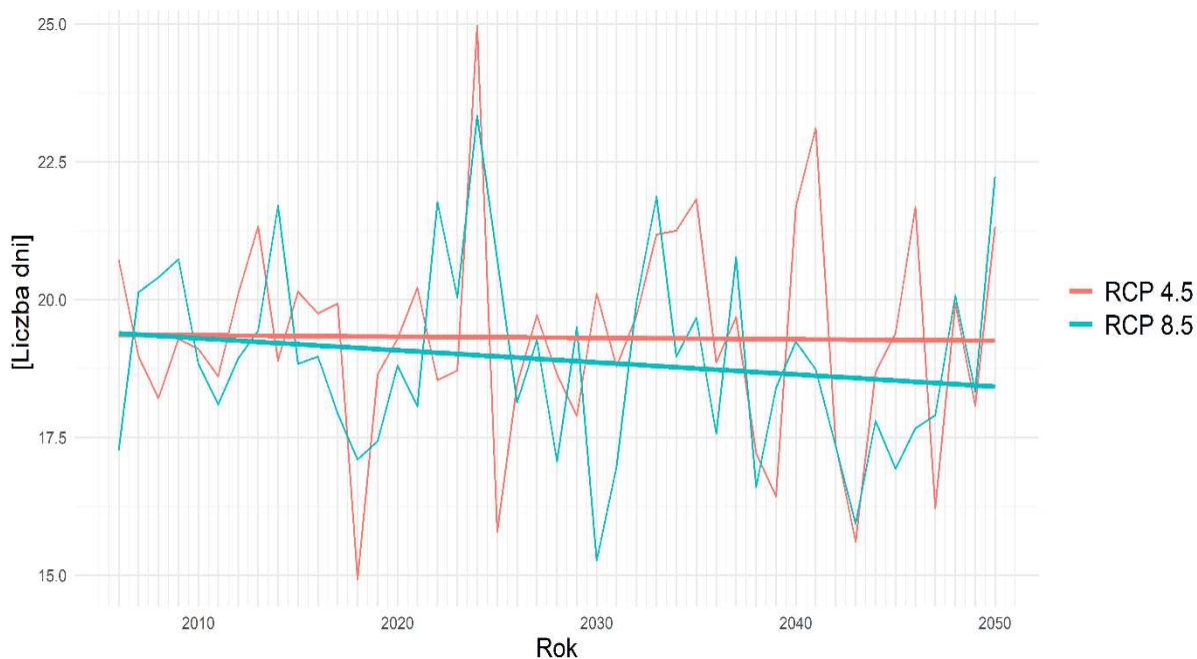


Rys.88. Liczba okresów bez opadu długości co najmniej 5 dni, uśredniona dla obszaru miasta Reda

Liczba okresów bez opadu o długości co najmniej 5 dni dla miasta Reda wykazuje dla obu analizowanych scenariuszy klimatycznych tendencję malejącą (rys. 88). W analizowanym okresie prognozowany spadek zachowuje zbliżoną tendencję w obu scenariuszach. W ujęciu wartości

średniodekadowych w scenariuszu RCP 4.5, w analizowanym okresie, zakres prognozowanego wskaźnika będzie się zmieniał od 13,28 do 16,5, w RCP 8.5 natomiast od 13,5 do 16,1.

3.7.3 Najdłuższy okres bez opadu



Rys.89. Najdłuższy okres bez opadu, uśredniony dla obszaru miasta Reda

Długość najdłuższego okresu bez opadu dla miasta Reda wykazuje dla analizowanego okresu trend malejący w scenariuszu RCP 8.5, natomiast w scenariuszu RCP 4.5 widoczny jest trend silnie zbliżony do trendu bocznego (bardzo małe nachylenie kąta) – rys. 89. W ujęciu wartości rocznych w scenariuszu RCP 4.5 zakres prognozowanego wskaźnika będzie się zmieniał od 14,9 do 24,9 dni, w scenariuszu RCP 8.5 natomiast od 15,2 do 23,3 dni.

4 Zmiany warunków hydrologicznych

4.1 Obserwowane zmiany warunków hydrologicznych

Miasto Reda położone jest obrębnie mezoregionów Pobrzeże Kaszubskie, Pradolina Redy-Łeby oraz Pojezierze Kaszubskie. Oś miasta stanowi rz. Reda. W granicach jej zlewni znajduje się jednak jedynie 22,27% powierzchni m. Reda. Zgodnie z *Mapą podziału hydrograficznego Polski* pozostała część miasta odwadniana jest przez:

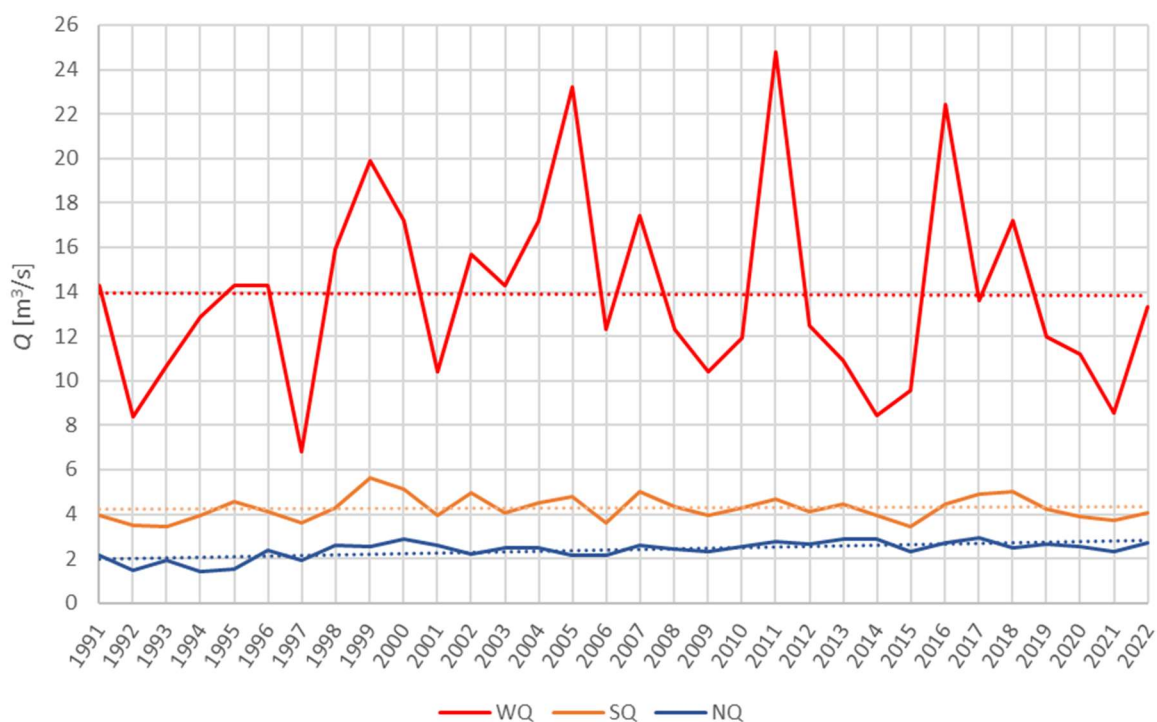
- Kanał Mrzezino: 29,63%;
- Zagórką Strugę: 28,14%;

- Gizdepkę: 12,58%;
- Dopływ spod Kąpina: 7,38%.

W celu oceny zmian warunków hydrologicznych na obszarze miasta, jakie nastąpiły w ostatnich dekadach dokonano analizy danych pomiarowo-obszaryjnych ze stacji Wejherowo na rzece Redzie. Pomimo tego, iż stacja zlokalizowana jest powyżej miasta Reda, tendencje zmian charakterystyk hydrologicznych określone na jej podstawie powinny być reprezentatywne również dla miasta Reda. Należy również podkreślić, iż na rzece Redzie nie ma stacji pomiarowo-obszaryjnych położonych poniżej stacji Wejherowo.

W analizach wykonywanych na potrzeby niniejszego dokumentu wykorzystano dane z lat hydrologicznych 1991-2022. Przedstawione poniżej analizy hydrologiczne zostały wykonane w odniesieniu do lat hydrologicznych. Rok hydrologiczny rozpoczyna się w dniu 1 listopada roku wcześniejszego niż kalendarzowy i kończy w dniu 30 października roku kalendarzowego.

Analiza zmian charakterystyk rocznych przepływu rz. Redy w profilu Wejherowo wskazuje, iż w okresie 1991-2022 nie nastąpiły znaczące tendencje zmian rocznych przepływów wysokich (WQ), średnich (SQ) i niskich (NQ). Cechują się one zmiennością rok do roku, jednak w okresie wieloletnim nie jest widoczna żadna istotna tendencja zmian (rys. 90).



Rys.90. Zmienność charakterystyk rocznych przepływów wysokich (WQ), średnich (SQ) i niskich (NQ) – rz. Reda, profil Wejherowo

W dokumencie takim jak *Miejski Plan Adaptacji do zmian klimatu*, szczególną uwagę należy zwrócić na przejawy tychże zmian, nie tylko w przyszłości, ale również te, które obserwujemy już w tym momencie. W hydrologii zmiany klimatu przejawiają się m.in. poprzez zmiany w częstotliwości występowania zjawisk ekstremalnych takich jak susze i związane z nimi bezpośrednio niżówki oraz powodzie spowodowane wystąpieniem ekstremalnych wezbrań.

4.1.1 Niżówki

W wielu obszarach kraju obserwuje się wzrost częstotliwości i dotkliwości susz. Czy podobny proces widoczny jest w danych pomiarowo-obszaryjnych ze stacji Wejherowo na rz. Redzie? Na wstępie konieczne jest doprecyzowanie pojęcia „niżówka”. Mianem niżówki określa się okres niskich przepływów w rzece spowodowanych ograniczonym jej zasilaniem wynikającym długotrwałej suszy atmosferycznej w półroczu letnim i utrudnionej infiltracji wody w zamrożone podłoże w półroczu zimowym (Bajkiewicz-Grabowska, Mikulski, 1999). Pojęcie to ma w dużej mierze subiektywny charakter. Nie istnieje jego jedna uniwersalna definicja. Tym samym brak jest szeroko uzgodnionych metod analizy niżówek (Węglarczyk, 2014). W literaturze funkcjonuje wiele równorzędnych metod określania przepływu granicznego niżówki, czyli przepływu poniżej którego uznaje się, że występuje niżówka. Każda z nich pozwala na otrzymanie nieco innych wyników, a tym samym wniosków z wykonanych analiz.

Wśród kryteriów pozwalających na określenie przepływu granicznego niżówki można wymienić m.in. kryteria statystyczne, gospodarcze – np. wymogi przemysłu, gospodarki komunalnej, żeglugi, utrzymania przepływu nienaruszalnego, czy też jakości wody (Fal, 2007). W niniejszej analizie wykorzystano kryteria hydrologiczne. Zdaniem M. Ozga-Zielińskiej (1990), jako przepływ graniczny niżówek najbardziej uzasadnione jest uznanie największej wartości z przepływów minimalnych rocznych w wieloletnim okresie obserwacji (WNQ). Tak zdefiniowany przepływ graniczny może jednak być wielkością dużą wynikającą z wystąpienia w wieloletniu nawet jednego, wyjątkowo mokrego roku. Z tego też względu, biorąc pod uwagę fakt, iż w okresie wielolecia występuje statystycznie podobna liczba lat mokrych i suchych, jako wartość graniczną niżówek wielu autorów przyjmuje średni przepływ z minimów rocznych (SNQ). Niżówki określone w ten sposób w literaturze często określane są mianem niżówki głębokiej (Dębski, 1970; Bajkiewicz-Grabowska, Mikulski, 1999). W tym miejscu warto dodać, iż według T. Tokarczyk (2010) dla zlewni obszaru Polski wartość SNQ jest zbliżona do przepływu o prawdopodobieństwie nieosiągnięcia Q_{70} określonego wg tzw. kryterium gospodarczego na podstawie sum czasów trwania przepływów wraz z wyższymi.

Kolejna kluczowa kwestia, to wskazanie minimalnego czasu trwania niżówki oraz zasad, zgodnie z którymi agregowane będą zdarzenia występujące w bliskich terminach. Również w tym przypadku analiza literatury nie daje jednoznacznej odpowiedzi. W badaniach prowadzonych w Polsce za minimalny czas trwania zdarzenia przyjmuje się od 1, 5, 7, 10 do 20 dni (Kaznowska 2011; Tomaszewski, 2015). Minimalny czas między dwiema różnymi niżówkami wg różnych opracowań wynosi 3, 5, 7, 14 dni (Tomaszewski, 2015, Węglarczyk, 2014, Zelenhasić and Salvai, 1987 za Kaznowska, 2011). W niniejszej analizie jako minimalny czas trwania niżówki przyjęto 7 dni, zaś za minimalny czas między dwiema różnymi niżówkami uznano 3 dni. Niżówki występujące po sobie w krótszym czasie zostały potraktowane jako jedno zdarzenie.

Obliczone zgodnie z powyższym algorytmem przepływy graniczne niżówek dla profilu Wejherowo na rz. Redzie na podstawie obserwacji z lat 1991-2022 wynoszą odpowiednio:

- dla niżówek ogółem: $WNQ = 2,96 \text{ m}^3/\text{s}$;
- dla niżówek głębokich: $SNQ = 2,39 \text{ m}^3/\text{s}$.

E. Bajkiewicz-Grabowska i Z. Mikulski (1999) oraz S. Węglarczyk (2014) jako podstawowe uznają następujące charakterystyki ilościowe niżówek:

- przepływ ekstremalny niżówki;

- przepływ średni niżówki;
- objętość niżówki, czyli objętość niedoboru wody;
- czas trwania niżówki;
- czas pomiędzy kolejnymi niżówkami.

Dla obu typów analizowanych niżówek zostały one zestawione w poniższej (tab. 3 i 4). W wyniku wykonanej analizy danych stwierdzono wyraźną tendencję malejącą czasu trwania niżówek w poszczególnych latach hydrologicznych (rys. 91), jak również deficytu niżówek w poszczególnych latach (rys. 92). W analizowanym okresie najczęściej, najgłębszych niżówek odnotowano do połowy lat 90. XIX w. W późniejszym okresie występowanie niżówek głębokich należało do rzadkości.

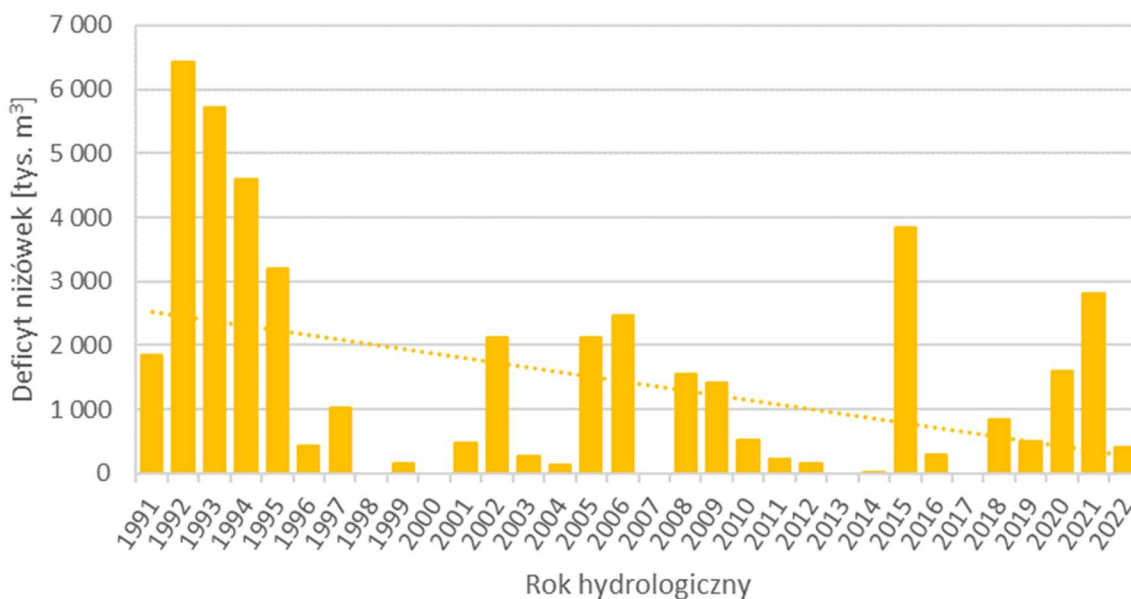
Tab. 3. Niżówki ogółem w okresie 1991-2022 w profilu Wejherowo, rz. Reda

Okres		Czas trwania [dni]	Deficyt niżówki [tys. m ³]	Przepływ minimalny [m ³ /s]	Średni przepływ [m ³ /s]	Czas do kolejnej niżówki [dni]
od	Do					
25.04.1991	03.05.1991	9	61,33	2,78	2,88	27
31.05.1991	12.06.1991	13	264,37	2,62	2,72	24
07.07.1991	19.07.1991	13	58,75	2,62	2,91	10
30.07.1991	20.09.1991	53	1467,91	2,14	2,64	21
12.10.1991	18.10.1991	7	7,76	2,78	2,95	95
22.01.1992	28.01.1992	7	1,72	2,86	2,96	113
21.05.1992	25.08.1992	97	6272,60	1,45	2,21	29
24.09.1992	30.09.1992	7	162,42	2,62	2,69	93
02.01.1993	10.01.1993	9	207,34	2,49	2,69	103
24.04.1993	31.08.1993	130	5504,63	1,93	2,47	173
21.02.1994	02.03.1994	10	0,01	2,78	2,96	62
04.05.1994	15.05.1994	12	100,21	2,62	2,86	26
11.06.1994	18.06.1994	8	87,26	2,68	2,83	5
24.06.1994	21.09.1994	90	4399,49	1,40	2,39	277
26.06.1995	17.07.1995	22	857,93	2,13	2,51	3
21.07.1995	29.08.1995	40	2342,32	1,54	2,28	148
25.01.1996	16.02.1996	23	255,72	2,38	2,83	14
02.03.1996	19.03.1996	18	181,41	2,68	2,84	445
08.06.1997	22.06.1997	15	133,86	2,50	2,86	17
10.07.1997	23.07.1997	14	16,36	2,80	2,95	15
08.08.1997	01.09.1997	25	875,14	1,92	2,55	698
01.08.1999	10.08.1999	10	168,48	2,52	2,77	649
21.05.2001	30.05.2001	10	110,60	2,79	2,83	34
04.07.2001	15.07.2001	12	176,28	2,65	2,79	32
17.08.2001	27.08.2001	11	196,98	2,59	2,75	320
14.07.2002	17.09.2002	66	2022,60	2,23	2,61	3
21.09.2002	04.10.2002	14	102,81	2,79	2,88	246
08.06.2003	24.06.2003	17	267,83	2,51	2,78	349
08.06.2004	16.06.2004	9	68,27	2,48	2,87	84
09.09.2004	21.09.2004	13	70,87	2,80	2,90	271
20.06.2005	21.07.2005	32	1197,51	2,17	2,53	38
29.08.2005	18.10.2005	51	928,79	2,52	2,75	232
08.06.2006	04.08.2006	58	2458,15	2,17	2,47	675
10.06.2008	13.07.2008	34	790,57	2,45	2,69	10
24.07.2008	16.08.2008	24	673,92	2,43	2,64	5
22.08.2008	28.08.2008	7	69,11	2,78	2,85	3
01.09.2008	08.09.2008	8	14,71	2,81	2,94	282

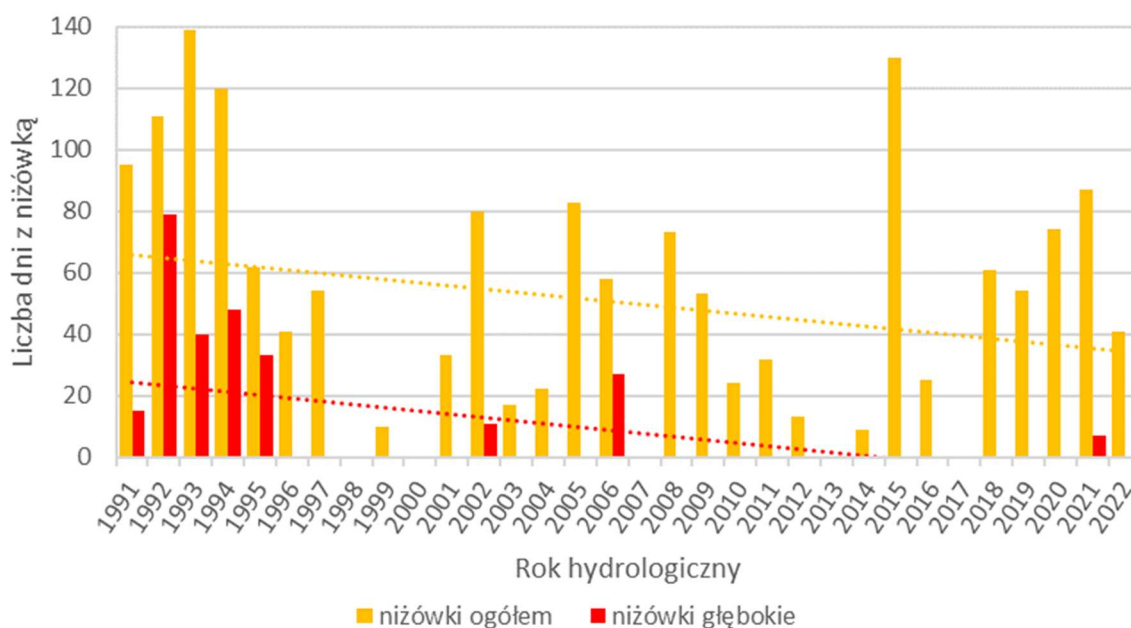
Okres		Czas trwania [dni]	Deficyt niżówki [tys. m ³]	Przepływ minimalny [m ³ /s]	Średni przepływ [m ³ /s]	Czas do kolejnej niżówki [dni]
od	Do					
18.06.2009	07.07.2009	20	321,42	2,48	2,77	43
20.08.2009	05.09.2009	17	657,48	2,30	2,51	7
13.09.2009	28.09.2009	16	425,93	2,44	2,65	267
23.06.2010	16.07.2010	24	520,14	2,54	2,71	291
04.05.2011	16.05.2011	13	103,67	2,75	2,87	36
22.06.2011	10.07.2011	19	117,49	2,75	2,89	345
20.06.2012	02.07.2012	13	148,60	2,66	2,83	708
11.06.2014	19.06.2014	9	25,04	2,85	2,93	346
01.06.2015	06.09.2015	98	3042,17	2,30	2,60	9
16.09.2015	17.10.2015	32	794,03	2,55	2,67	218
23.05.2016	16.06.2016	25	293,75	2,69	2,82	713
31.05.2018	21.06.2018	22	450,99	2,48	2,72	6
28.06.2018	06.07.2018	9	153,80	2,61	2,76	32
08.08.2018	14.08.2018	7	60,47	2,75	2,86	15
30.08.2018	21.09.2018	23	172,81	2,64	2,87	255
04.06.2019	15.06.2019	12	16,42	2,83	2,94	3
19.06.2019	01.07.2019	13	213,41	2,63	2,77	41
12.08.2019	09.09.2019	29	261,78	2,70	2,86	278
14.06.2020	09.07.2020	26	481,22	2,54	2,75	3
13.07.2020	29.08.2020	48	1112,00	2,54	2,69	289
15.06.2021	28.08.2021	75	2658,57	2,31	2,55	8
06.09.2021	17.09.2021	12	158,97	2,71	2,81	279
24.06.2022	01.07.2022	8	84,66	2,78	2,84	30
01.08.2022	20.08.2022	20	236,76	2,70	2,82	13
03.09.2022	15.09.2022	13	83,81	2,75	2,89	

Tab. 4. Niżówki głębokie w okresie 1991-2022 w profilu Wejherowo, rz. Reda

Okres		Czas trwania [dni]	Deficyt niżówki [tys. m ³]	Przepływ minimalny [m ³ /s]	Średni przepływ [m ³ /s]	Czas do kolejnej niżówki [dni]
od	Do					
03.08.1991	17.08.1991	15	889,91	2,14	2,27	287
31.05.1992	10.08.1992	72	5332,57	1,45	2,10	3
14.08.1992	20.08.1992	7	362,88	2,30	2,36	262
10.05.1993	18.06.1993	40	2556,61	1,93	2,22	378
02.07.1994	18.08.1994	48	3297,03	1,40	2,17	342
27.07.1995	28.08.1995	33	2114,22	1,54	2,22	2555
27.08.2002	06.09.2002	11	600,47	2,23	2,33	1397
05.07.2006	31.07.2006	27	1674,49	2,17	2,24	5469
22.07.2021	28.07.2021	7	373,25	2,31	2,34	



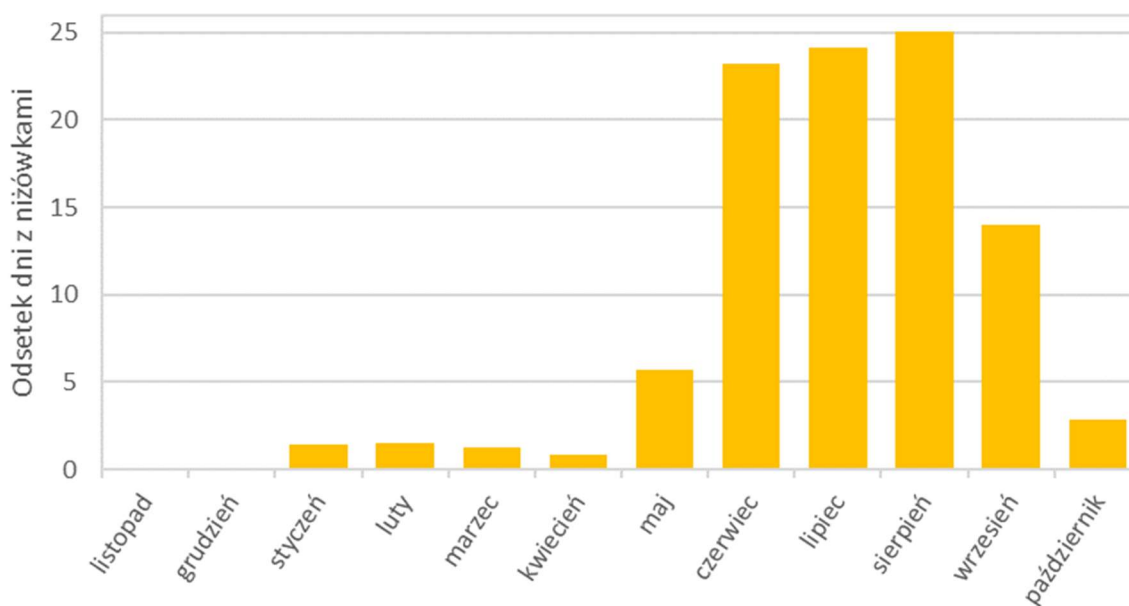
Rys.91. Deficyt niżówek w poszczególnych latach hydrologicznych (profil Wejherowo, rz. Reda)



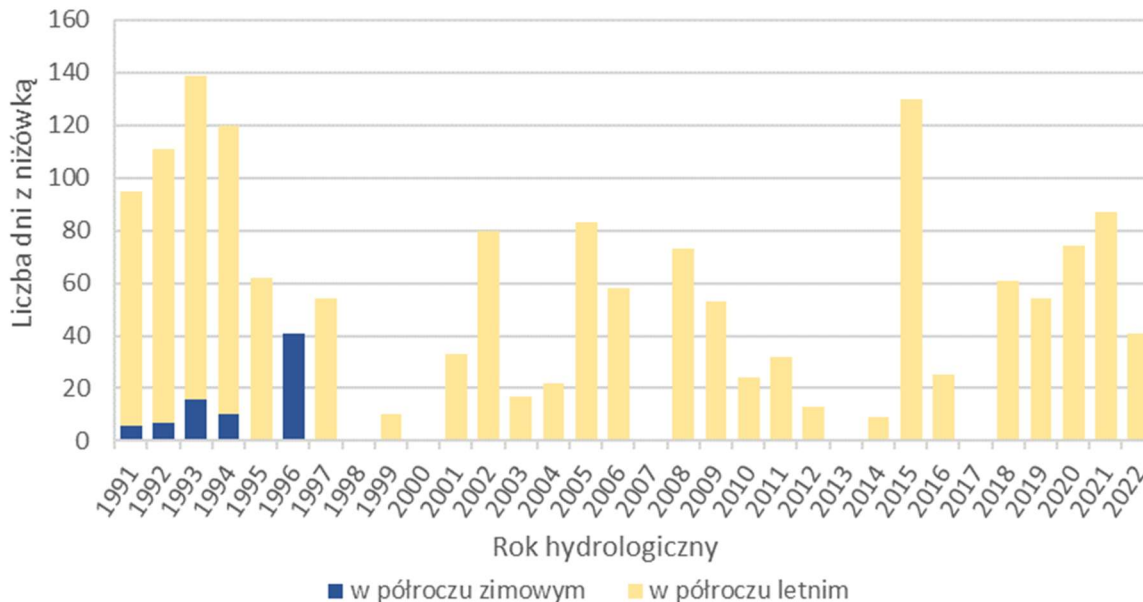
Rys.92. Liczba dni z niżówką w poszczególnych latach hydrologicznych (profil Wejherowo, rz. Reda)

Niżówki na rz. Redzie w profilu Wejherowo występują przede wszystkim w okresie letnim, tj. od czerwca do sierpnia (rys. 93). Są one wynikiem przedłużającej się suszy atmosferycznej (okresu, w którym opady atmosferyczne są znacznie niższe od tych, które zwykle występują w danym czasie) oraz suszy glebowej (okresu, w którym ilość wody w profilu glebowym jest zbyt niska dla zaspokojenia bieżących potrzeb roślin). W tym okresie, w związku z intensywną wegetacją zostają w znacznej części wykorzystane zasoby wód gruntowych, co prowadzi do ograniczenia zasilania podziemnego wód powierzchniowych. Bujna roślinność ogranicza również spływ powierzchniowy wód opadowych do rzek. Najmniej niżówek na rz. Redzie notuje się w okresie od października do kwietnia, co jest zapewne wynikiem specyficznego klimatu nadmorskiego. W okresie zimowym nie następuje głębokie przemarzanie gruntu, wody opadowe mogą na bieżąco zasilać wody podziemne oraz wody

powierzchniowe. Nizówki w okresie zimowym notowano w analizowanym okresie jedynie do połowy lat 90. XX w (rys. 94). Wszystkie odnotowane nizówki w późniejszym czasie wystąpiły w półroczu letnim.



Rys.93. Odsetek dni z niżówkami przypadający na poszczególne miesiące (profil Wejherowo, rz. Reda, okres 1991-2022)



Rys.94. Liczba dni z niżówką w półroczach lat hydrologicznych (profil Wejherowo, rz. Reda)

W latach 1991-2022 wystąpiły łącznie 62 nizówki, z czego tylko 9 można określić mianem głębokich (zgodnie z kryteriami określonymi na wstępie). Miały one bardzo zróżnicowany czas trwania (tab. 5). 14 z nich trwało powyżej miesiąca. Najdłuższe nizówka występowała przez 130 dni (od kwietnia do sierpnia 1993 roku). Natomiast nizówkę o największym deficycie, 6 272,6 tys. m³, odnotowano od maja

do sierpnia 1992 roku. Przepływ minimalny w analizowanym okresie wystąpił w dn. 24 czerwca 1994 roku. Wyniósł zaledwie 1,4 m³/s.

Tab. 5. Liczba niżówek o różnym czasie trwania (profil Wejherowo, rz. Reda, okres 1991-2022)

Rodzaj niżówki	Liczba niżówek				
	Ogółem	7-10 dni	11-20 dni	21-30 dni	powyżej 30 dni
Ogółem	62	16	22	10	14
w tym głębokie	9	2	2	1	4

Z punktu widzenia analizy warunków hydrologicznych występujących w zlewni istotne jest również określenie na ile przeciętne przerwy między niżówkami są dłuższe od samych niżówek. Pomocny w tym może być wskaźnik gęstości niżówek obliczany wg wzoru (Tomaszewski, 2015):

$$WGN = \frac{SrTMN}{\acute{S}rTN}$$

gdzie:

- WGN – wskaźnik gęstości niżówek;
- $\acute{S}rTMN$ – średni odstęp międzyniżówkowy [dni];
- $\acute{S}rTN$ – średni czas trwania niżówki [dni].

W przypadku analizowanych danych wskaźnik ten wynosi:

- dla niżówek ogółem: 6,26;
- dla niżówek głębokich: 46,27.

Powyższe statystyki potwierdzają, iż niżówki (określone zgodnie z przyjętymi na wstępie kryteriami) występują na rz. Redzie w profilu Wejherowo stosunkowo rzadko. W związku z tym można powiedzieć, iż odstępy między niżówkami głębokimi były przeciętnie ponad 46 razy dłuższe od samych epizodów niżówkowych. W przypadku wszystkich niżówek ogółem wskaźnik ten jest niższy (6,26), jednak na tle innych rzek w kraju nadal jest to stosunkowo wysoka wartość.

Kolejną charakterystyką dostarczającą cennych informacji jest tzw. względny deficyt niżówki. Jest on obliczany wg wzoru (Tomaszewski, 2015):

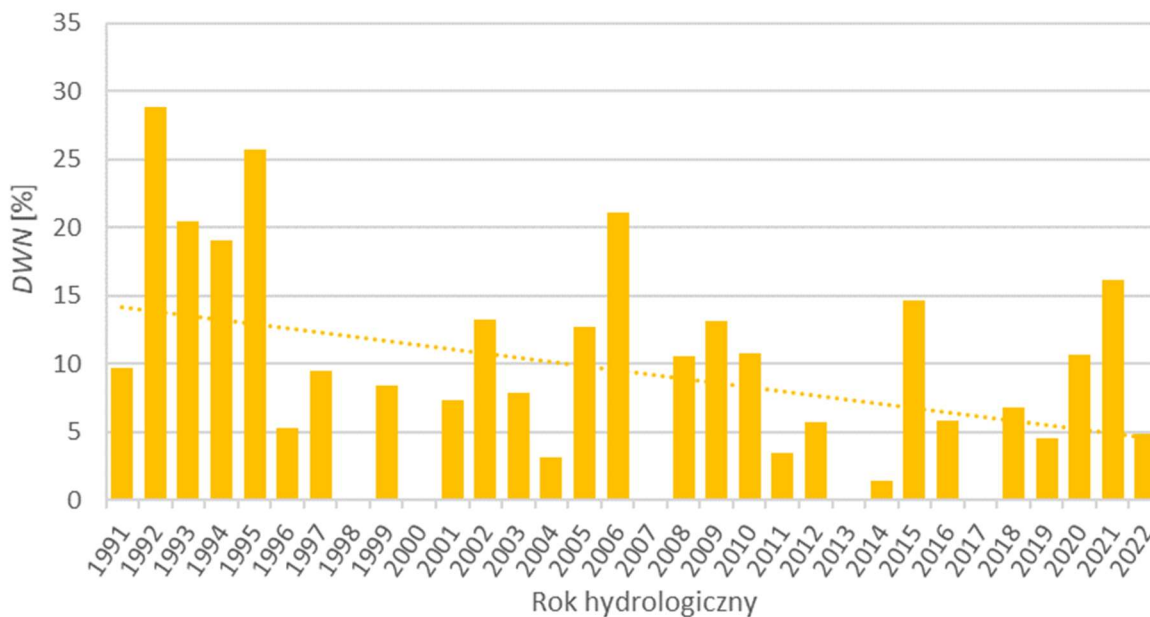
$$DWN = \frac{VN}{Vmax} * 100\%$$

gdzie:

- DWN – deficyt względny odpływu niżówkowego [%],
- VN – objętość niżówki [m³],
- $Vmax$ – objętość maksymalnego możliwego niedoboru odpływu niżówkowego w danym okresie, tzn. takiego, w którym przepływ rzeczny wynosi 0 m³/s [m³].

Powyższy wskaźnik pozwala na obiektywną ocenę niedoborów wody w zlewni. Uznaje się go za dobry estymator stopnia surowości suszy hydrologicznej, gdyż wskazuje na stopień zdrenowania zasobów wodnych zlewni pozostających w związku hydraulicznym z rzeką. Dane z okresu 1991-2022 wskazują na wyraźną tendencję malejącą tego wskaźnika (rys. 95).

Przedstawione powyżej wyniki analiz wskazują jednoznacznie, iż na przestrzeni minionych trzech dekad obserwowany jest statystyczny spadek częstotliwości występowania niżówek na rz. Redzie w profilu Wejherowo. Oczywiście nie oznacza to, iż problem suszy w granicach miasta nie występuje okresowo.



Rys.95. Deficyt względną odpływu niżówkowego w poszczególnych latach hydrologicznych (profil Wejherowo, rz. Reda)

4.1.2 Wezbrania

Mianem wezbrania określa się okresowe podniesienie stanu wody w rzece powstałe w wyniku wzmożonego zasilania (np. przez opady atmosferyczne lub roztopy) lub też na skutek piętrzenia wody (np. w sytuacji wystąpienia zatoru lodowego lub silnego zarastania). Pojęcie to nie powinno być utożsamiane z pojęciem powodzi (nie każde wezbranie powoduje powódź, ale każda powódź rzeczna występuje w czasie wezbrania). Wyróżnia się różne wezbrania w zależności od ich genezy, m.in.:

- wezbrania opadowe (w naszej strefie klimatycznej występujące najczęściej w okresie letnim, głównie na przełomie czerwca i lipca);
- wezbrania roztopowe (w naszej strefie klimatycznej występujące wczesną wiosną, kiedy woda pochodząca z topniejącej pokrywy śnieżnej ma ograniczoną możliwość infiltracji do zamrożonego podłoża i sływa po powierzchni do rzek i jezior);
- wezbrania zatorowe (powstające w wyniku ograniczenia przepływu w rzece, np. w skutek zjawisk lodowych lub też silnego zarastania).

Podobnie jak w przypadku niżówek, również w analizie występowania i przebiegu wezbrań kluczową kwestią jest wskazanie granicznej wartości stanu wody w rzece, od której mówi się o wezbraniu. Według E.Bajkiewicz-Grabowskiej oraz Z.Mikulskiego (1999) podstawą fali wezbraniowej może być:

- stan średniej rocznej wielkiej wody (SWW) – wyznacza wezbrania wielkie przekraczające stan pełnokorytowy; są to często wezbrania katastrofalne powodujące powodzie;
- stan niskiej wielkiej wody (NWW) – wyznacza wezbrania duże, mieszczące się w korycie, ale podtapiające równinę zalewową;
- stan odpowiadający dolnej granicy strefy stanów wysokich – określane jako $\frac{1}{2}$ (NWW + WSW).

Inni autorzy za dolną granicę wezbrania przyjmują najniższy z maksymalnych przepływów rocznych z wielolecia (NWQ) (Ozga-Zielińska, 1990 za Kaznowska i in. 2015). Takie podejście zakłada wystąpienie

każdego roku przynajmniej jednego wezbrania. Niestety, występowanie w analizowanym zbiorze danych nawet pojedynczych szczególnie suchych lat, sprawia, iż NWQ przyjmuje stosunkowo niską wartość, co w konsekwencji prowadzi do wyróżniania bardzo licznych wezbrań.

W związku z powyższym w literaturze można się spotkać również z zastosowaniem innych kryteriów hydrologicznych. Za przepływ graniczny uznawany jest średni przepływ maksymalny z wielolecia (SWQ) lub mediana przepływów maksymalnych rocznych (Ozga-Zielińska, Brzeziński, 1997 za Siwek, 2016). W niniejszej analizie za przepływ graniczny przy określaniu wezbrań uznano SWQ, który w przypadku profilu Wejherowo na rz. Redzie wynosi: 13,88 m³/s.

Podobnie jak w przypadku niżówek, również przy ocenie przebiegu wezbrań kluczowym jest wskazanie minimalnego czasu trwania tego zjawiska oraz minimalnego odstępu między kolejnymi zdarzeniami. Wezbrania mają niejednokrotnie bardzo nagły charakter, z tego też względu w tym przypadku za wezbranie uznano każdy dzień z przepływem przekraczającym przepływ graniczny. Minimalny odstęp między kolejnymi zdarzeniami zachowano analogiczny jak w przypadku niżówek, tj. 3 dni.

Wśród głównych charakterystyk wezbrania wymienia się:

- objętość fali wezbraniowej rozumiana jako objętość nadmiaru wody w stosunku do przepływu granicznego;
- natężenie przepływu kulminacyjnego;
- czas trwania wezbrania.

Zestawienie wezbrań, które wystąpiły w latach hydrologicznych 1991-2022 wraz z ich wybranymi charakterystykami (w tym tymi wymienionymi powyżej) zostało zamieszczone poniżej (tab. 6). W analizowanym okresie wystąpiło łącznie 20 wezbrań. Największe z nich miało miejsce w 2011 roku. Objętość fali wezbraniowej wyniosła wówczas ponad 2 100 tys. m³, a przepływ kulminacyjny 24,8 m³/s. Najdłuższe z odnotowanych wezbrań trwały 8 dni.

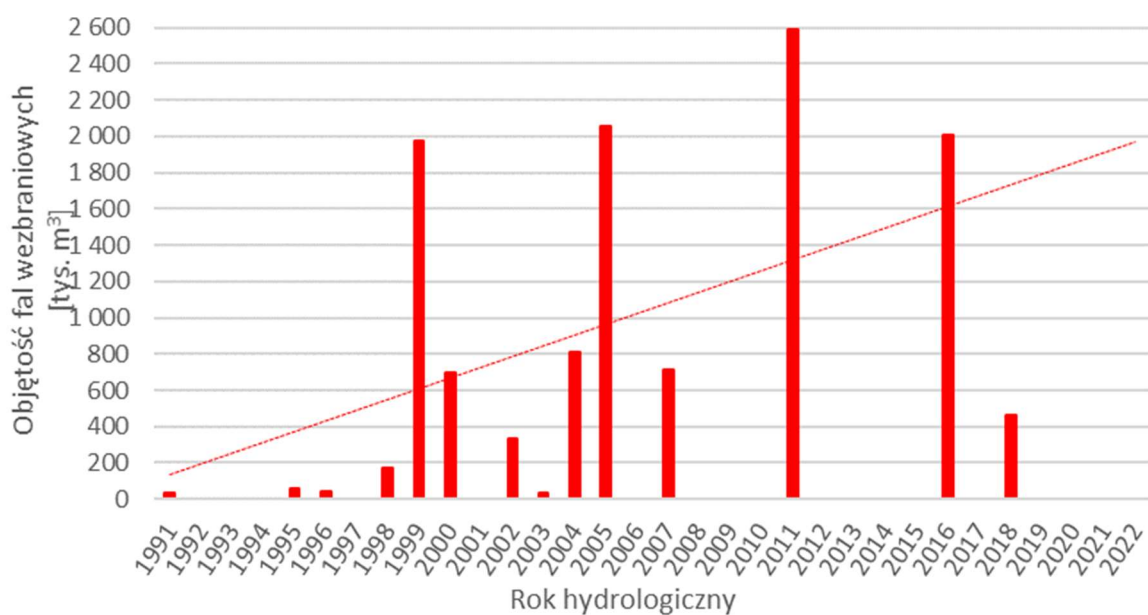
Tab. 6. Zestawienie wezbrań wraz z ich charakterystykami (profil Wejherowo, rz. Reda)

Okres		Czas trwania [dni]	Przepływ kulminacyjny [m ³ /s]	Maksymalny stan wody [cm]	Objętość fali wezbraniowej [tys. m ³]	Średni przepływ [m ³ /s]	Czas do kolejnego wezbrania [dni]
od	do						
26.02.1991	26.02.1991	1	14,30	156	36,29	14,30	1386
13.12.1994	14.12.1994	2	14,30	156	55,30	14,20	481
08.04.1996	09.04.1996	2	14,30	156	38,02	14,10	935
31.10.1998	07.11.1998	8	19,90	182	1594,96	16,19	40
17.12.1998	17.12.1998	1	14,30	156	36,29	14,30	150
16.05.1999	17.05.1999	2	17,90	173	521,86	16,90	205
08.12.1999	09.12.1999	2	13,90	154	3,46	13,90	53
31.01.2000	07.02.2000	8	17,20	173	696,40	14,89	715
22.01.2002	23.01.2002	2	14,10	163	38,02	14,10	5
28.01.2002	29.01.2002	2	15,70	169	297,22	15,60	352
16.01.2003	16.01.2003	1	14,30	156	36,29	14,30	385
05.02.2004	09.02.2004	5	17,20	173	812,17	15,76	331
05.01.2005	05.01.2005	1	16,60	172	235,01	16,60	72
18.03.2005	20.03.2005	3	23,20	194	1819,59	20,90	683
01.02.2007	04.02.2007	4	17,40	171	715,40	15,95	1443
17.01.2011	18.01.2011	2	17,80	175	444,10	16,45	18
05.02.2011	09.02.2011	5	24,80	199	2142,73	18,84	1983

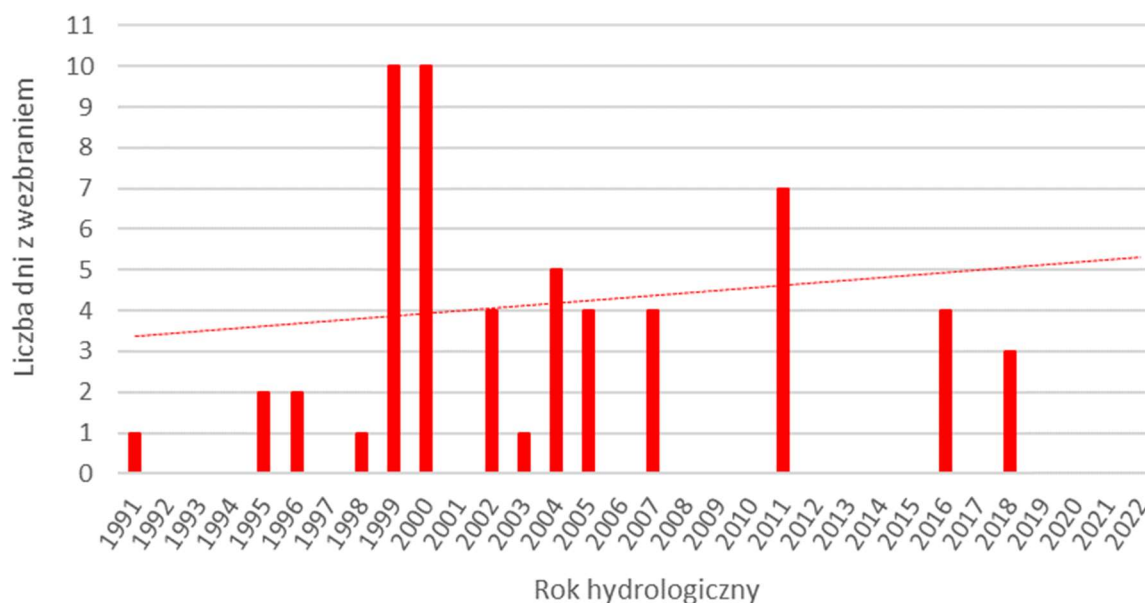
Okres		Czas trwania [dni]	Przepływ kulminacyjny [m ³ /s]	Maksymalny stan wody [cm]	Objętość fali wezbraniowej [tys. m ³]	Średni przepływ [m ³ /s]	Czas do kolejnego wezbrania [dni]
od	do						
15.07.2016	18.07.2016	4	22,40	188	2011,40	19,70	507
07.12.2017	08.12.2017	2	17,20	162	452,74	16,50	17
25.12.2017	25.12.2017	1	14,00	146	10,37	14,00	

Przeanalizowano również występowanie wezbrań w poszczególnych latach hydrologicznych. Stwierdzono występowanie wyraźnej tendencji rosnącej objętości fal wezbraniowych w wieloletiu (rys. 96), jak również statystyczny wzrost liczby dni z wezbraniem (rys. 97). Wezbrania na rz. Redzie występują przede wszystkim w okresie zimowym, a największa ich liczba w lutym (rys. 98). Mając na uwadze klimat miasta Redy, nieznaczny obecnie wpływ morza, należy stwierdzić, że wezbrania zimowe nie mają typowego roztopowego charakteru. W przypadku Redy mogą to być wezbrania wynikające z występowania intensywnych opadów. W okresie zimowym, ze względu na brak wegetacji woda szybko spływa do rzek powodując wzrost stanu.

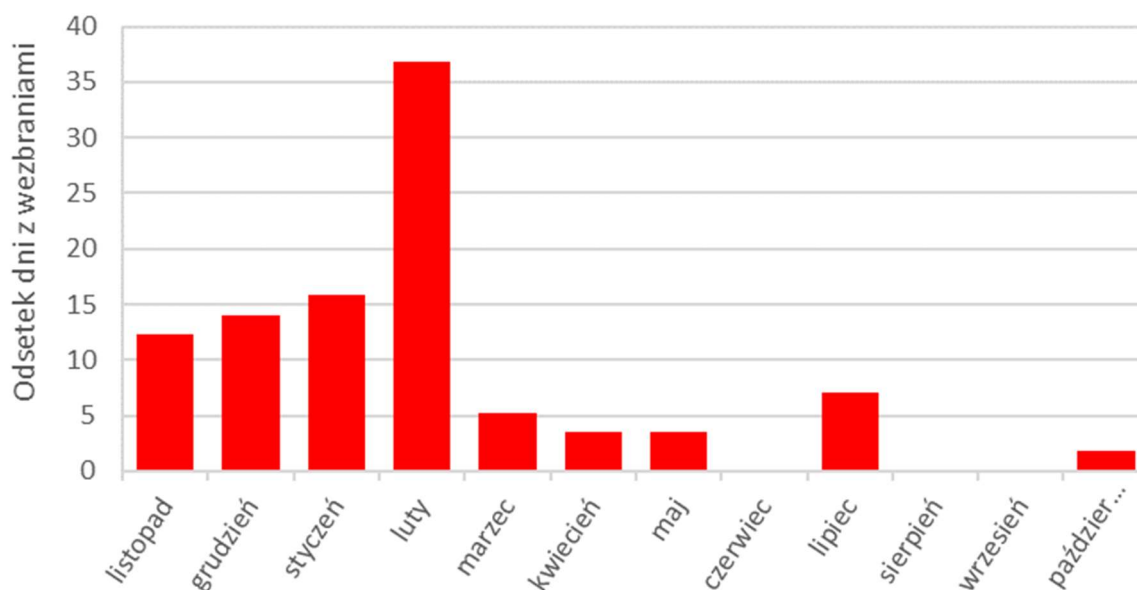
Podsumowując powyższe analizy należy zwrócić uwagę na potrzebę rozwoju w regionie systemu retencjonującego wody opadowe. Powinien on przede wszystkim wykorzystywać rozwiązania naturalne, naśladujące w możliwie dużym stopniu naturalne procesy zachodzące w środowisku. Co więcej w przypadku Redy jest niezwykle istotne, aby system ten działał efektywnie również w okresie zimowym.



Rys.96. Objętość fal wezbraniowych w latach hydrologicznych (rz. Reda, profil Wejherowo)



Rys.97. Liczba dni z wezbraniem w latach hydrologicznych (rz. Reda, profil Wejherowo)



Rys.98. Występowanie wezbrań w poszczególnych miesiącach (rz. Reda, profil Wejherowo)

4.2 Prognozowane zmiany warunków hydrologicznych

Jednym z kluczowych zagadnień w analizie wrażliwości sektora gospodarki wodnej na zmiany klimatu jest określenie warunków, które będą występowały w najbliższych dekadach. Inwestycje z zakresu gospodarki wodnej planowane są na wiele lat, najczęściej przynajmniej na kilka dekad. Konieczne jest zatem uwzględnienie w tym procesie prognoz długoterminowych. Poniżej przedstawiono wyniki analizy danych opracowanych w ramach zakończonego w 2023 roku projektu realizowanego przez IOŚ-PIB pn. *Baza wiedzy o zmianach klimatu i adaptacji do ich skutków oraz kanałów jej upowszechniania w kontekście zwiększania odporności gospodarki, środowiska*

i społeczeństwa na zmiany klimatu oraz przeciwdziałania i minimalizowania skutków nadzwyczajnych zagrożeń (KLIMADA 2.0). Opracowane w ramach projektu prognozy charakterystyk klimatologicznych stały się podstawą symulacji różnych elementów bilansu wodnego przy wykorzystaniu modelu SWAT. Symulacje zostały wykonane dla okresu 2016-2100. Uwzględniono w nich takie procesy, jak: spływ powierzchniowy, ewapotranspiracja, infiltracja, spływ podpowierzchniowy, wymiana wody profilu glebowego i pierwszej warstwy wodonośnej z korytem cieków. Opracowany model posłużył do wykonania analiz z krokiem dobowym. Poza wspomnianymi powyżej prognozami warunków klimatologicznych do jego opracowania wykorzystano m.in. warstwy wchodzące w skład Mapy podziału hydrograficznego Polski, równania charakteryzujące przekroje koryt rzecznych (z projektu CHASE-PL), informacje o pokryciu terenu i strukturze użytków rolnych, mapy glebowe, dane o wielkości poborów i zrzutów do wód powierzchniowych.

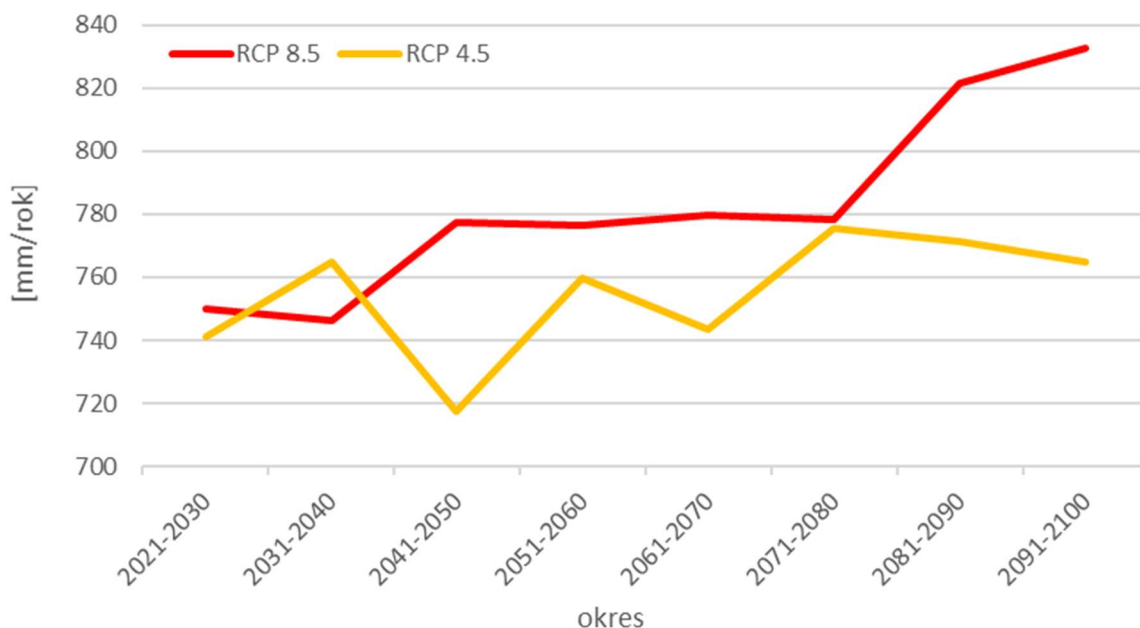
Model opracowany został dla obszaru całego kraju. Z tego względu trzeba mieć na uwadze, iż w przypadku analizy danych ze stosunkowo niewielkich obszarów (np. miasta) można traktować je wyłącznie jako szacunki (model nie był kalibrowany w skali tak małych obszarów). Wynika to również z faktu, iż środowisko przyrodnicze w granicach każdego miasta jest w dużym stopniu przeobrażone, co ma bezpośredni wpływ na przebieg poszczególnych elementów obiegu wody. Co więcej, na obszarze każdego miasta obieg wody jest również w istotnym stopniu modyfikowany przez funkcjonującą infrastrukturę, w tym przede wszystkim sieć kanalizacyjną oraz zrzuty i pobory wód.

Pomimo przedstawionych powyżej zastrzeżeń wykorzystane wyniki modelu matematycznego można uznać za dobrą podstawę do szacunkowych analiz oraz określenia przyszłych tendencji zmian charakterystyk związanych z wodami opadowymi i roztopowymi.

Wyniki modelu hydrologicznego, podobnie jak wykorzystane prognozy zmian klimatu, odnoszą się do dwóch scenariuszy RCP 4.5 i RCP 8.5.

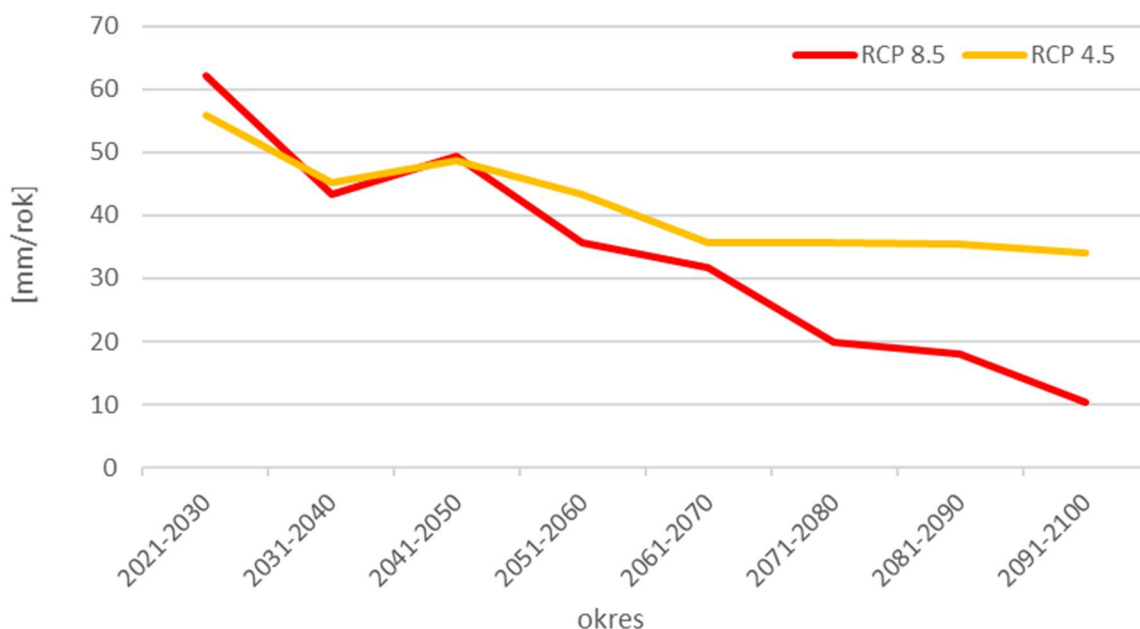
Opracowany model matematyczny posłużył do symulacji poszczególnych elementów obiegu wody w zlewniach zamkniętych naturalnymi działami wodnymi. Na potrzeby niniejszego opracowania otrzymane wyniki zostały przeliczone na obszar miasta Redy.

Wyniki analiz wskazują, iż do lat 70. XXI w. sumy roczne opadów utrzymają się na podobnym poziomie (rys. 99). Istotnych zmian możemy się natomiast spodziewać w kolejnych dekadach. Na wzrost rocznych sum opadów wskazują symulacje wykonane dla scenariusza RCP 8.5, czyli tego, który zakłada nie podejmowanie istotnych działań na rzecz ograniczenia zmian klimatu. Z jednej strony wzrost sum opadów może być korzystny, jednak trzeba pamiętać, iż wiąże się on nie tylko z korzyściami, ale również z licznymi zagrożeniami. Co więcej brak podjęcia niezbędnych działań ograniczających intensywność zmian klimatu będzie miało szereg innych, negatywnych skutków dla człowieka, gospodarki i przyrody. W tym miejscu należy również zaznaczyć, iż poniższy wykres odnosi się do sum rocznych. Obserwacje i prognozy już w tym momencie wskazują natomiast na zmiany w charakterze opadów, ich rozkładzie w ciągu roku. Coraz częściej mają one charakter nawalny, występują w stosunkowo krótkim czasie z dużym natężeniem. Pomędzy nimi obserwujemy coraz częściej wydłużające się okresy bezopadowe, okresy suszy.



Rys.99. Prognozowane zmiany rocznych sum opadów

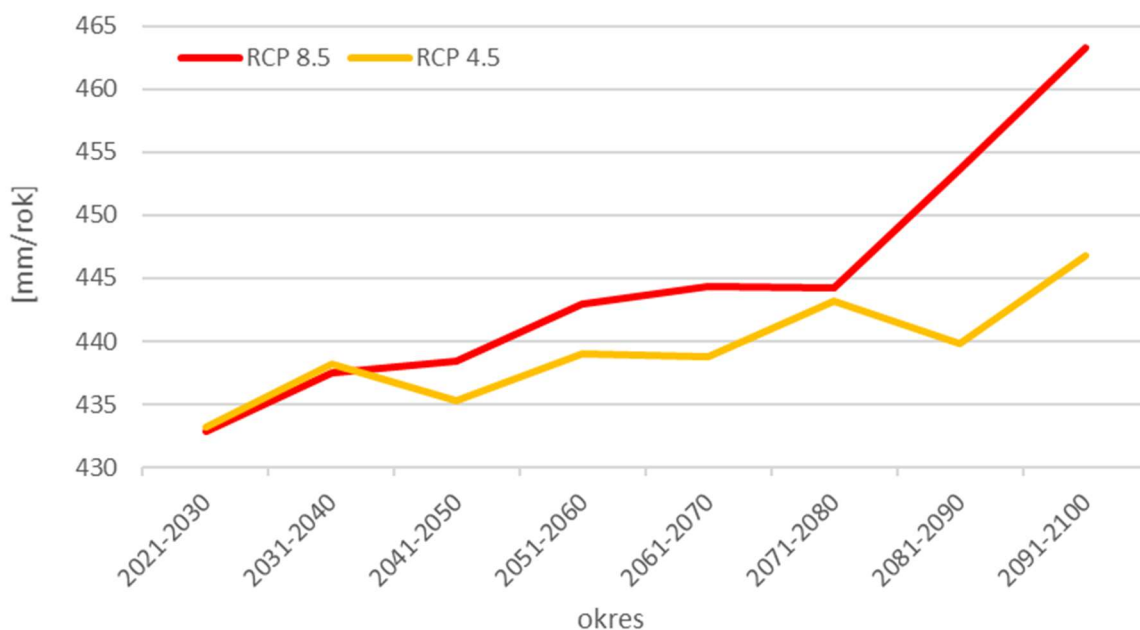
Wykorzystane prognozy zmian klimatu wskazują również na kontynuację procesu skracania czasu występowania oraz grubości pokrywy śnieżnej (rys. 100). Natężenie prognozowanych zmian dotyczące ilości wód roztopowych będzie odwrotnie proporcjonalne do efektywności podejmowanych działań mających na celu ograniczenie zmian klimatu. Intensywniejsze zmiany prognozowane są w odniesieniu do scenariusza RCP 8.5 niż w przypadku scenariusza RCP 4.5. Prognozuje się, iż różnice w tym zakresie będą szczególnie widoczne począwszy od lat 70. bieżącego wieku.



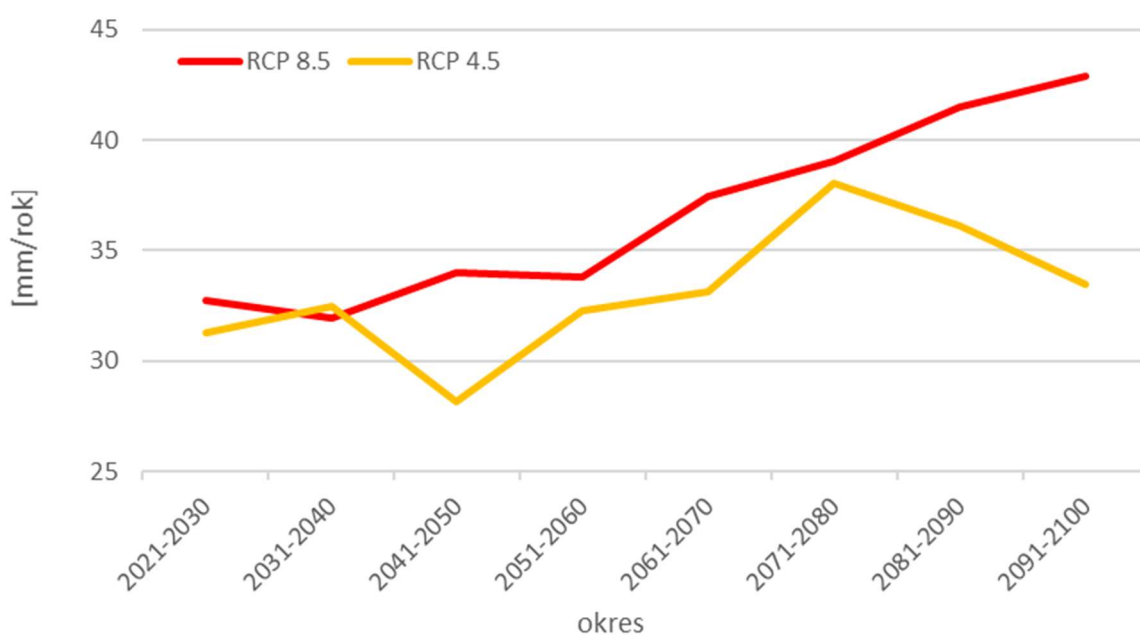
Rys.100. Prognozowana ilość wód roztopowych

Kolejnym prognozowanym elementem bilansu wodnego jest ewapotranspiracja (rys. 101). Prognozowany wzrost tej charakterystyki będzie bezpośrednią konsekwencją wzrostu temperatury powietrza. Z tego względu wzrost ewapotranspiracji w przypadku scenariusza RCP 8.5 od lat 70. Będzie

prawdopodobnie dużo wyższy niż w przypadku scenariusza RCP 4.5. Warto też zwrócić uwagę, iż wzrost intensywności ewapotranspiracji będzie niwelował w pewnym stopniu wzrost opadów atmosferycznych.



Rys.101. Prognozowane zmiany ewapotranspiracji

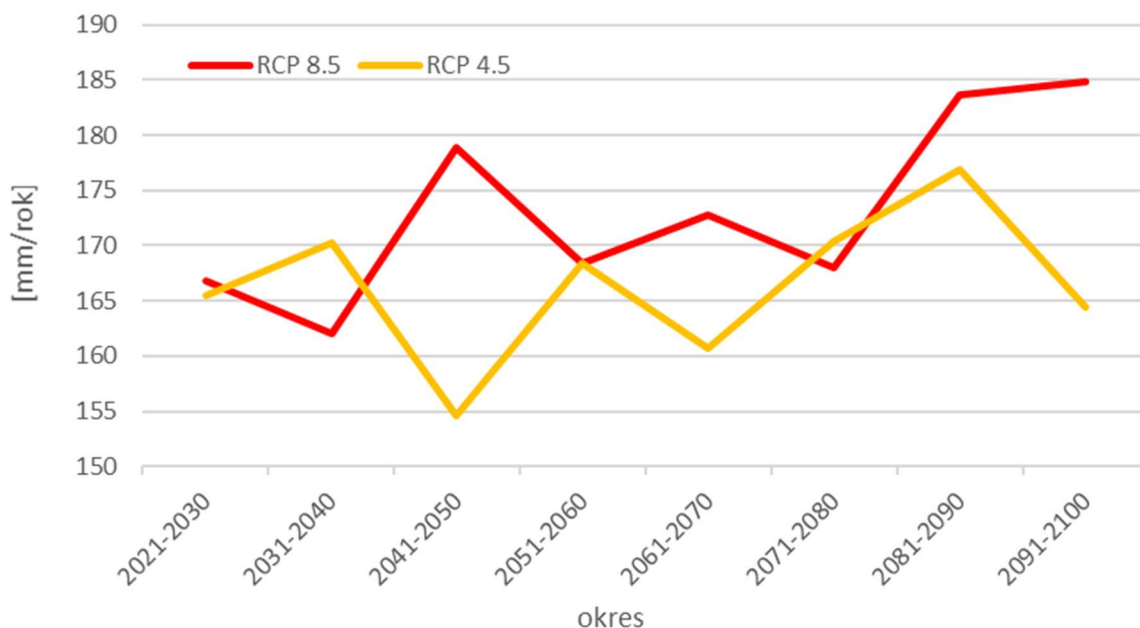


Rys.102. Prognozowane zmiany spływu powierzchniowego

Zmiany ilości opadów oraz ich charakteru oraz zmiany szeregu innych charakterystyk będą wpływały na prognozowany wzrost ilości wód opadowych spływających po powierzchni (rys. 102). Na obszarze miasta proces ten będzie potęgowany w wyniku wzrostu powierzchni nieprzepuszczalnych. Wody spływające po powierzchni powinny być retencjonowane, zatrzymywane w miejscu wystąpienia opadów. Wody te gromadząc się w lokalnych zagłębieniach mogą potencjalnie powodować lokalne

podtopienia. Trafiając do cieków powierzchniowych będą powodowały wzrost ich stanu, a w konsekwencji wzrost zagrożenia powodziowego.

Prognozy wskazują, iż w najbliższych dekadach nie zmieni się w istotny sposób stopień zasilania wód podziemnych (rys. 103). Również w przypadku tej charakterystyki większych zmian należy się spodziewać dopiero od lat 70. XXI w. Trzeba jednak pamiętać, iż w rzeczywistości na obszarze miasta, terenów gęsto zabudowanych zasilanie to będzie silnie ograniczane w wyniku uszczelniania terenu. Z tego względu niezwykle ważne jest dbanie o ograniczanie powierzchni nieprzepuszczalnych, zapewnianie możliwości infiltracji wód opadowych do wód podziemnych.



Rys.103. Zasilanie wód podziemnych

5 Podsumowanie: najważniejsze zagrożenia klimatyczne dla Miasta Redy

5.1 Obserwowane zmiany warunków klimatycznych i klimatycznych

Analiza wieloletnich danych meteorologicznych (dane ze stacji hydrologiczno-meteorologicznej IMGW-PIB Lębork i Martwa Wisła) wykazała zmiany warunków klimatycznych charakterystycznych dla obszaru północnej Polski, w obrębie którego położone jest miasto Reda. Badania zmienności warunków termicznych, opadowych i anemometrycznych w omawianym obszarze pozwalają wskazać następujące tendencje w przebiegu zjawisk klimatycznych, które można odnieść do najbliższego otoczenia miasta:

- wyraźny dodatni trend zmian średniej rocznej temperatury powietrza,
- wyraźny wzrost średniej rocznej temperatury maksymalnej powietrza,
- wydłużenie okresów gorących i słaby wzrost liczby dni upalnych,

- nieznaczne zwiększenie się częstotliwości i natężenia fal upałów,
- wzrost w przebiegu wieloletnim średniej rocznej temperatury minimalnej powietrza,
- zmniejszenie występowania częstotliwości i natężenia i fal chłodu,
- zmniejszanie się liczby dni mroźnych i bardzo mroźnych,
- spadek liczby okresów przymrozkowych i liczby dni w tych okresach,
- spadek liczby dni, w których temperatura powietrza przechodzi przez punkt 0°C,
- tendencja spadkowa dni charakteryzujących się występowaniem opadu powyżej 1 mm i średniodobową temperaturą powietrza osiągającą wartość w przedziale od -5°C od +2,5°C,
- silny trend wzrostowy liczby dni wegetacyjnych,
- niewielka tendencja wzrostowa rocznych sum opadów,
- zwiększenie maksymalnych dobowych opadów w miesiącach letnich (okres od maja do sierpnia) i zwiększenie liczby dni z opadem deszczu w miesiącach zimowych
- zwiększenie liczby dni z opadem o większym natężeniu, tj. dobowych opadów ≥ 10 mm, dobowych opadów > 20 mm, dobowych opadów > 30 mm,
- tendencja spadkowa liczby dni bez opadu (opad < 1 mm) i liczby okresów bez opadu utrzymujących się ponad 5 dni,
- tendencja spadkowa częstości występowania i grubości pokrywy śnieżnej,
- zwiększenie liczby dni z silnym i bardzo silnym wiatrem,
- zwiększenie liczby dni z burzą w roku oraz niewielka tendencja spadkowa liczby dni z burzą w miesiącu lipcu, charakteryzującym się największą intensywnością zjawisk burzowych.

Analizę zjawisk hydrologicznych z wielolecia 1993-2023 przeprowadzono na podstawie danych ze stacji hydrologicznej Wejherowo. W wyniku wykonanej analizy danych stwierdzono:

- w zakresie niżówek – brak istotnej tendencji dotyczącej czasu trwania poszczególnych niżówek i czasu pomiędzy kolejnymi niżówkami, tendencję wzrostową deficytów niżówek oraz tendencję wzrostową liczby dni z niżówką w poszczególnych latach hydrologicznych,
- w zakresie wezbrań – wzrost liczby dni z wezbraniem, wzrostową tendencję objętości fal wezbraniowych i niewielką tendencję wzrostową liczby dni z wezbraniem.

5.2 Prognozowane zmiany klimatu miasta

Dla Redy przeprowadzono analizę zmian klimatu dla wartości średniorocznych oraz dla wartości miesięcznych w horyzoncie roku 2030 (jako średnia z dziesięciolecia 2026-2035) oraz 2050 (jako średnia z dziesięciolecia 2046-2055). Analizę przeprowadzono w oparciu o wiązkę wyników EuroCORDEX w rozdzielczości ok. 12,5 km. Celem uchwycenia niepewności wyników modelowania wynikającej z różnych możliwych scenariuszy emisyjnych i związanego z nimi tempa wzrostu zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze, analizy przeprowadzono dla dwóch scenariuszy, opisanych akronimami RCP 4.5 oraz RCP 8.5.

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że:

- W odniesieniu do zmian charakterystyk temperaturowych prognozowany jest wzrost temperatury średniorocznej. Prognozy średnich miesięcznych temperatur powietrza wskazują wzrost w każdym miesiącu. Szczególnie wyraźny wzrost wystąpi w miesiącach chłodnych. W odniesieniu do średnich

warunków termicznych bardziej znaczące zmiany w horyzoncie 2050 występują przeważnie dla scenariusza RCP 8.5.

- Do roku 2050 prognozowany jest znaczący wzrost liczby dni gorących, a także wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia okresu co najmniej 5 kolejnych dni z maksymalną temperaturą dobową przekraczającą 25°C. Wzrośnie także ilość dni z temperaturą minimalną > 20°C (nocy tropikalnych).
- Prognozowane jest osłabienie niekorzystnych zjawisk związanych z występowaniem niskich temperatur w okresie zimowym. Liczba dni mroźnych z temperaturą maksymalną poniżej 0°C (liczba dni mroźnych) oraz liczba dni z temperaturą minimalną poniżej -10°C (liczba dni bardzo mroźnych) ulegnie zmniejszeniu.
- Prognozowana liczba dni przymrozkowych w ciągu roku ulegnie zmniejszeniu, zmniejszy się także ilość okresów przymrozkowych długości przynajmniej 5 dni. Prognozowany jest spadek liczby dni z przejściem temperatury przez 0°C.
- Prognozowane jest zmniejszenie się wartości indeksu stopniodni dla temperatury średniodobowej < 18°C, co oznacza zmniejszone zapotrzebowaniem na energię w miesiącach zimowych.
- Prognozowane jest zwiększenie się liczby dni z temperaturą średniodobową > 5°C, co jest wskaźnikiem wydłużenia okresu wegetacyjnego niektórych roślin.
- Dla charakterystyk opadowych prognozowany jest wzrost zarówno ilości dni z opadem, jak i wysokości sumy rocznej opadu w horyzoncie do roku 2050. Prognozowany jest wzrost miesięcznej sumy opadu, szczególnie w okresie letnim.
- Prognozowany jest wyraźny spadek liczby dni z opadem przy temperaturze od -5°C do 2,5°C, które są wskaźnikiem dni, w których występuje gołoledź (wynika to ze zmian temperatury).
- Liczba dni z opadem ekstremalnym, powyżej 10 mm/d i wyższym, wzrośnie w analizowanym okresie.
- W kwestii zagrożenia suszą w horyzoncie roku 2050 prognozy nie wskazują na istotne zmiany. W przypadku liczby dni bez opadu i liczby okresów bez opadu dłuższych niż 5 dni wystąpi niewielki trend spadkowy.

5.3 Zagrożenia klimatyczne

Szczegółowa analiza danych klimatycznych i hydrologicznych z wielolecia umożliwiła ocenę ekspozycji miasta na zmiany klimatu przy uwzględnieniu wybranych wskaźników charakteryzujących zjawiska klimatyczne (Tab. 7). Wyniki oceny stanowią podstawę wskazania ekstremalnych zjawisk klimatycznych i ich pochodnych będących największym zagrożeniem dla mieszkańców i sektorów miasta.

Tab. 7. Ocena ekspozycji Miasta Redy na wybrane zjawiska klimatyczne i ich pochodne

Lp.	Zagrożenia klimatyczne	Ocena
1	2	3
1	Wysoka temperatura, w tym fale upałów	+++
2	Niska temperatura, w tym mróz	++
3	Przymrozki	++
4	Oblodzenie, gołoledź, szadź	++
5	Mgła	++
6	Intensywne opady deszczu i powodzie nagłe, podtopienia	+++
7	Ruchy masowe, osuwiska	+/ \pm
8	Intensywne opady śniegu, zamiecie i zawieje	++
9	Brak pokrywy śnieżnej	+++
10	Powodzie rzeczne	+++
12	Susza	+/ \pm
13	Silny wiatr	+++
14	Burze, grad, wyładowania atmosferyczne	+++

Skala ocen tendencji zmian wskaźników klimatycznych	
+++	Tendencja wzrostowa
++	Tendencja spadkowa
+/ \pm	Brak tendencji

Skala oceny zagrożenia klimatycznego dla miasta	
	Brak zagrożenia
	Zagrożenie słabe
	Zagrożenie silne

6 Literatura i wykorzystane materiały

1. AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014, [w:] <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
2. Bajkiewicz-Grabowska E., Mikulski Z., 1999, *Hydrologia ogólna*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
3. Bartnik A., Jokiel P. 2005. *Niektóre problemy zmian i zmienności rocznego hydrogramu przepływu rzecznoego na podstawie Pilicy w Przedborzu*. Wiadomości IMGW. T. 28. Z. 2 s. 5–31.
4. CMIP Phase 5 (CMIP5 protocol), [w:] <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>
5. Dębski K., 1970, *Hydrologia*. Dział Wydawnictw SGGW, Warszawa.
6. E-OBS dataset, [w:] <https://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php>
7. ERA5 dataset, [w:] <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
8. EURO-CORDEX, [w:] <http://www.euro-cordex.net>
9. Fal B., 2007, *Niżówki na górnej i środkowej Wiśle*. Gospodarka Wodna, nr 2/2007.
10. Global Warming of 1.5 °C, [w:] <https://www.ipcc.ch/sr15/>
11. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB, [w:] <http://www.imgw.pl/>
12. Kaznowska E., 2011, *Analysis of low flow characteristics and drought frequency in agricultural catchments*. [W:] Banasik K., Øygarden L., Hejduk L. (red.), *Prediction and Reduction of Diffuse*.
13. Kaznowska E., Hejduk A., Hejduk L. 2015. *Charakterystyka występowania wezbrań i niżówek w małej zlewni niziny mazowieckiej*. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 15. Z. 3 (51) s. 45–59.
14. Kundzewicz Z.W. 2008. *Hydrological extremes in the changing world*. Folia Geographica. Ser. Geographica Physica. Vol. 39 s. 37–52.
15. Ozga-Zielińska M., 1990, *Niżówki i wezbrania – ich definiowanie i modelowanie*. [W:] *Przegląd geofizyczny*, zeszyt 1-2.
16. Ozga-Zielińska M., Brzeziński J., 1997, *Hydrologia stosowana*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
17. Pakiet języka programowania R 'qmap', [w:], <https://cran.r-Portal Klimada 2.0>, [w:] <https://klimada2.ios.gov.pl/>
18. *Pollution, Solid Emission and Extreme Flows from Rural Areas – case study of small agricultural catchment*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
19. project.org/web/packages/qmap/qmap.pdf
20. RCP Database, [w:] <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>
21. Siwek G.T., 2016, *Analiza wyboru wartości przepływu granicznego wezbrań w zlewni górnego Wieprza*. [W:] *Annales Inversitatis Mariae Curie-Skłodowska*, vol. LXXI, z. 2, Lublin.
22. Tokarczyk T., 2010, *Niżówka jako wskaźnik suszy hydrologicznej*. Monografie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, IMGW, Warszawa.
23. Tomaszewski E., 2015, *Metody oceny dynamiki rozwoju i zaniku niżówek rzecznych*. [W:] *Monografie Komisji Hydrologicznej PTG: Nowoczesne metody i rozwiązania w hydrologii i gospodarce wodnej*, Tom 3
24. UERRA dataset, [w:] <http://www.uerra.eu/>
25. WCRP CORDEX, [w:] <https://www.cordex.org/>
26. Węglarczyk S., 2014, *Kryteria definicyjne niżówki i ich wpływ na własności charakterystyk niżówki. 1. Stacjonarność niżówek*. [W:] *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, nr II/1/2014. Polska Akademia Nauk, Kraków.
27. Zelenhasi E., Salvai A. 1987. *A method of streamflow drought analysis*. Water Resources Research, Vol. 23, No 1.

Spis rysunków

Rys.1.	Wieloletnia zmienność średniej rocznej dobowej temperatury powietrza, Reda, Lębork, Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo.....	8
Rys.2.	Przebieg roczny średniej miesięcznej temperatury powietrza, Gdańsk-Rębiechowo	9
Rys.3.	Przebieg średniej rocznej temperatury maksymalnej powietrza, Lębork, Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo.....	10
Rys.4.	Przebieg dobowej temperatury maksymalnej powietrza, Gdańsk-Rębiechowo	10
Rys.5.	Przebieg średniej temperatury minimalnej powietrza, Lębork, Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo.....	11
Rys.6.	Przebieg dobowej temperatury minimalnej powietrza, Gdańsk-Rębiechowo	11
Rys.7.	Liczba dni gorących ($T_{max}>25^{\circ}C$), Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo	12
Rys.8.	Okresy ponad 5 dniowe z $T_{max}>25^{\circ}C$, Gdańsk-Rębiechowo	13
Rys.9.	Liczba dni upalnych ($T_{max}>30^{\circ}C$), Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo	13
Rys.10.	Liczba i okres trwania fal upałów, Gdańsk-Rębiechowo	14
Rys.11.	Dni z temperaturą minimalną $>20^{\circ}C$, Gdańsk-Świbno, Gdańsk-Rębiechowo	15
Rys.12.	Liczba i okres trwania fal chłodu, Gdańsk-Rębiechowo	15
Rys.13.	Liczba dni mroźnych ($T_{max}<0^{\circ}C$), Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno.....	17
Rys.14.	Dni bardzo mroźne ($T_{max}<-10^{\circ}C$), Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno	18
Rys.15.	Dni z przejściem przez $0^{\circ}C$, Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno	18
Rys.16.	Dni przymrozkowe ($T_{min}<0^{\circ}C$), Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno	19
Rys.17.	Okresy przymrozkowe, Gdańsk-Rębiechowo	19
Rys.18.	Liczba dni w okresach przymrozkowych, Gdańsk-Rębiechowo	20
Rys.19.	Okres wegetacyjny, Gdańsk-Rębiechowo i Gdańsk-Świbno	21
Rys.20.	Dni z temperaturą od $+2,5^{\circ}C$ do $-5^{\circ}C$ i opadem, Gdańsk-Rębiechowo	21
Rys.21.	Przebieg wieloletni sum rocznych opadów atmosferycznych, Wejherowo, Gdańsk-Rębiechowo, Lębork.....	22
Rys.22.	Średnie miesięczne sumy opadów atmosferycznych, Wejherowo, Gdańsk-Rębiechowo	22
Rys.23.	Przebieg wieloletni maksymalnych dobowych opadów atmosferycznych w miesiącu, Wejherowo.....	23
Rys.24.	Liczba dni z opadem większym bądź równym 10 mm, Wejherowo, Gdańsk-Rębiechowo, Gdańsk-Świbno.....	24
Rys.25.	Liczba dni z opadem większym lub równym 20 mm, Wejherowo, Gdańsk-Rębiechowo, Gdańsk-Świbno.....	24
Rys.26.	Liczba dni z opadem większym niż 30 mm, Wejherowo, Gdańsk-Rębiechowo	25
Rys.27.	Liczba dni z opadem większym niż 40, 50, 60, 70, 80 mm, Wejherowo	25
Rys.28.	Liczba dni bez opadu, Wejherowo, Gdańsk-Rębiechowo, Gdańsk-Świbno	26
Rys.29.	Liczba okresów bez opadu, Wejherowo.....	26
Rys.30.	Sumaryczna długość okresów bez opadu, Wejherowo	27
Rys.31.	Najdłuższe okresy bezopadowe, Wejherowo	27
Rys.32.	Liczba dni z wiatrem o prędkości większej niż 10 m/s w wieloleciu 1991-2022, Lębork	28
Rys.33.	Liczba dni z burzą w wieloleciu 1991-2020, Lębork	28
Rys.34.	Średnia liczba dni z burzą w wieloleciu, Lębork	29
Rys.35.	Przebieg roczny dni z burzą, Lębork	29
Rys.36.	Liczba dni z burzą w lipcu, Lębork	30
Rys.37.	Liczba dni z pokrywą śnieżną w sezonach zimowych, Wejherowo, Lębork	30
Rys.38.	Grubość pokrywy śnieżnej w wieloleciu, Wejherowo, Lębork.....	31
Rys.39.	Domena obliczeniowa EuroCORDEX	32
Rys.40.	Różnice projekcji emisji CO ₂ (lewy panel) i prognozowanych stężeń CO ₂ (prawy panel) pomiędzy scenariuszami RCP. Obszar zacieniony odpowiada 98. i 90. percentylowi (jasny i ciemny szary) – dane z literatury	33

Rys.41.	Finalna projekcja temperatury średniej rocznej na podstawie scenariusza RCP 8.5	35
Rys.42.	Średnia roczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda	36
Rys.43.	HDD – stopniodni z temperaturą średnią dobową < 18°C, uśredniona dla obszaru miasta Reda	37
Rys.44.	Liczba dni wegetacyjnych ($T_{\text{śrd}} > 5^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	38
Rys.45.	Średnia miesięczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 4.5	39
Rys.46.	Średnia miesięczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 8.5	39
Rys.47.	Średnia miesięczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów 2010, 2030 oraz 2050; scenariusz RCP 4.5	40
Rys.48.	Średnia miesięczna temperatura powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów 2010, 2030 oraz 2050; scenariusz RCP 8.5	40
Rys.49.	Anomalia średniej miesięcznej temperatury powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 4.5	40
Rys.50.	Anomalia średniej miesięcznej temperatury powietrza, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 8.5	40
Rys.51.	Średnia roczna temperatura maksymalna, uśredniona dla obszaru miasta Reda	41
Rys.52.	Liczba dni upalnych ($T_{\text{max}} > 30^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	42
Rys.53.	Liczba fal upałów (co najmniej 3 dni z $T_{\text{max}} > 30^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	43
Rys.54.	Średnia długość trwania fal upałów, uśredniona dla obszaru miasta Reda	43
Rys.55.	Liczba dni gorących ($T_{\text{max}} > 25^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	44
Rys.56.	Liczba okresów długości co najmniej 5 dni z $T_{\text{max}} > 25^{\circ}\text{C}$, uśredniona dla obszaru miasta Reda	45
Rys.57.	Liczba nocy tropikalnych ($T_{\text{min}} > 20^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	45
Rys.58.	Średnia roczna temperatura minimalna, uśredniona dla obszaru miasta Reda	46
Rys.59.	Liczba dni przymrozkowych ($T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	47
Rys.60.	Liczba okresów przymrozkowych (co najmniej 5 dni z $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	48
Rys.61.	Liczba dni mroźnych ($T_{\text{max}} < 0^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	48
Rys.62.	Liczba dni bardzo mroźnych ($T_{\text{min}} < -10^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	49
Rys.63.	Liczba fal chłodu (co najmniej 3 dni z $T_{\text{min}} < -10^{\circ}\text{C}$), uśredniona dla obszaru miasta Reda	50
Rys.64.	Liczba dni z przejściem przez 0°C , uśredniona dla obszaru miasta Reda	50
Rys.65.	Roczna suma opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda	51
Rys.66.	Liczba dni z opadem dobowym wyższym od 1 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda ..	52
Rys.67.	Liczba dni z opadem przy temperaturze od -5°C do $2,5^{\circ}\text{C}$, uśredniona dla obszaru miasta Reda	52
Rys.68.	Suma miesięczna opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 4.5	53
Rys.69.	Suma miesięczna opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 8.5	54
Rys.70.	Suma miesięczna opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów: 2010, 2030 i 2050; scenariusz RCP 4.5	54
Rys.71.	Suma miesięczna opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów: 2010, 2030 i 2050; scenariusz RCP 8.5	54
Rys.72.	Anomalia sumy miesięcznej opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 4.5	55

Rys.73. Anomalia sumy miesięcznej opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 8.5	55
Rys.74. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 10 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda	56
Rys.75. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 20 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda	56
Rys.76. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 30 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda	57
Rys.77. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 40 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda	58
Rys.78. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 50 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda	59
Rys.79. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 60 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda	60
Rys.80. Liczba dni z opadem dobowym powyżej 70 mm, uśredniona dla obszaru miasta Reda	60
Rys.81. Maksymalny opad dobowy w miesiącu, uśredniony dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 4.5	61
Rys.82. Maksymalny opad dobowy w miesiącu, uśredniony dla obszaru miasta Reda, dla horyzontu roku 2010 – kolor niebieski, dla horyzontu roku 2030 – kolor zielony i dla horyzontu roku 2050 – kolor czerwony; scenariusz RCP 8.5	62
Rys.83. Maksymalny opad dobowy w miesiącu, uśredniony dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów: 2010, 2030 i 2050; scenariusz RCP 4.5	62
Rys.84. Maksymalny opad dobowy w miesiącu, uśredniony dla obszaru miasta Reda, dla horyzontów: 2010, 2030 i 2050; scenariusz RCP 8.5	62
Rys.85. Anomalia maksymalnego opadu dobowego, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 4.5	63
Rys.86. Anomalia maksymalnego opadu dobowego, uśredniona dla obszaru miasta Reda; scenariusz RCP 8.5	63
Rys.87. Liczba dni bez opadu, uśredniona dla obszaru miasta Reda	64
Rys.88. Liczba okresów bez opadu długości co najmniej 5 dni, uśredniona dla obszaru miasta Reda	64
Rys.89. Najdłuższy okres bez opadu, uśredniony dla obszaru miasta Reda	65
Rys.90. Zmienność charakterystyk rocznych przepływów wysokich (WQ), średnich (SQ) i niskich (NQ) – rz. Reda, profil Wejherowo	66
Rys.91. Deficyt niżówek w poszczególnych latach hydrologicznych (profil Wejherowo, rz. Reda) ..	70
Rys.92. Liczba dni z niżówką w poszczególnych latach hydrologicznych (profil Wejherowo, rz. Reda)	70
Rys.93. Odsetek dni z niżówkami przypadający na poszczególne miesiące (profil Wejherowo, rz. Reda, okres 1991-2022)	71
Rys.94. Liczba dni z niżówką w półroczach lat hydrologicznych (profil Wejherowo, rz. Reda)	71
Rys.95. Deficyt względny odpływu niżówkowego w poszczególnych latach hydrologicznych (profil Wejherowo, rz. Reda)	73
Rys.96. Objętość fal wezbraniowych w latach hydrologicznych (rz. Reda, profil Wejherowo)	75
Rys.97. Liczba dni z wezbraniem w latach hydrologicznych (rz. Reda, profil Wejherowo)	76
Rys.98. Występowanie wezbrań w poszczególnych miesiącach (rz. Reda, profil Wejherowo)	76
Rys.99. Prognozowane zmiany rocznych sum opadów	78
Rys.100. Prognozowana ilość wód roztopowych	78
Rys.101. Prognozowane zmiany ewapotranspiracji	79
Rys.102. Prognozowane zmiany spływu powierzchniowego	79
Rys.103. Zasilanie wód podziemnych	80

Spis tabel

Tab. 1.	Fale upałów w latach 1991- 2022, Gdańsk-Rębiechowo.....	14
Tab. 2.	Fale chłodu w sezonach 1991/1992-2021/2022, Gdańsk-Rębiechowo	16
Tab. 3.	Niżówki ogółem w okresie 1991-2022 w profilu Wejherowo, rz. Reda	68
Tab. 4.	Niżówki głębokie w okresie 1991-2022 w profilu Wejherowo, rz. Reda.....	69
Tab. 5.	Liczba niżówek o różnym czasie trwania (profil Wejherowo, rz. Reda, okres 1991-2022) ...	72
Tab. 6.	Zestawienie wezbrań wraz z ich charakterystykami (profil Wejherowo, rz. Reda).....	74
Tab. 7.	Ocena ekspozycji Miasta Redy na wybrane zjawiska klimatyczne i ich pochodne	83