



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

**MONITORING TŁA ZANIECZYSZCZENIA
ATMOSFERY W POLSCE DLA POTRZEB EMEP,
GAW/WMO I KOMISJI EUROPEJSKIEJ
RAPORT SYNTETYCZNY 2023**



Praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu
Ochrony Środowiska w ramach umowy
GIOŚ/ZP/3/2023/DMŚ/NFOŚiGW z dnia 12.01.2023 r.
i sfinansowana ze środków Narodowego Funduszu
Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Warszawa, 2024

Opracowano w Instytucie Ochrony Środowiska - Państwowym Instytucie Badawczym, na podstawie raportów rocznych za 2023 rok, przygotowanych w IOŚ – PIB i IMGW - PIB, wykonanych przez niżej wymienionych autorów:

Anna Degórska
Zdzisław Prządka
Krzysztof Skotak
Marcin Syrzycki

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Zintegrowanego Monitoringu Środowiska

Magdalena Bogucka

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy
Wydział Monitorowania Jakości Powietrza

Przy cytowaniu danych należy podawać źródło danych:

Państwowy Monitoring Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

Spis treści

1. Wstęp	1
2. Stacje monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce.....	1
3. Program pomiarowy.....	4
4. Warunki meteorologiczne w 2023 roku na tle wielolecia.....	9
5. Zanieczyszczenie powietrza w 2023 roku na tle wielolecia	13
5.1. Odniesienie wyników do poziomów dopuszczalnych i docelowych.....	13
5.2. Główne zanieczyszczenia powietrza	16
5.3. Dwutlenek węgla.....	24
5.4. Rtęć gazowa	25
5.5. Pył zawieszony.....	26
5.5.1. Stężenie pyłu zawieszonego.....	26
5.5.2. Metale ciężkie w pyłe zawieszonym PM10	28
5.5.3. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w pyłe zawieszonym PM10	30
5.5.4. Składniki w pyłe zawieszonym PM2,5	32
6. Zanieczyszczenie opadów atmosferycznych w 2023 roku na tle wielolecia	34
6.1. Odczyn wody opadowej	34
6.2. Stężenia i ładunki głównych jonów	39
6.3. Metale ciężkie w opadzie	53
6.4. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w opadzie	59
7. Depozycja zanieczyszczeń do podłoża w 2023 roku na tle wielolecia	61
8. Ocena trendów	71
8.1. Metoda analizy trendów	71
8.2. Trendy emisji.....	73
8.3. Trendy wyników pomiarów z lat 1994-2023	73
8.3.1. Związki siarki.....	73
8.3.2. Tlenowe związki azotu.....	74
8.3.3. Beztlenowe związki azotu	75
8.3.4. Kationy w opadach.....	76
8.3.5. Parametry fizyko-chemiczne w opadach	77
9. Sytuacja w Polsce na tle Europy	79
9.1. Zmiany emisji zanieczyszczeń powietrza	79
9.2. Udział transgranicznego transportu w depozycji wybranych zanieczyszczeń powietrza w Polsce	85
9.3. Wyniki pomiarów zanieczyszczeń powietrza i opadów na stacjach EMEP	88
9.3.1. Zanieczyszczenia powietrza.....	88
9.3.2. Zanieczyszczenia opadów.....	93
10. Podsumowanie wyników.....	97
Bibliografia.....	99

1. Wstęp

Program pomiarowy monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce jest wypełnieniem zobowiązań, jakie nakłada na nas *Konwencja w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości* oraz Protokół do tej Konwencji w sprawie finansowania EMEP (Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants in Europe, roboczo - European Monitoring and Evaluation Programme), którego celem jest dostarczanie informacji o stężeniach i strumieniach wybranych zanieczyszczeń docierających do podłoża. Zbierane w ramach tego programu wyniki badań zanieczyszczenia atmosfery są przekazywane i zasilają programy GAW/WMO (Global Atmosphere Watch/World Meteorological Organization) i HELCOM Komisji Helsińskiej oraz wykorzystywane są przez Regionalne Wydziały Monitoringu Środowiska do wspomagania oceny jakości powietrza w kraju oraz na potrzeby Komisji Europejskiej.

Raport syntetyczny 2023 został przygotowany w Instytucie Ochrony Środowiska Państwowym Instytucie Badawczym (IOŚ-PIB) na podstawie raportów rocznych IOŚ-PIB i Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB) za 2023 rok, wykonanych na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, finansowanych ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Wykorzystano również Sprawozdanie z badań jakości powietrza przeprowadzonych na stacji tła regionalnego Zielonka w roku 2023 opracowane w Centralnym Laboratorium Badawczym Oddział w Bydgoszczy.

W Raporcie przedstawiono wyniki pomiarów zanieczyszczenia atmosfery w roku 2023 na tle wyników z wielolecia 1994 – 2022 (lub krótszego okresu, w zależności od długości serii pomiarowej). Uzupełniono je oceną sytuacji w Polsce na tle Europy.

W opracowaniu wykorzystano wyniki badań prowadzonych na czterech polskich stacjach sieci EMEP i GAW/WMO oraz stacji stowarzyszonej z EMEP w ramach monitoringu realizowanego na potrzeby tych sieci oraz Komisji Europejskiej.

2. Stacje monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce

Sieć stacji EMEP i GAW/WMO obejmuje obecnie cztery stacje w Polsce:

- Stacje: *Jarczew* (od roku 1984), *Śnieżka* (od roku 1981) i *Łeba* (od roku 1993), gdzie pomiary prowadzone są przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - PIB;
- Stację Kompleksowego Monitoringu Środowiska *Puszcza Borecka* (Stacja Puszcza Borecka) z siedzibą w Diabłej Górze, gdzie pomiary prowadzone są przez Instytut Ochrony Środowiska - PIB na rzecz tych sieci od roku 1993.

W roku 2016 dołączyła do nich, jako stacja stowarzyszona z EMEP, stacja *Zielonka*, gdzie pomiary prowadzone są przez Centralne Laboratorium Badawcze Oddział w Bydgoszczy. Do bazy danych EMEP przekazano dane uzyskiwane od roku 2015.

Stacja w Diabłej Górze znajduje się na terenie województwa warmińsko-mazurskiego, stacja w Łebie na terenie województwa pomorskiego, stacja w Jarczewie na terenie województwa lubelskiego, stacja na Śnieżce na terenie województwa dolnośląskiego, a stacja w Zielonce na terenie województwa kujawsko-pomorskiego. Każda z tych stacji położona jest w

odmiennym geoekosystemie: Jarczew na terenie nizinnym rolniczym, Śnieżka to stacja w terenie wysokogórskim, Łeba położona jest w regionie nadmorskim, Puszcza Borecka i Zielonka na terenach pojezierzy.

Położenie stacji na mapie Polski pokazano na rysunku 2.1, natomiast podstawowe informacje o nich zaprezentowano w tabeli 2.1.



Rys. 2.1. Lokalizacja stacji monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce

Tab. 2.1. Charakterystyka stacji monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce, pracujących w sieci EMEP

Stacja	ϕ	λ	Wysokość n.p.m. [m]	Położenie stacji	Instytucja prowadząca pomiary	Początek realizacji programu BAPMON/GAW	Początek realizacji programu EMEP	Kod stacji opadowej GAW/WMO	Indeks WDCGG	Symbol EMEP
Jarczew	51°48'51,87" N	21°58'20,71" E	180	region środkowowschodni; nizinny, rolniczy	IMGW-PIB	01.01.1984	01.10.1985	PL4500101Q08	JCZ651N00	PL02
Śnieżka	50°44'11,07" N	15°44'23,70" E	1603	region południowo- zachodni; wysokogórski (park narodowy)	IMGW-PIB	01.01.1981	01.01.1991	PL5000101Q08	SNZ650N00	PL03
Łeba	54°45'14,02" N	17°32'03,35" E	2	region nadmorski (park narodowy)	IMGW-PIB	01.01.1993	01.01.1993	PL4000101Q08	LEB654N00	PL04
Puszcza Borecka	54°07'29,52" N	22°02'17,08" E	153	region północno- wschodni; pojezierze	IOŚ-PIB	01.01.1993	01.07.1992	PL5500101Q08	DIG654N00	PL05
Zielonka*	53°39'00,00" N	17 ° 55'59,90" E	121	region północny; pojezierze; leśny	CLB Oddział Bydgoszcz	-	01.01.2015*	-	-	PL09

*stacja stowarzyszona z EMEP; pierwsza seria danych przekazanych do bazy danych EMEP pochodzi z roku 2015

Oznaczenia symboli:

BAPMON/GAW – Background Air Pollution Monitoring Network/Global Atmosphere Watch

EMEP – Co-Operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants in Europe

GAW/WMO - Global Atmosphere Watch/World Meteorological Organization

WDCGG - World Data Centre for Greenhouse Gases

3. Program pomiarowy

Wykonywany na czterech stacjach w 2023 roku program pomiarów zanieczyszczenia atmosfery był zgodny z poziomem 1 EMEP. Na stacji Puszcza Borecka realizowano dodatkowo wybrane elementy poziomu 2. Stacja Zielonka została stowarzyszona z EMEP jako realizująca elementy poziomu 2. Jednocześnie na czterech stacjach prowadzony był program regionalnych stacji GAW/WMO. Ponadto na stacji nadmorskiej w Łebie, oprócz wyżej wymienionych, realizowany był program BMP/HELCOM (Międzynarodowy Program Monitoringu Bałtyku dla potrzeb Komisji Helsińskiej). Wszystkie omawiane stacje realizowały zadania wskazane w Programie Państwowego Monitoringu Środowiska, a dane zostały też wykorzystane dla potrzeb Komisji Europejskiej.

W 2023 r. we wszystkich rejonach badań (poza Zielonką) program obejmował pomiary gazowych zanieczyszczeń powietrza, aerozoli oraz sum związków gazowych i aerozoli, jak również pomiar składu chemicznego opadów atmosferycznych. Program pomiarowy na stacji Puszcza Borecka obejmował w 2023 roku dodatkowo pył zawieszony PM₁₀ oraz zawarte w nim metale ciężkie i wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne jak również pył zawieszony PM_{2,5} oraz zawarte w nim wybrane jony, węgiel elementarny i węgiel organiczny. Na stacji tej badano również wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w opadzie całkowitym. W Łebie i Puszczy Boreckiej mierzono także zawartość metali ciężkich w opadach atmosferycznych. Elementy programu pomiarowego stacji Zielonka, które realizowano na potrzeby EMEP, to badania pyłu zawieszonego PM₁₀ i zawartych w nim metali ciężkich i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych oraz pyłu zawieszonego PM_{2,5}, zawartych w nim jonów i węgla.

Nowe elementy programu zostały wprowadzone na stacji Puszcza Borecka oraz na stacji Zielonka zgodnie z wymaganiami *Dyrektywy 2008/50/WE w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy* [Dyrektywa 2008/50/WE...] oraz *Dyrektywy 2004/107/WE w sprawie arsenu, kadmu, rtęci, niklu i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w otaczającym powietrzu* [Dyrektywa 2004/107/WE...], przetransponowanych do polskiego prawa [Ustawa *Prawo ochrony środowiska* i jej rozporządzenia wykonawcze].

Stosowane były w większości manualne metody pobierania próbek do oznaczeń laboratoryjnych, za wyjątkiem ozonu i dwutlenku węgla, których stężenie mierzone było przy użyciu automatycznych analizatorów. Od roku 2017 na stacji Puszcza Borecka także stężenie dwutlenku siarki i tlenków azotu, a od 2020 również rtęci gazowej mierzono automatycznymi analizatorami.

Analizy próbek pobranych na stacjach wykonywane były częściowo na stacjach, a częściowo w wymienionych laboratoriach:

- Centralnym Laboratorium Analiz Środowiskowych Cent-Lab IOŚ-PIB w Warszawie,
- Laboratorium Instytutu Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrze,
- Laboratorium w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie,
- Centralnym Laboratorium Badawczym GIOŚ Oddział w Warszawie, w dwóch siedzibach: w Warszawie i w Radomiu,
- laboratorium Wydziału Monitorowania Jakości Powietrza IMGW-PIB w Warszawie,
- laboratorium Zakładu Oceanografii i Monitoringu Bałtyku IMGW-PIB w Gdyni,

- laboratorium Wysokogórskiego Obserwatorium Meteorologicznego im. Tadeusza Hołdysa na Śnieżce,
- Centralnym Laboratorium Badawczym Oddział w Bydgoszczy, we Wrocławiu i w Łodzi,
- Centralnym Laboratorium Badawczym Oddział we Wrocławiu, Pracownia w Jeleniej Górze.

Pobieranie próbek zanieczyszczeń gazowych i aerozolu metodami manualnymi oraz opadów atmosferycznych dokonywane było w tzw. dobach opadowych, czyli wymiana filtrów, na które pobierane były zanieczyszczenia powietrza i pojemników na próbki w kolektorach opadów odbywały się o godzinie 6:00 UTC (tzn. o 8:00 w okresie obowiązywania w Polsce urzędowego czasu letniego i o 7:00 czasu zimowego). Pomiary stężenia ozonu, a na stacji Puszcza Borecka także dwutlenku siarki, tlenków azotu (od 2017 r.), dwutlenku węgla i rtęci gazowej (od 2020 r.) prowadzone były przy użyciu automatycznych analizatorów w sposób ciągły. W przypadku pyłu (Puszcza Borecka i Zielonka), doba ekspozycji filtrów obejmowała okres od godziny 00:00 do 00:00 CET. Próbkę dobową opadów atmosferycznych na oznaczanie głównych jonów pobierane były także w tzw. dobach opadowych - od 6:00 do 6:00 UTC dnia następnego. Do oznaczania stężenia metali ciężkich i WWA w opadach pobierano próbki tygodniowe zlewane/uśredniane do miesięcznych (Puszcza Borecka) oraz dwutygodniowe zlewane do miesięcznych (Łeba – bez WWA).

Jakość pracy laboratoriów podlega stałej kontroli ze strony programów międzynarodowych. Raz do roku laboratoria IMGW-PIB w Warszawie i w Gdyni oraz laboratorium i stacja IOŚ-PIB biorą udział w międzylaboratoryjnych badaniach porównawczych oznaczania zanieczyszczeń w powietrzu i w opadach atmosferycznych, organizowanych przez Chemiczne Centrum Koordynacyjne EMEP (EMEP/CCC/NILU). Dwukrotnie w ciągu roku laboratoria IMGW-PIB w Warszawie i na Śnieżce oraz laboratorium i stacja IOŚ-PIB uczestniczą w międzylaboratoryjnych badaniach porównawczych oznaczania składników opadu atmosferycznego Amerykańskiego Centrum ds. Zapewnienia Jakości (QA/SAC Americas na rzecz programu GAW/WMO). Ponadto raz w roku odbywa się wzorcowanie kalibratorów ozonu, wykorzystywanych do sprawdzania analizatorów pracujących na polskich stacjach, w Czeskim Instytucie Hydrologiczno-Meteorologicznym w Pradze zgodnie ze standardem atestowanym przez National Bureau of Standards, USA. Analizatory ozonu ze stacji prowadzonych przez IOŚ-PIB i IMGW-PIB, a także analizatory SO₂ i NO_x oraz poborniki pyłu ze stacji IOŚ-PIB biorą udział w badaniach porównawczych organizowanych przez Krajowe Laboratorium Referencyjne ds. jakości powietrza atmosferycznego GIOŚ w Krakowie.

Stacja Kompleksowego Monitoringu Środowiska Puszcza Borecka posiada akredytację Polskiego Centrum Akredytacji (nr AB 337) na pobieranie próbek zanieczyszczeń powietrza, pomiar stężenia ozonu i pobieranie próbek opadów atmosferycznych oraz na oznaczanie w próbkach opadów przewodności elektrolitycznej i pH. Centralne Laboratorium Analiz Środowiskowych CentLab IOŚ-PIB posiada akredytację PCA (nr AB 336), ale została ona zawieszona na wniosek laboratorium ze względu na konieczność rewalidacji metod pomiarowych po zmianie siedziby laboratorium.

Oddział w Bydgoszczy Centralnego Laboratorium Badawczego posiada akredytację Polskiego Centrum Akredytacji (nr AB 201) na oznaczanie WWA w pyłe PM₁₀.

W tabelach 3.1, 3.2 i 3.3 przedstawiono szczegółowo program pomiarowy realizowany na omawianych stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce oraz metody

poboru i oznaczania substancji stosowane na stacjach instytucji uczestniczących w tych pomiarach.

Tabela 3.1. Metody pomiarowe stosowane na stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery (EMEP) w Polsce w 2023 roku. Powietrze

Substancja	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - PIB		Instytut Ochrony Środowiska - PIB	
	metoda poboru	metoda oznaczania	metoda poboru	metoda oznaczania
POWIETRZE				
SO ₂	filtr Whatman-40 impregnowany KOH	thorinowa	analizator Thermo Scientific 439i	fluorescencja UV
NO ₂	roztwór absorbujący TGS: trójetanoloamina + gwajakol+ Na ₂ S ₂ O ₅	NEDA Griess-Ylosway	analizator Thermo Scientific 42i	chemiluminescencja
NO _x			analizator Thermo Scientific 42i	chemiluminescencja
NO			analizator Thermo Scientific 42i	chemiluminescencja
O ₃	analizator Thermo Scientific 49i	absorpcja UV	analizator Thermo Scientific 49i	absorpcja UV
CO ₂			analizator Thermo Scientific 410i	absorpcja promieniowania podczerwonego
Hg			analizator Lumex RA-915AM	Zeeman AAS
SO ₄ ²⁻	filtr Whatman-40	thorinowa	filtr teflonowy	chromatografia jonowa
NO ₃ ⁻	filtr Whatman-40	redukcja hydrazyną		
NH ₄ ⁺	filtr Whatman-40	gwajakol - chloramina T		
Cl ⁻	filtr Whatman-40	rodanek rtęci - żelazo		
(HNO ₃ + NO ₃ ⁻)	filtr Whatman-40 impregnowany NaF	redukcja hydrazyną	HNO ₃ - filtr Whatman 40 impregnowany KOH NO ₃ ⁻ - filtr teflonowy	chromatografia jonowa
(NH ₃ + NH ₄ ⁺)	filtr Whatman-40 impregnowany H ₂ C ₂ O ₄	gwajakol - chloramina T	NH ₃ - filtr Whatman 40 impregnowany H ₂ C ₂ O ₄ , NH ₄ ⁺ - filtr teflonowy	spektrofotometria

Tabela 3.2. Metody pomiarowe stosowane na stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery (EMEP) w Polsce w 2023 roku. Pył zawieszony

Substancja	Instytut Ochrony Środowiska – PIB, Oddział CLB w Warszawie i Radomiu		Oddział CLB w Bydgoszczy, Wrocławiu i Łodzi	
	metoda poboru	metoda oznaczania	metoda poboru	metoda oznaczania
pył zawieszony PM10	pobornik wysokoobjętościowy HVS, filtr kwarcowy	wagowa	pobornik wysokoobjętościowy HVS, filtr kwarcowy	wagowa
As w PM10		ICP-MS		ICP-MS
Cd w PM10		ICP-MS		ICP-MS
Ni w PM10		ICP-MS		ICP-MS
Pb w PM10		ICP-MS		ICP-MS
benzo(a)piren w PM10	pobornik wysokoobjętościowy HVS, filtr kwarcowy	HPLC	pobornik wysokoobjętościowy HVS, filtr kwarcowy	HPLC
benzo(a)antracen w PM10		HPLC		HPLC
benzo(b)fluoranten w PM10		HPLC		HPLC
benzo(j)fluoranten w PM10		HPLC		HPLC
benzo(k)fluoranten w PM10		HPLC		HPLC
dibenzo(a,h)antracen w PM10		HPLC		HPLC
indeno(1,2,3-cd)piren w PM10		HPLC		HPLC
pył zawieszony PM2,5	pobornik wysokoobjętościowy HVS, filtr kwarcowy	wagowa	pobornik wysokoobjętościowy HVS, filtr kwarcowy	wagowa
SO₄²⁻ w PM2,5		IC		IC
NO₃⁻ w PM2,5		IC		IC
Cl⁻ w PM2,5		IC		IC
NH₄⁺ w w PM2,5		IC		IC
Na⁺ w PM2,5		ICP-AES		FAAS
K⁺ w PM2,5		ICP-AES		FAAS
Ca²⁺ w PM2,5		ICP-AES		FAAS
Mg²⁺ w PM2,5		ICP-AES		FAAS
węgiel elementarny EC w PM2,5		termooptyczna		termooptyczna
węgiel organiczny OC w PM2,5		termooptyczna		termooptyczna

ICP-AES – plazmowa spektrometria atomowa emisyjna

ICP-MS - spektrometria masowa z plazmą wzbudzaną indukcyjnie

IC – chromatografia jonowa

HPLC- wysokosprawna chromatografia cieczowa

Tabela 3.3. Metody pomiarowe stosowane na stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery (EMEP) w Polsce w 2023 roku. Opady

Substancja	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - PIB		Instytut Ochrony Środowiska - PIB	
	metoda poboru	metoda oznaczania	metoda poboru	metoda oznaczania
pH	kolektor opadu całkowitego, próbka dobową	elektrometria	kolektor opadu mokrego, próbka dobową	elektrometria
przew.elekt.		elektrometria		elektrometria
SO ₄ ²⁻		chromatografia jonowa*		chromatografia jonowa
NO ₃ ⁻		chromatografia jonowa**		chromatografia jonowa
NH ₄ ⁺		spektrofotometria		spektrofotometria
Cl ⁻		chromatografia jonowa***		chromatografia jonowa
Na ⁺		FAAS		ICP-AES
K ⁺		FAAS		ICP-AES
Ca ²⁺		FAAS		ICP-AES
Mg ²⁺		FAAS		ICP-AES
Cd	kolektor opadu mokrego, próbka miesięczna zlewana z dwutygodniowych (łeba)	GF-AAS	kolektor opadu całkowitego, próbka miesięczna zlewana z tygodniowych	ICP-MS
Cu		GF-AAS		ICP-MS
Cr		GF-AAS		ICP-MS
Ni		GF-AAS		ICP-MS
Pb		GF-AAS		ICP-MS
Zn		FAAS		ICP-MS
As				ICP-MS
Hg			kolektor opadu całkowitego, próbka tygodniowa	CV-AFS
benzo(a)piren			kolektor opadu całkowitego, próbka miesięczna zlewana z tygodniowych	HPLC
benzo(a)antracen				HPLC
benzo(b)fluoranten				HPLC
benzo(j)fluoranten				HPLC
benzo(k)fluoranten				HPLC
dibenzo(a,h)antracen				HPLC
indeno(1,2,3-cd)piren				HPLC
wysokość opadu	deszczomierz Hellmana	Instrukcja dla posterunków meteorologicznych	deszczomierz Hellmana	Instrukcja dla posterunków meteorologicznych

*) Śnieżka: spektrofotometria (thorinowa)

**) Śnieżka: spektrofotometria (redukcja hydrazyną)

***) Śnieżka: spektrofotometria (rodanek rtęci - żelazo)

FAAS - płomieniowa spektrometria atomowa emisyjna

ICP-AES – plazmowa spektrometria atomowa emisyjna

ICP-MS - spektrometria masowa z plazmą wzbudzaną indukcyjnie

GF-AAS - spektrometria atomowa z kuwetą grafitową

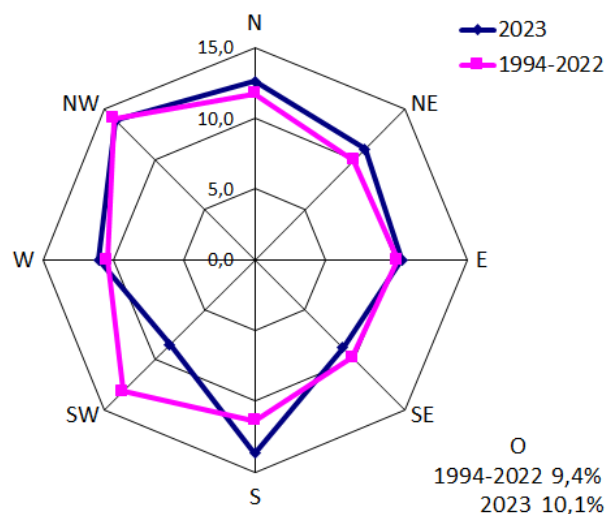
CV-AFS – fluorescencja atomowa

HPLC- wysokosprawna chromatografia cieczowa

4. Warunki meteorologiczne w 2023 roku na tle wielolecia

Warunki meteorologiczne scharakteryzowano na podstawie danych meteorologicznych uzyskanych z materiałów Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW-PIB [Bogucka 2024]. Wykorzystano również informacje o kierunkach napływu mas powietrza nad obszar Polski i dobowym typie cyrkulacji, opracowanych w IMGW-PIB na podstawie klasyfikacji typów cyrkulacji wg J. Lityńskiego [Lityński 1969, Pawłowska i in. 2000]. Do interpretacji stanu zanieczyszczenia atmosfery na Stacji Puszcza Borecka w roku 2023 posłużono się wybranymi elementami meteorologicznymi, mierzonymi na Stacji w ramach programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego.

Rozkład częstości kierunków napływu mas powietrza w Polsce w 2023 roku na tle wartości uśrednionych dla wielolecia 1994-2022 przedstawia rysunek 4.1. W 2023 roku przeważały dni z napływem powietrza z sektora północnego, obejmując 37,5% czasu w roku. Dominował napływ z kierunku północno-zachodniego (13,9% przypadków), a następnie z południa (13,7% przypadków) i północy (12,6%). Najmniejszą frekwencję obserwowano dla południowo zachodniego kierunku napływu mas powietrza (8,5%). Obraz ten nieznacznie odbiega od uśrednionego dla wielolecia 1994-2022, w którym dominował napływ mas powietrza z sektora zachodniego (kierunki SW, W i NW - w sumie 37,7% przypadków) z największym udziałem kierunków północno-zachodniego i południowo-zachodniego (odpowiednio 14,1% i 13,2% dni w roku). Zaznaczyło się wyraźnie większe znaczenie kierunku południowego, a mniejsze południowo-zachodniego w roku 2023 niż w wieloleciu 1994-2022. Najrzadziej w wieloleciu powietrze napływało nad Polskę z sektora wschodniego (kierunki NE, E i SE – w sumie 29,8% czasu).



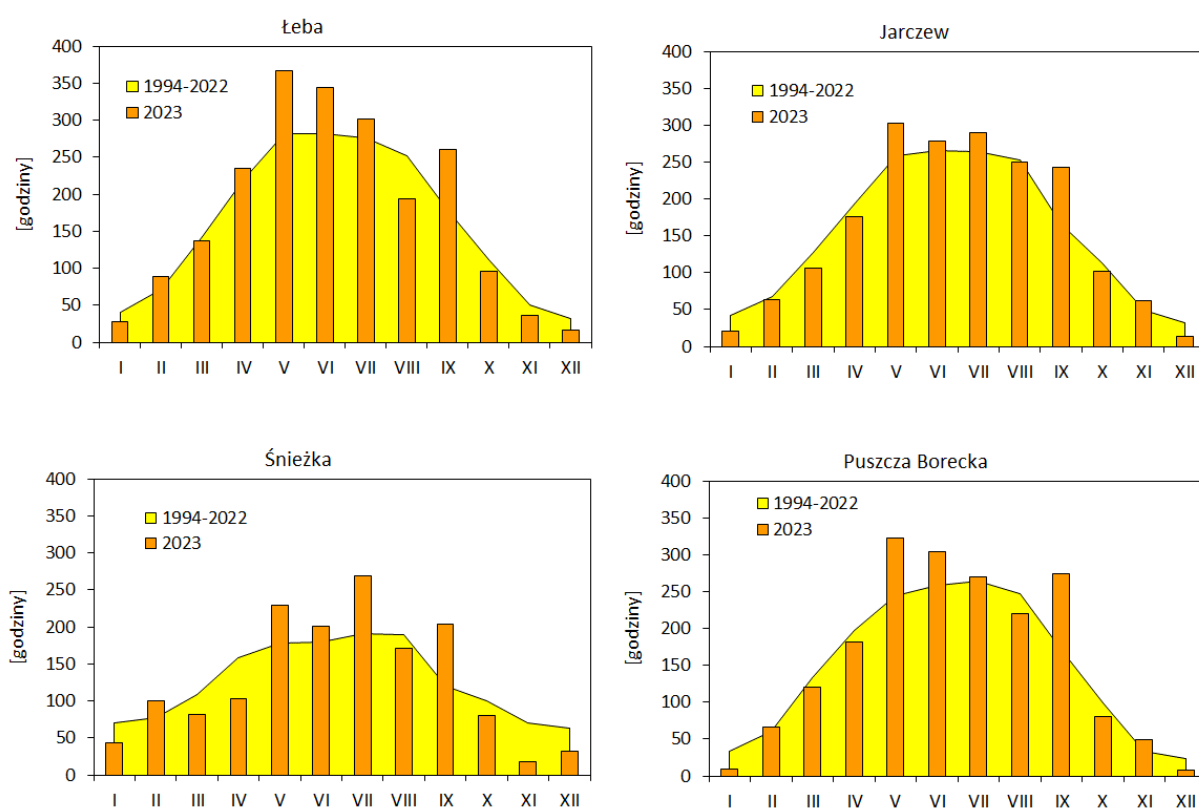
Rys. 4.1. Rozkład częstości kierunków cyrkulacji atmosferycznej¹ w Polsce w 2023 roku na tle wartości średnich z wielolecia 1994-2022. Źródło danych: IMGW-PIB

Roczna suma usłonecznienia w 2023 roku wyniosła od 1531 godzin na Śnieżce do 2102 godzin w Łebie. Na wszystkich stacjach sumy usłonecznienia były większe od średnich wieloletnich

¹ Kierunek napływu mas powietrza oceniano na podstawie dobowych typów cyrkulacji wg J. Lityńskiego (1969)

(1994-2022), a różnice względne wyniosły od 1,9% na Śnieżce, przez 4,3% w Jarczewie po 8% w Puszczy Boreckiej i 8,5% w Łebie.

Rozkład usłonecznienia w skali roku przedstawiono na rysunku 4.2. W 2023 roku najwięcej godzin ze słońcem odnotowano na stacjach nizinnych w maju, a na stacji górskiej w lipcu. Na kolejnych miejscach znajdowały się: czerwiec, lipiec i wrzesień na nizinach oraz maj, czerwiec i wrzesień w górach. We wszystkich przypadkach w okresie maj-wrzesień, ale z wyłączeniem sierpnia, były to wartości wyższe od średnich wieloletnich. Na wszystkich stacjach niższe od średnich w wieloleciu lub zbliżone wartości usłonecznienia odnotowano w styczniu, sierpniu, październiku i grudniu, na Śnieżce także w marcu, kwietniu i listopadzie. Największe wzrosty w stosunku do wartości średnich odnotowano wszędzie w maju i wrześniu, a na Śnieżce także w lipcu. Najmniejsze usłonecznienie miało miejsce w styczniu i grudniu, a na Śnieżce przede wszystkim w listopadzie, przy czym wartości były niższe od średnich z wielolecia 1994-2022.

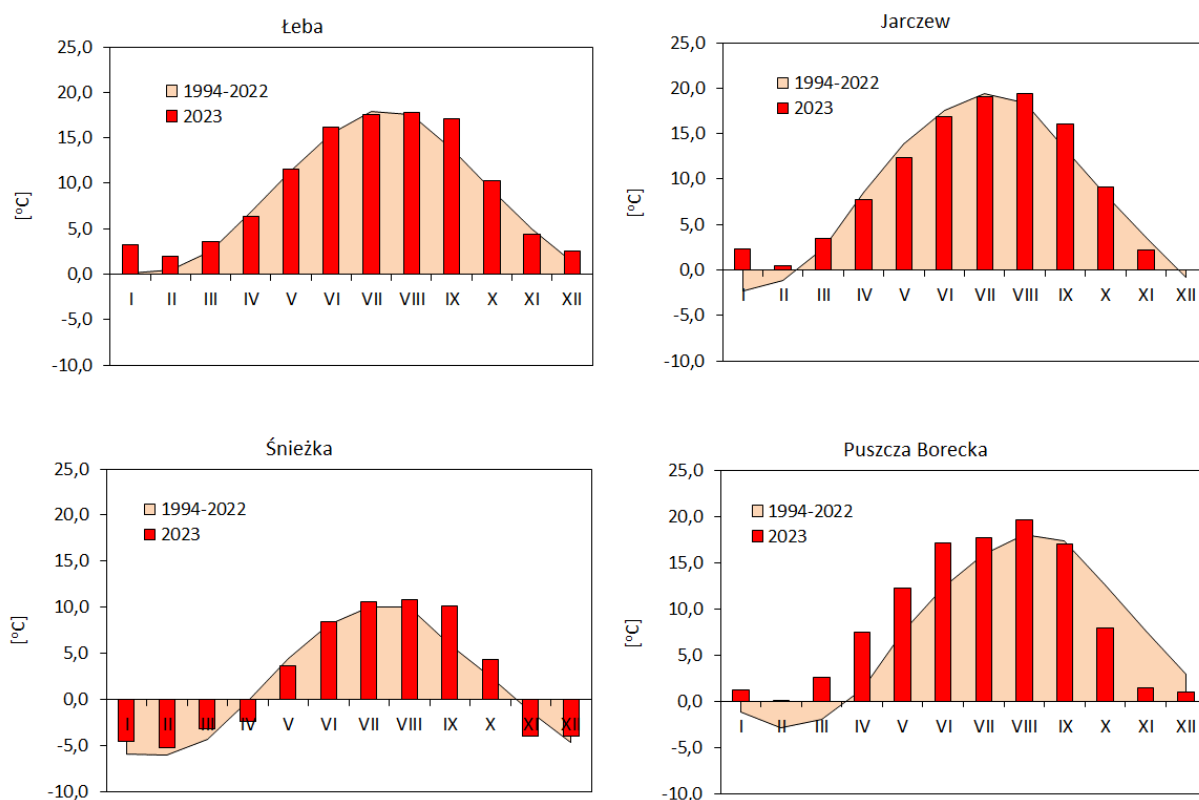


Rys. 4.2. Przebieg roczny miesięcznych sum usłonecznienia na stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w 2023 roku na tle przebiegu średniego wieloletniego. Źródło danych: IMGW-PIB i PMŚ

Według klasyfikacji termicznej H. Lorenc [Lorenc i in., 1995, Lorenc, 2000], rok 2023 na tle średniej dla klimatologicznego okresu normalnego 1991-2020 został sklasyfikowany w Polsce środkowo-wschodniej (Jarczew) i w rejonie wysokogórskim (Śnieżka) jako lekko ciepły, w rejonie nadmorskim jako ciepły (Łeba), a w Polsce północno-wschodniej (Puszcza Borecka) jako ekstremalnie ciepły. Średnia roczna temperatura na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w 2023 roku wyniosła od 2,0°C na Śnieżce, przez 8,7°C w Puszczy Boreckiej, 9,1°C w Jarczewie do 9,4°C w Łebie. W porównaniu do średniej z wielolecia 1994-2022, rok 2023 był

cieplejszy w rejonach wszystkich stacji. Różnice wyniosły: 0,5°C na Śnieżce, 0,7°C w Jarczewie, 0,9°C w Łębie i 1,3°C w Puszczy Boreckiej.

Roczny przebieg średnich miesięcznych wartości temperatury był zbliżony do przebiegu wieloletniego 1994-2022, chociaż w większości miesięcy notowano wartości różne od średniej (Rys. 4.3). Temperaturę wyższą lub równą średniej wieloletniej notowano w Łębie i na Śnieżce w ciągu 9 miesięcy, w Puszczy Boreckiej – 8, a w Jarczewie w ciągu 7 miesięcy. Chłodniejszy niż średnio w wieloleciu były wszędzie listopad, kwiecień na wszystkich stacjach oprócz Puszczy Boreckiej, lipiec w Łębie i Jarczewie, maj i czerwiec w Jarczewie, maj na Śnieżce oraz wrzesień, październik, listopad i grudzień w Puszczy Boreckiej. Najcieplejszym miesiącem roku na wszystkich stacjach był sierpień, przy czym średnia miesięczna temperatura w tym miesiącu była na wszystkich stacjach - poza Puszczą Borecką - wyższa od średniej z wielolecia 1994-2022. Najchłodniejsze były luty, grudzień i styczeń, ale ujemne średnie temperatury odnotowano tylko na Śnieżce. Ujemne wartości średnie miesięczne odnotowano na Śnieżce także w marcu, kwietniu i listopadzie. Tym samym na tej stacji odnotowano 6 miesięcy ze średnią temperaturą poniżej zera, a najchłodniejsze były luty i styczeń. W miesiącach zimowych zaobserwowano na ogół wartości wyższe od średnich w wieloleciu (poza listopadem). Na żadnej stacji nizinnej nie notowano ujemnych wartości średnich miesięcznych temperatury.



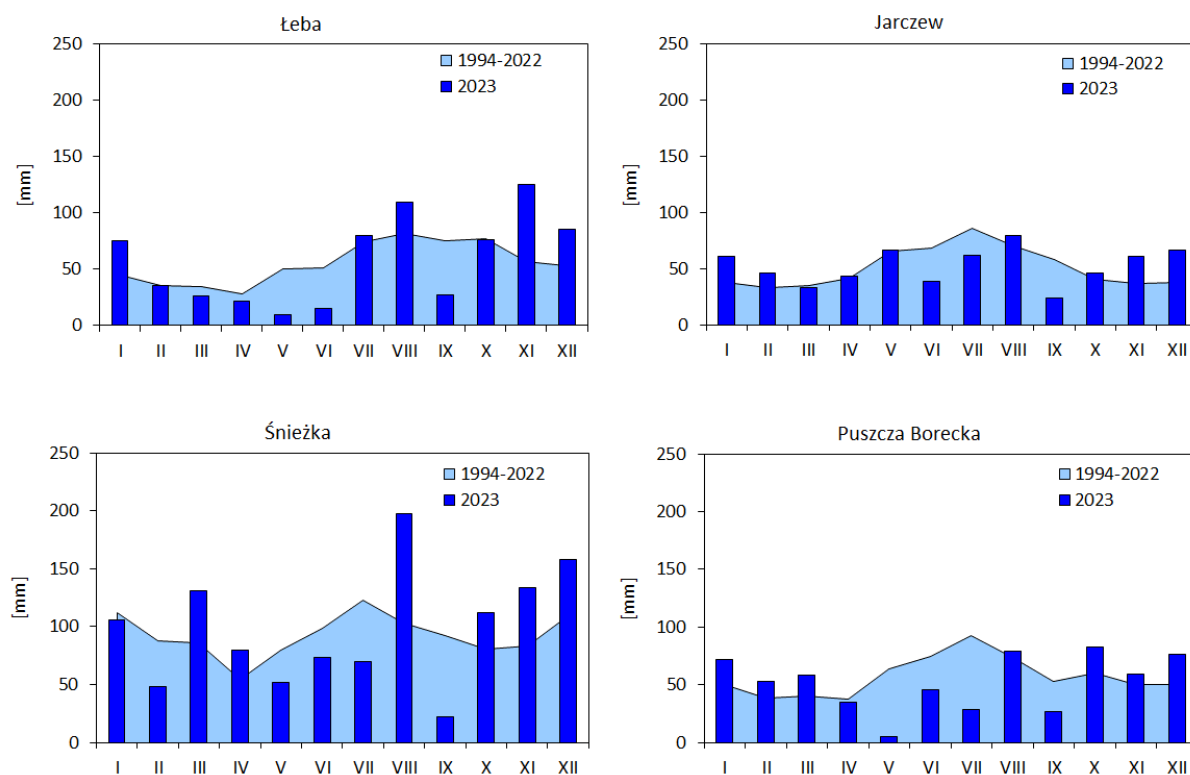
Rys. 4.3. Przebieg roczny miesięcznych wartości temperatury powietrza na stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w 2023 roku na tle przebiegu średniego wieloletniego. Źródło danych: IMGW-PIB i PMŚ

Roczne sumy opadów atmosferycznych w 2023 roku wyniosły od 619,7 mm w Puszczy Boreckiej, przez 624,9 mm w Jarczewie i 685,6 mm w Łębie do 1180,9 mm na Śnieżce. W stosunku do wartości średnich z wielolecia 1994-2022 były to wyższe sumy opadów na trzech stacjach, a niższą wartość odnotowano w Puszczy Boreckiej. Względne różnice

między sumami opadów w 2023 roku i w wieloleciu osiągnęły od -9,1% w Puszczy Boreckiej, przez 2,7% w Jarczewie i 3,8% w Łębie do 6,5% na Śnieżce.

Według klasyfikacji Z. Kaczorowskiej (Kaczorowska 1962) rok 2023 sklasyfikowano jako normalny. We wszystkich regionach badań rok został oceniony jako normalny, choć w skali kraju charakterystyki były bardzo zróżnicowane: na przeważającym obszarze kraju normalny, lokalnie w północnej i południowej części kraju suchy, a w zachodniej, a także w przeważającej części południowej i południowo-wschodniej kraju wilgotny, a w części Wielkopolski i na Ziemi Lubuskiej oraz miejscami na południu nawet bardzo wilgotny [Bogucka, 2024].

W 2023 roku sumy opadów wykazywały znaczną zmienność z miesiąca na miesiąc (Rys. 4.4). Najwyższe sumy wystąpiły w Jarczewie i na Śnieżce w sierpniu, w Puszczy Boreckiej – w październiku, a w Łębie – w listopadzie. W wieloleciu na ogół najwyższe średnie miesięczne sumy opadów przypadały na lipiec, jedynie w Łębie na sierpień. Najmniej opadów na stacjach w rejonie wysokogórskim i w środkowo-wschodnim spadło w 2023 roku we wrześniu (niewiele ponad 20 mm), a na stacjach w Polsce północnej i północno-wschodniej – w maju (poniżej 10 mm).



Rys. 4.4. Przebieg roczny miesięcznych sum opadów atmosferycznych na stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w 2023 roku na tle przebiegu średniego wieloletniego. Źródło danych: IMGW-PIB i PMŚ

Na stacjach nizinnych w wieloleciu 1994-2022 obserwowano przewagę opadów w ciepłej połowie roku nad opadami w chłodnej połowie roku, a na Śnieżce odwrotnie – opady zimowe były większe niż letnie. W 2023 roku przewaga opadów w chłodnej połowie roku wystąpiła na wszystkich stacjach, przy czym opady w chłodnej połowie roku stanowiły od 58% sumy rocznej na Śnieżce do 62 i 65% odpowiednio w Łębie i w Puszczy Boreckiej. Jedynie w Jarczewie różnica

sum opadów w obu sezonach była bardzo niewielka (niewiele ponad 1%), ale z przewagą opadów zimowych.

Najwyższe sumy opadów i największa liczba dni z opadem związane były z napływem mas powietrza z kierunku północno-zachodniego. Opady z kierunku NW stanowiły 14-22% rocznej sumy opadu i 11-22% rocznej liczby dni z opadem [Bogucka, 2024], [Degórska i in., 2024].

5. Zanieczyszczenie powietrza w 2023 roku na tle wielolecia

W Raporcie przedstawiono wyniki pomiarów stężenia zanieczyszczeń powietrza na stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce (pracujących w sieci EMEP) w roku 2023 w odniesieniu do okresu 1994–2022 (za wyjątkiem tych zanieczyszczeń, dla których serie pomiarowe są krótsze). Stężenia poszczególnych zanieczyszczeń podane zostały jako wartości średnie (arytmetyczne w przypadku zanieczyszczeń powietrza i depozycji, a ważone w przypadkach stężeń zanieczyszczeń i parametrów w opadach) roczne i średnia z okresu 1994-2022 (lub krótszego, w zależności od długości serii pomiarowej). W przypadku stacji Zielonka przedstawiono tylko wyniki z lat 2015-2023.

5.1.Odniesienie wyników do poziomów dopuszczalnych i docelowych

Stężenia zanieczyszczeń powietrza w roku 2023 odniesiono do wymagań zapisanych w *Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu [Dz. U. z 2021 r. poz. 845]* do ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska [Dz. U. z 2024 r. poz. 54]* (Tab. 5.1 i 5.2).

W roku 2023 na żadnej ze stacji tła zanieczyszczenia atmosfery nie stwierdzono przekroczeń wartości dopuszczalnych stężenia dwutlenku azotu określonych dla kryterium ochrony zdrowia – największe stężenie średnie roczne miało miejsce w Jarczewie, gdzie osiągnęło 19% poziomu dopuszczalnego, a najmniejsze w Łebie i w Puszczy Boreckiej, gdzie stanowiło 9% poziomu dopuszczalnego. Maksymalne wartości 24-godzinne stężenia dwutlenku siarki osiągnęły 2-5% poziomu dopuszczalnego na poszczególnych stacjach (Tab. 5.1).

Na żadnej ze stacji maksymalne wartości z ośmiogodzinnych średnich kroczących stężeń ozonu nie przekroczyły dopuszczalnej liczby przypadków ponad poziom docelowy określony dla kryterium ochrony zdrowia (którego termin osiągnięcia ustalono dla roku 2010) równy 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dla średniej z okresu 3-letniego; było to od 1 do 20 dni przy dopuszczalnej częstotliwości przekroczeń 25 dni. W roku 2023 na żadnej stacji nie został przekroczony próg informowania społeczeństwa o niebezpieczeństwie wystąpienia alarmu ozonowego, wynoszący 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dla wartości 1-godzinnych ani tym bardziej poziom alarmowy (240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Na wszystkich stacjach odnotowano przekroczenie poziomu celu długoterminowego (na rok 2020), równego 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dla 8-godzinnych średnich kroczących, przy czym przekroczenie było największe na Śnieżce (o 18%).

Tabela 5.1. Zanieczyszczenie powietrza na stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery (EMEP) w Polsce w 2023 roku na tle poziomów dopuszczalnych i docelowych. Kryterium: ochrona zdrowia ludzi. Źródło danych: PMŚ

Składnik	Okres uśredniania	Poziom dopuszczalny	Dopuszczalna częstość przekroczeń w roku	Łeba	Puszcza Borecka	Jarczew	Śnieżka	Zielonka
dwutlenek azotu	rok kalendarzowy	40 µg/m ³	-	3,6	3,4	7,5	4,1	-
dwutlenek siarki	24 godziny	125 µg/m ³	3 razy	2,4*	2,6*	3,6*	6,8*	-
pył zawieszony PM10	rok kalendarzowy	40 µg/m ³	-	-	11,8	-	-	12,1
pył zawieszony PM10	24 godziny	50 µg/m ³	35 razy	-	0 dni	-	-	0 dni
ołów w pyłe zawieszonym	rok kalendarzowy	0,5 µg/m ³	-	-	0,00130	-	-	0,00126
pył zawieszony PM2,5	rok kalendarzowy	25 µg/m ³	-	-	8,7	-	-	8,4
Składnik	Okres uśredniania	Poziom docelowy	Dopuszczalna częstość przekroczeń w roku	Łeba	Puszcza Borecka	Jarczew	Śnieżka	Zielonka
ozon	8 godzin**	120 µg/m ³ ***	25 dni	7 dni	2 dni	1 dzień	20 dni	
arsen w pyłe zawieszonym PM10	rok kalendarzowy	6 ng/m ³ ****	-	-	0,23	-	-	0,23
kadm w pyłe zawieszonym PM10	rok kalendarzowy	5 ng/m ³ ****	-	-	0,06	-	-	0,04
nikiel w pyłe zawieszonym PM10	rok kalendarzowy	20 ng/m ³ ****	-	-	0,29	-	-	0,23
benzo(a) piren w pyłe zawieszonym PM10	rok kalendarzowy	1 ng/m ³ ****	-	-	0,36	-	-	0,31
Składnik	Okres uśredniania	Poziom celu długoterminowego	Termin osiągnięcia	Łeba	Puszcza Borecka	Jarczew	Śnieżka	Zielonka
ozon	8 godzin**	120 µg/m ³	rok 2020	125	132	127	142	-

* maksymalna wartość 24-godzinna

** maksymalna średnia godzinna spośród średnich kroczących obliczanych ze średnich godzinnych w ciągu doby; każdą tak obliczoną średnią 8-godzinną przypisuje się dobie, w której się ona kończy; pierwszym okresem obliczeniowym dla każdej doby jest okres od godziny 17:00 dnia poprzedniego do godziny 01:00 danego dnia; ostatnim okresem obliczeniowym dla każdej doby jest okres od godziny 16:00 do 24:00 tego dnia

*** osiągnięcie poziomu docelowego rok 2010; liczba dni z przekroczeniem poziomu docelowego w roku kalendarzowym uśredniona w ciągu kolejnych trzech lat

**** osiągnięcie poziomu docelowego rok 2013

Stężenie pyłu zawieszonego i zawartych w nim metali ciężkich badane było – spośród omawianych stacji – na stacji Puszcza Borecka i Zielonka. Średnie dobowe stężenia pyłu zawieszonego PM10 nie przekroczyły poziomu dopuszczalnego (przy dopuszczalnej częstości przekroczeń w ciągu roku 35 dni). Średnia roczna wartość stężenia pyłu stanowiła na tych stacjach 30% poziomu dopuszczalnego (40 µg/m³). Średnie roczne stężenie ołowiu w pyłe zawieszonym PM10 stanowiło na tych stacjach 0,3 % wartości dopuszczalnej. Dla trzech innych metali ciężkich oznaczanych w pyłe zawieszonym PM10 – arsenu, kadmu i niklu – określone zostały poziomy docelowe (na rok 2013). Rezultaty uzyskane w 2023 roku na

stacjach Puszcza Borecka i Zielonka stanowiły odpowiednio: 4% poziomu docelowego dla arsenu, 1% dla kadmu oraz 1% dla niklu.

Na stacji w Puszczy Boreckiej i w Zielonce średnie roczne stężenie benzo(a)pirenu stanowiło odpowiednio 36 i 31% poziomu docelowego (na rok 2013). Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM_{2,5} osiągnęło w Puszczy Boreckiej 44%, a w Zielonce 42% wartości dopuszczalnej (II faza).

W tabeli 5.2 przedstawiono odniesienie wyników uzyskanych na stacjach do poziomów dopuszczalnych, poziomu docelowego i poziomu celu długoterminowego ustanowionych dla kryterium ochrony roślin.

Tabela 5.2. Zanieczyszczenie powietrza na stacjach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w 2023 roku na tle wartości dopuszczalnych. Kryterium: ochrona roślin. Źródło danych: PMS

Składnik	Okres uśredniania	Poziom dopuszczalny	Łeba	Puszcza Borecka	Jarczew	Śnieżka	Jednostka
tlenki azotu*	rok kalendarzowy	30	3,6	3,7	7,5	4,1	µg/m ³
dwutlenek siarki	rok kalendarzowy	20	0,7	0,5	0,8	2,6	µg/m ³
dwutlenek siarki	pora zimowa (1.X-31.III)	20	0,8	0,6	1,2	2,6	µg/m ³
Składnik	Okres uśredniania	Poziom docelowy	Łeba	Puszcza Borecka	Jarczew	Śnieżka	Jednostka
		rok 2010	2019-2023	2019-2023	2019-2023	2019-2023	
ozon	okres wegetacyjny (1.V-31.VII), średnia z okresu 5 kolejnych lat	18000**	8955	7682	4881	11404	µg/m ³ h
Składnik	Okres uśredniania	Poziom celu długoterminowego	Łeba	Puszcza Borecka	Jarczew	Śnieżka	Jednostka
		rok 2020	2023	2023	2023	2023	
ozon	okres wegetacyjny (1.V-31.VII)	6000**	7727	10389	7949	15025	µg/m ³ h

* dla Puszczy Boreckiej tlenki azotu, dla pozostałych dwutlenek azotu

** wyrażony jako AOT40, które oznacza sumę różnic między stężeniem średnim jednogodzinnym wyrażonych w µg/m³ a wartością 80µg/m³ dla każdej godziny w ciągu doby pomiędzy godziną 8:00 a 20:00 czasu środkowoeuropejskiego, dla której stężenie jest większe niż 80 µg/m³.

Średnie roczne stężenie SO₂ w roku 2023 zawierało się w granicach od 3% (Puszcza Borecka) do 13% (Śnieżka) wartości stężenia dopuszczalnego określonego dla kryterium ochrony roślin. Dla pory zimowej (kryterium ochrony roślin w okresie 1.X – 31.III) największe stężenie zanotowane na Śnieżce stanowiło 13% poziomu dopuszczalnego, a najmniejsze – zanotowane w Puszczy Boreckiej – 3%. Stężenie dwutlenku azotu (dla Puszczy Boreckiej tlenków azotu, dla pozostałych dwutlenku azotu) stanowiło od 9% (Łeba) do 19% (Jarczew) stężenia dopuszczalnego dla kryterium ochrony roślin.

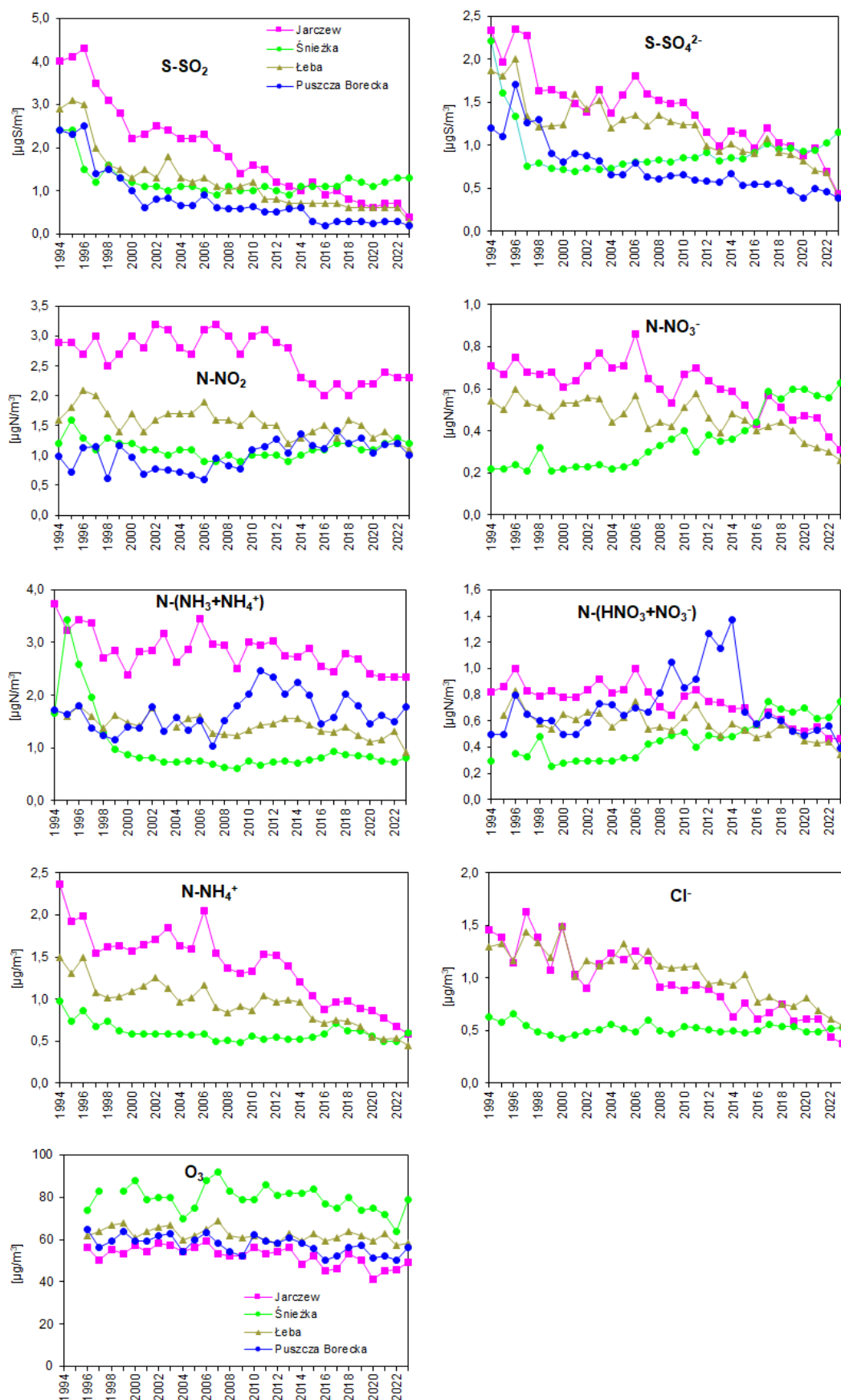
Ustanowiony w celu ochrony roślin wskaźnik AOT40 z okresu wegetacyjnego (średnia z okresu kolejnych 5 lat) nie przekroczył poziomu docelowego (dla roku 2010) na żadnej stacji i stanowił od 27% tego poziomu w Jarczewie do 63% na Śnieżce. Jednak poziom celu długoterminowego, określony na rok 2020, został przekroczony na wszystkich stacjach. Największe przekroczenie dotyczyło stacji wysokogórskiej (wyniosło 150%).

5.2. Główne zanieczyszczenia powietrza

Średnie (arytmetyczne) roczne stężenia zanieczyszczeń powietrza i ich zmienność w okresie 1994-2023 przedstawiono na rysunku 5.1.

Stężenie dwutlenku siarki w okresie 1994-2023 wykazuje wyraźny spadek, przy czym w ostatnich latach zmiany z roku na rok były mniej znaczące niż na początku analizowanego okresu, nastąpiła stabilizacja stężeń, a w ostatnim roku na stacjach nizinnych zanotowano minimalne wartości z obserwowanych w całym okresie pomiarów. Na stacji wysokogórskiej następował w ostatnich latach bardzo powolny wzrost stężenia SO_2 . Stężenia średnie roczne osiągnęły wartości od $0,2 \mu\text{gS}/\text{m}^3$ w Puszczy Boreckiej do $1,3 \mu\text{gS}/\text{m}^3$ na Śnieżce. W roku 2023 na stacjach nizinnych stężenie stanowiło jedynie 8-10% najwyższej wartości stężenia z początku omawianego okresu, na Śnieżce – 54%. Średnie z wielolecia 1994 – 2022 stężenie dwutlenku siarki było najniższe na stacji Puszcza Borecka i wynosiło $0,8 \mu\text{gS}/\text{m}^3$, natomiast najwyższe na stacji w Jarczewie i wynosiło $1,9 \mu\text{gS}/\text{m}^3$. Stężenia dwutlenku siarki w wieloleciu do roku 2017 osiągały podobne wartości na stacjach w Puszczy Boreckiej, Łebie i na Śnieżce. Na stacji w Jarczewie stężenia w początkowych latach były widocznie wyższe niż na pozostałych stacjach. W ostatnich piętnastu latach stężenie dwutlenku siarki na wszystkich stacjach zbliżyło się do podobnego poziomu, a w ostatnich ośmiu latach wartości na Śnieżce były wyższe niż w Jarczewie.

Stężenie jonu siarczanowego, pochodzącego z przemian dwutlenku siarki, na stacjach Śnieżka i Puszcza Borecka wykazywało od roku 2000 jedynie niewielkie wahania, z nieznaczną tendencją wzrostową na Śnieżce i malejącą w Puszczy Boreckiej. W 2006 roku wartości stężeń na tych stacjach osiągnęły jednakową wartość, a potem zaczęły się od siebie oddalać. W Jarczewie nastąpił wyraźny spadek stężenia tego zanieczyszczenia od roku 2006 do 2013, a potem zmiany z roku na rok zarówno do wyższych, jak i niższych wartości, by po spadku w ostatnich dwóch latach osiągnąć minimum i zrównać się z wartościami z pozostałych stacji nizinnych w 2023 roku. Podobny obraz odnotowano dla stacji w Łebie, przy czym zmiana była wyraźna dopiero od roku 2011, a w ostatnim roku stężenie spadło, osiągając wartość minimalną w wieloleciu. Najniższe średnie stężenie jonu siarczanowego w okresie 1994-2022 zaobserwowano na stacji Puszcza Borecka ($0,76 \mu\text{gS}/\text{m}^3$), zaś najwyższe na stacji w Jarczewie ($1,44 \mu\text{gS}/\text{m}^3$). Przebiegi stężeń jonu siarczanowego były podobne w poszczególnych latach na stacjach Łeba i Jarczew (wyższe wartości niż na stacjach Śnieżka (do roku 2012) i Puszcza Borecka), a w ostatnich dwóch latach przebiegi się rozeszły – na Śnieżce w górę, na pozostałych stacjach w dół, do najniższej wartości, jednakowej dla wszystkich stacji położonych na nizinach.



Rys. 5.1. Stężenie głównych zanieczyszczeń powietrza mierzonych na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

Od roku 2010 obserwuje się wzrost stężenia dwutlenku azotu na stacji Puszcza Borecka, a od 2012 - spadek w Jarczewie, ostatnio zatrzymany. Stężenia NO_2 układały się w wieloleciu podobnie na stacjach Puszcza Borecka, Śnieżka (od 2011 do 2019 wyższe w Puszczy Boreckiej) i Łeba, a zawsze wyższe były na stacji w Jarczewie. Stężenia jonu azotanowego (nie mierzone indywidualnie w Puszczy Boreckiej) wykazywały w wieloleciu niewielkie wahania z roku na rok z tendencją wzrostową na Śnieżce i spadkową w Jarczewie i Łebie, zaznaczoną wyraźniej od 2018 roku. Najniższe wartości średnie roczne były do roku 2015 notowane na Śnieżce, a najwyższe w Jarczewie. W latach 2016, 2017 i 2018 wartości stężenia w Jarczewie i na Śnieżce były niemal identyczne, a w latach 2018-2023 najwyższe wartości notowano na Śnieżce, niższe w Jarczewie, a najniższe w Łebie.

Stężenie $\text{N}-(\text{NO}_3^- + \text{HNO}_3)$ w wieloleciu wykazywało niewielką zmienność, poza stacją Puszcza Borecka, gdzie od roku 2008 do 2014 notowano znaczący wzrost i najwyższe stężenia spośród mierzonych na stacjach tła regionalnego; w ostatnich dziewięciu latach wartości na tej stacji zrównały się z notowanymi w Jarczewie i Łebie i były niższe od obserwowanych na Śnieżce. Na stacji w Jarczewie do roku 2008 stężenia były największe, a w latach 2008-2014 największe stężenia notowano w Puszczy Boreckiej. W 2023 roku na stacjach zlokalizowanych na nizinach stężenia średnie roczne $\text{N}-(\text{NO}_3^- + \text{HNO}_3)$ osiągnęły minimalne wartości w seriach z wielolecia dla każdej z nich, a na stacji wysokogórskiej – maksymalną spośród tam notowanych.

Stężenie $\text{N}-(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)$ wykazuje mniejsze wahania roczne na stacjach Łeba i Śnieżka, a większe na stacjach o większym oddziaływaniu rolnictwa – w Jarczewie i w Puszczy Boreckiej. Stężenia na stacji Puszcza Borecka w latach 1995-2007 były zbliżone do notowanych w Łebie, a następnie zaczęły zdecydowanie wzrastać, by w kolejnych latach zbliżyć się do wartości notowanych w Jarczewie. W Jarczewie utrzymuje się od wielu lat najwyższe spośród omawianych stacji stężenie sumy tych związków (średnia z wielolecia $2,85 \mu\text{gN/m}^3$), a na Śnieżce najniższe - $1,02 \mu\text{gN/m}^3$ (przy bardzo znaczącym spadku na tej stacji w początkowych latach pomiarów).

Stężenie jonu amonowego NH_4^+ , wyznaczane na stacjach IMGW-PIB, wykazuje niewielkie zmiany z roku na rok, ale od 2011 roku w Jarczewie widać wyraźnie tendencję malejącą. Podobnie jak dla innych zanieczyszczeń, widać tu wpływ nietypowego roku 2006, gdy stężenia tego jonu na stacjach w Jarczewie i Łebie wzrosły. Najmniejszą zmienność w wieloleciu wykazują stężenia na stacji na Śnieżce. Najwyższe stężenia jonu amonowego odnotowano w Jarczewie (średnia z okresu 1994-2022 wyniosła $1,43 \mu\text{gN/m}^3$), niższe w Łebie (średnia $0,96 \mu\text{gN/m}^3$), a najniższe na Śnieżce ($0,60 \mu\text{gN/m}^3$).

Stężenie jonów chlorkowych Cl^- w aerozolu atmosferycznym, badane tylko na stacjach IMGW-PIB, wykazuje w przebiegu wieloletnim tendencję spadkową na stacjach nizinnych - w Jarczewie i Łebie - i praktycznie brak zmienności na stacji wysokogórskiej - na Śnieżce. W okresie 1994 – 2022 średnie stężenie jonu chlorkowego na Śnieżce ($0,52 \mu\text{g/m}^3$) było dwukrotnie niższe niż w Jarczewie ($0,98 \mu\text{g/m}^3$) i Łebie ($1,07 \mu\text{g/m}^3$). W ostatnich dwóch latach najniższe wartości odnotowano w Jarczewie, a wyższe i bardzo do siebie zbliżone w Łebie i na Śnieżce.

Średnie roczne wartości stężenia ozonu wykazują nieznaczne zmiany z roku na rok. Od roku 2004 do 2007 obserwowano wyraźny wzrost stężenia ozonu na Śnieżce, który jednak został zahamowany w następnych latach. Na pozostałych trzech stacjach poziom i zmienność stężenia ozonu są bardzo podobne. W wieloleciu 1996-2022 najwyższe średnie stężenie ozonu obserwowano na Śnieżce ($79 \mu\text{g/m}^3$), niższe w Łebie ($63 \mu\text{g/m}^3$) i Puszczy Boreckiej ($57 \mu\text{g/m}^3$),

natomiast najniższe w Jarczewie ($52 \mu\text{g}/\text{m}^3$). W 2023 roku stężenie średnie roczne ozonu wzrosło w stosunku do wartości z poprzedniego roku na wszystkich stacjach, najbardziej na Śnieżce.

W tabelach 5.3a - 5.3d przedstawiono wartości średnich rocznych stężeń zanieczyszczeń gazowych i aerozolowych na stacjach sieci EMEP w Polsce, uzyskane w latach 1994 - 2023.

Tabela 5.3. Zanieczyszczenie powietrza na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w okresie 1994-2023 (wartości średnie arytmetyczne). Źródło danych: PMŚ
 Objasnienia: 'x' – brak pomiarów, '-' - niepełna seria roczna (<75% wartości), uniemożliwiająca obliczenie średniej.

a) Jarczew

Rok	Jarczew								
	S-SO ₂	N-NO ₂	O ₃	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-(HNO ₃ +NO ₃ ⁻)	N-NH ₄ ⁺	N-(NH ₃ +NH ₄ ⁺)	Cl ⁻
	stężenie średnie roczne [µg/m ³]								
1994	4,0	2,9		2,34	0,71	0,82	2,36	3,73	1,46
1995	4,1	2,9		1,97	0,67	0,86	1,92	3,23	1,39
1996	4,3	2,7	56	2,35	0,75	1,00	1,99	3,43	1,15
1997	3,5	3,0	50	2,27	0,68	0,83	1,54	3,37	1,63
1998	3,1	2,5	55	1,63	0,67	0,79	1,62	2,70	1,39
1999	2,8	2,7	53	1,64	0,68	0,83	1,63	2,85	1,07
2000	2,2	3,0	57	1,58	0,61	0,78	1,57	2,38	1,49
2001	2,3	2,8	54	1,48	0,64	0,78	1,65	2,83	1,03
2002	2,5	3,2	58	1,39	0,71	0,84	1,71	2,85	0,90
2003	2,4	3,1	57	1,65	0,77	0,92	1,85	3,17	1,14
2004	2,2	2,8	54	1,37	0,70	0,81	1,63	2,63	1,24
2005	2,2	2,7	56	1,58	0,71	0,84	1,59	2,86	1,18
2006	2,3	3,1	59	1,81	0,86	1,00	2,05	3,45	1,26
2007	2,0	3,2	53	1,60	0,65	0,82	1,55	2,97	1,17
2008	1,8	3,0	52	1,52	0,60	0,71	1,37	2,95	0,91
2009	1,4	2,7	52	1,48	0,53	0,64	1,30	2,50	0,93
2010	1,6	3,0	56	1,49	0,67	0,79	1,33	3,00	0,88
2011	1,5	3,1	53	1,35	0,70	0,84	1,53	2,94	0,93
2012	1,2	2,9	54	1,15	0,64	0,75	1,52	3,04	0,89
2013	1,1	2,8	56	0,99	0,60	0,74	1,39	2,74	0,82
2014	1,0	2,3	48	1,16	0,59	0,69	1,20	2,73	0,63
2015	1,2	2,2	52	1,14	0,52	0,70	1,04	2,88	0,76
2016	0,9	2,0	45	0,96	0,43	0,57	0,88	2,54	0,61
2017	1,0	2,2	46	1,20	0,57	0,67	0,96	2,44	0,67
2018	0,8	2,0	53	1,03	0,51	0,61	0,98	2,78	0,75
2019	0,7	2,2	50	0,99	0,45	0,54	0,89	2,68	0,59
2020	0,6	2,2	41	0,88	0,47	0,52	0,87	2,41	0,61
2021	0,7	2,4	45	0,97	0,46	0,55	0,78	2,34	0,61
2022	0,7	2,3	45	0,69	0,37	0,46	0,68	2,35	0,44
2023	0,4	2,3	49	0,44	0,31	0,46	0,59	2,35	0,38
1994-2022	1,9	2,7	52	1,44	0,62	0,75	1,43	2,85	0,98

Tabela 5.3. Zanieczyszczenie powietrza na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w okresie 1994-2021 (wartości średnie arytmetyczne). Źródło danych: PMŚ
 Objasnienia: 'x' – brak pomiarów, '-' - niepełna seria roczna (<75% wartości), uniemożliwiająca obliczenie średniej.

b) Śnieżka

Rok	Śnieżka								
	S-SO ₂	N-NO ₂	O ₃	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-(HNO ₃ +NO ₃ ⁻)	N-NH ₄ ⁺	N-(NH ₃ +NH ₄ ⁺)	Cl ⁻
	stężenie średnie roczne [µg/m ³]								
1994	2,4	1,2		2,21	0,22	0,29	0,98	1,67	0,63
1995	2,4	1,6		1,61	0,22		0,74	3,44	0,58
1996	1,5	1,3	74	1,34	0,24	0,35	0,87	2,58	0,66
1997	1,2	1,1	83	0,75	0,21	0,33	0,68	1,96	0,55
1998	1,6	1,3		0,79	0,32	0,48	0,74	1,27	0,49
1999	1,3	1,2	83	0,73	0,21	0,25	0,63	0,98	0,46
2000	1,2	1,2	88	0,72	0,22	0,28	0,58	0,87	0,43
2001	1,1	1,1	79	0,69	0,23	0,29	0,58	0,82	0,46
2002	1,1	1,1	80	0,73	0,23	0,29	0,59	0,82	0,49
2003	1,0	1,0	80	0,72	0,24	0,29	0,58	0,74	0,51
2004	1,1	1,1	70	0,73	0,22	0,29	0,59	0,73	0,56
2005	1,1	1,1	75	0,78	0,23	0,32	0,57	0,75	0,52
2006	1,0	0,9	88	0,80	0,25	0,32	0,58	0,75	0,49
2007	0,9	0,9	92	0,80	0,30	0,42	0,50	0,70	0,60
2008	1,1	1,0	83	0,83	0,33	0,45	0,51	0,64	0,50
2009	1,0	0,9	79	0,81	0,36	0,49	0,48	0,61	0,47
2010	1,0	1,0	79	0,86	0,40	0,51	0,56	0,75	0,54
2011	1,1	1,0	86	0,85	0,30	0,40	0,52	0,67	0,53
2012	1,0	1,0	81	0,92	0,38	0,49	0,55	0,73	0,51
2013	0,9	0,9	82	0,82	0,35	0,47	0,52	0,75	0,49
2014	1,1	1,0	82	0,85	0,36	0,48	0,52	0,71	0,50
2015	1,1	1,1	84	0,84	0,40	0,53	0,55	0,77	0,48
2016	1,1	1,1	77	0,92	0,44	0,57	0,58	0,81	0,50
2017	1,1	1,2	75	1,01	0,59	0,75	0,71	0,94	0,56
2018	1,3	1,2	80	0,95	0,55	0,69	0,63	0,88	0,54
2019	1,2	1,1	74	0,96	0,60	0,67	0,62	0,85	0,54
2020	1,1	1,1	75	0,93	0,60	0,70	0,56	0,83	0,49
2021	1,2	1,2	72	0,94	0,57	0,62	0,50	0,76	0,49
2022	1,3	1,3	64	1,03	0,56	0,63	0,50	0,73	0,52
2023	1,3	1,2	79	1,15	0,63	0,75	0,60	0,82	0,53
1994-2022	1,2	1,1	79	0,93	0,35	0,45	0,60	1,02	0,52

Tabela 5.3. Zanieczyszczenie powietrza na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w okresie 1994-2021 (wartości średnie arytmetyczne). Źródło danych: PMŚ
 Objasnienia: 'x' – brak pomiarów, '-' - niepełna seria roczna (<75% wartości), uniemożliwiająca obliczenie średniej.

c) Łeba

Rok	Łeba								
	S-SO ₂	N-NO ₂	O ₃	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-(HNO ₃ +NO ₃ ⁻)	N-NH ₄ ⁺	N-(NH ₃ +NH ₄ ⁺)	Cl ⁻
	stężenie średnie roczne [µg/m ³]								
1994	2,9	1,6		1,87	0,54		1,50		1,30
1995	3,1	1,8		1,81	0,50	0,64	1,31	1,59	1,33
1996	3,0	2,1	62	2,00	0,60	0,83	1,50	1,81	1,17
1997	2,0	2,0	64	1,33	0,53	0,66	1,08	1,60	1,44
1998	1,6	1,7	67	1,21	0,51	0,58	1,01	1,37	1,34
1999	1,5	1,4	68	1,22	0,47	0,54	1,03	1,61	1,20
2000	1,3	1,7	61	1,24	0,53	0,65	1,09	1,47	1,50
2001	1,5	1,4	64	1,59	0,53	0,61	1,15	1,42	1,01
2002	1,3	1,6	66	1,42	0,56	0,67	1,25	1,76	1,17
2003	1,8	1,7	67	1,52	0,55	0,66	1,13		1,12
2004	1,3	1,7	60	1,20	0,44	0,55	0,97	1,39	1,17
2005	1,2	1,7	62	1,30	0,48	0,63	1,02	1,56	1,33
2006	1,3	1,9	65	1,35	0,57	0,75	1,17	1,60	1,11
2007	1,1	1,6	69	1,23	0,41	0,54	0,90	1,28	1,26
2008	1,0	1,6	62	1,35	0,44	0,55	0,84	1,25	1,12
2009	1,1	1,5	61	1,27	0,42	0,53	0,91	1,24	1,09
2010	1,2	1,7	62	1,24	0,51	0,63	0,86	1,34	1,10
2011	0,8	1,5	60	1,24	0,58	0,72	1,04	1,43	1,12
2012	0,8	1,5	58	0,99	0,46	0,56	0,96	1,46	0,94
2013	0,7	1,2	63	0,93	0,39	0,49	0,99	1,55	0,96
2014	0,7	1,3	59	1,01	0,48	0,58	0,97	1,56	0,93
2015	0,7	1,4	63	0,93	0,45	0,53	0,76	1,43	1,03
2016	0,7	1,5	59	0,90	0,40	0,47	0,71	1,32	0,77
2017	0,7	1,3	61	1,08	0,42	0,50	0,75	1,29	0,82
2018	0,6	1,6	64	0,92	0,44	0,57	0,74	1,39	0,75
2019	0,6	1,5	62	0,89	0,40	0,53	0,67	1,23	0,73
2020	0,6	1,3	59	0,82	0,34	0,45	0,55	1,12	0,81
2021	0,6	1,4	63	0,71	0,32	0,43	0,52	1,15	0,69
2022	0,6	1,2	57	0,68	0,30	0,44	0,53	1,32	0,61
2023	0,3	1,1	58	0,40	0,26	0,34	0,45	0,92	0,55
1994-2022	1,3	1,6	63	1,22	0,47	0,58	0,96	1,43	1,07

Tabela 5.3. Zanieczyszczenie powietrza na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w okresie 1994-2017 (wartości średnie arytmetyczne). Źródło danych: PMŚ

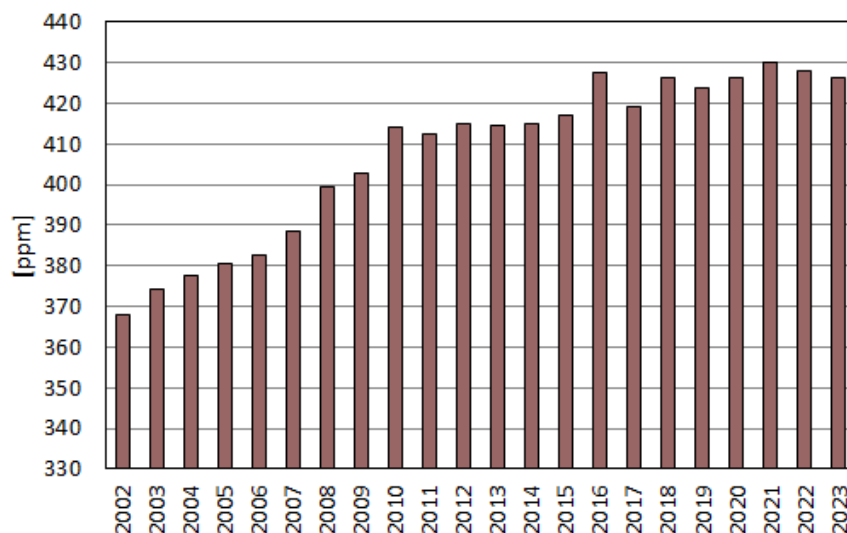
Objaśnienia: 'x' – brak pomiarów, '-' – niepełna seria roczna (<75% wartości), uniemożliwiająca obliczenie średniej. *wyniki pomiarów automatycznych

d) Puszcza Borecka

Rok	Puszcza Borecka								
	S-SO ₂	N-NO ₂	O ₃	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-(HNO ₃ +NO ₃ ⁻)	N-NH ₄ ⁺	N-(NH ₃ +NH ₄ ⁺)	Cl ⁻
	stężenie średnie roczne [µg/m ³]								
1994	2,4	1,0		1,20	x	0,50	x	1,72	x
1995	2,3	0,7		1,10	x	0,50	x	1,65	x
1996	2,5	1,1	65	1,70	x	0,80	x	1,80	x
1997	1,4	1,1	56	1,26	x	0,65	x	1,37	x
1998	1,5	0,6	59	1,30	x	0,60	x	1,24	x
1999	1,3	1,2	64	0,90	x	0,60	x	1,16	x
2000	1,0	1,0	59	0,80	x	0,50	x	1,39	x
2001	0,6	0,7	59	0,90	x	0,50	x	1,37	x
2002	0,8	0,8	62	0,88	x	0,58	x	1,78	x
2003	0,8	0,8	63	0,81	x	0,74	x	1,31	x
2004	0,7	0,7	54	0,66	x	0,72	x	1,58	x
2005	0,7	0,7	60	0,66	x	0,64	x	1,33	x
2006	0,9	0,6	63	0,80	x	0,70	x	1,51	x
2007	0,6	1,0	58	0,63	x	0,67	x	1,03	x
2008	0,6	0,8	54	0,61	x	0,81	x	1,52	x
2009	0,6	0,8	52	0,65	x	1,05	x	1,80	x
2010	0,6	1,1	62	0,66	x	0,85	x	2,01	x
2011	0,5	1,2	59	0,60	x	0,92	x	2,47	x
2012	0,5	1,3	58	0,58	x	1,27	x	2,34	x
2013	0,6	1,0	61	0,57	x	1,15	x	2,03	x
2014	0,6	1,4	58	0,67	x	1,37	x	2,25	x
2015	0,3	1,2	56	0,53	x	0,67	x	2,00	x
2016	0,2	1,1	50	0,54	x	0,58	x	1,45	x
2017*	0,3	1,4	52	0,54	x	0,64	x	1,59	x
2018*	0,3	1,2	56	0,56	x	0,60	x	2,03	x
2019*	0,3	1,3	57	0,47	x	0,52	x	1,80	x
2020*	0,2	1,0	51	0,39	x	0,49	x	1,46	x
2021*	0,3	1,2	52	0,49	x	0,53	x	1,62	x
2022*	0,3	1,2	50	0,46	x	0,56	x	1,50	x
2023*	0,2	1,0	56	0,38	x	0,39	x	1,79	x
1994-2022	0,8	1,0	57	0,76	x	0,70	x	1,66	x

5.3. Dwutlenek węgla

Spośród analizowanych stacji, pomiary stężenia dwutlenku węgla prowadzone są tylko na stacji Puszcza Borecka. Są one wykonywane analizatorem automatycznym. Przebiegi stężeń średnich rocznych dwutlenku węgla w latach 2002 - 2023 przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Średnie roczne stężenie dwutlenku węgla na stacji Puszcza Borecka w latach 2002-2023. Źródło danych: PMŚ

Stężenie dwutlenku węgla wykazywało stałą tendencję wzrostową w okresie 2002-2010, a następnie ustabilizowało się na kilka lat; w 2016 roku wzrosło znacząco, a w kolejnych latach znów się względnie ustabilizowało, na wyższym poziomie i z niewielkimi zmianami z roku na rok. W ostatnim roku średnie roczne stężenie dwutlenku węgla osiągnęło jedną z najwyższych wartości w historii pomiarów na Stacji (maksimum wyniosło 430 ppm w 2021 roku, (po 428 ppm w 2016 i 426 ppm w latach 2018, 2020 i 2023). Ostatni analizowany rok, pomimo nieznacznego spadku w stosunku do wartości z roku poprzedniego, wzmocnił wzrostową tendencję stężenia CO₂ obserwowaną w okresie 2002-2023.

Średnie roczne stężenie dwutlenku węgla w roku 2023 było wyższe o 5% od średniej wartości dla okresu 2002-2022 (406,8 ppm) i wyższe o 16% od wartości z roku 2002 (Tab. 5.4). Przyczyniły się do tego coraz wyższe z roku na rok stężenia zarówno w okresie letnim (V-IX), jak i jesienno-zimowym (X-XII).

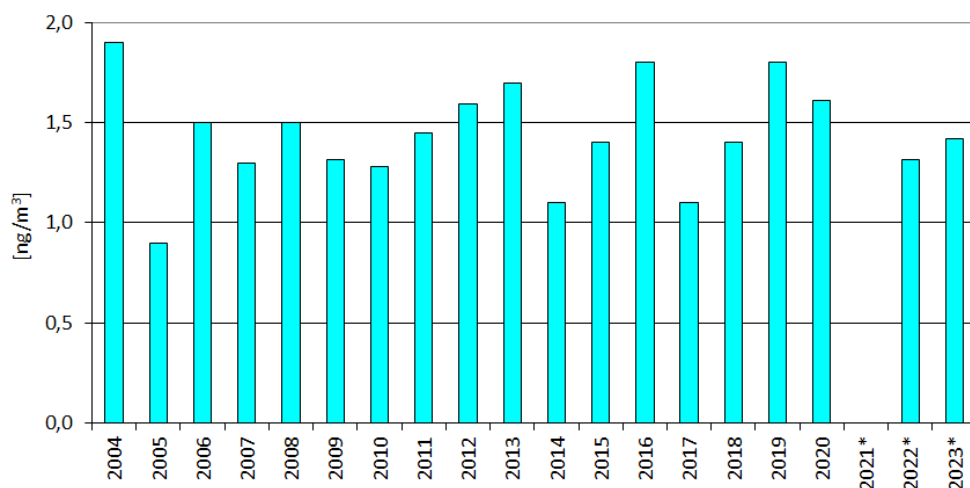
Tabela 5.4. Średnie roczne stężenie dwutlenku węgla na stacji Puszcza Borecka w latach 2002-2023. Źródło danych: PMŚ

Rok	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
ppm	367,9	374,4	377,5	380,4	382,7	388,5	399,6	402,9	413,9	412,5	414,8	
Rok	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2002-2022
ppm	414,7	414,8	417,2	427,7	419,1	426,4	423,6	426,4	430,1	427,9	426,4	406,8

5.4. Rtęć gazowa

W ramach programu EMEP, pomiary rtęci gazowej wykonywane są jedynie na stacji Puszcza Borecka. Stężenie rtęci gazowej mierzone było w latach 2004-2020 metodą manualną poprzez pochłanianie Hg na drobinach złota (tzw. metoda złotej pułapki). Od roku 2021 pomiary prowadzono metodą automatyczną, przy użyciu analizatora rtęci gazowej.

Przebieg stężeń średnich rocznych rtęci gazowej w latach 2004-2023 pokazano na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Średnie roczne stężenie rtęci gazowej w powietrzu na stacji Puszcza Borecka w latach 2004 – 2023. * 2021-2023 – na podstawie pomiarów automatycznych. Seria z 2021 roku została unieważniona. Źródło danych: PMŚ

Średnie roczne stężenie rtęci gazowej w powietrzu, mierzone od roku 2004, wahało się od 0,9 ng/m³ (w 2005 roku) do 1,9 ng/m³ (w 2004 roku). W 2023 roku wyniosło 1,3 ng/m³ i była to wartość mniejsza od średniej z okresu 2004-2020 o 10%.

Tabela 5.5. Średnie roczne stężenie rtęci gazowej na stacji Puszcza Borecka w latach 2004-2023.

* 2022-2023 – na podstawie pomiarów automatycznych. Seria z 2021 roku została unieważniona.

Źródło danych: PMŚ

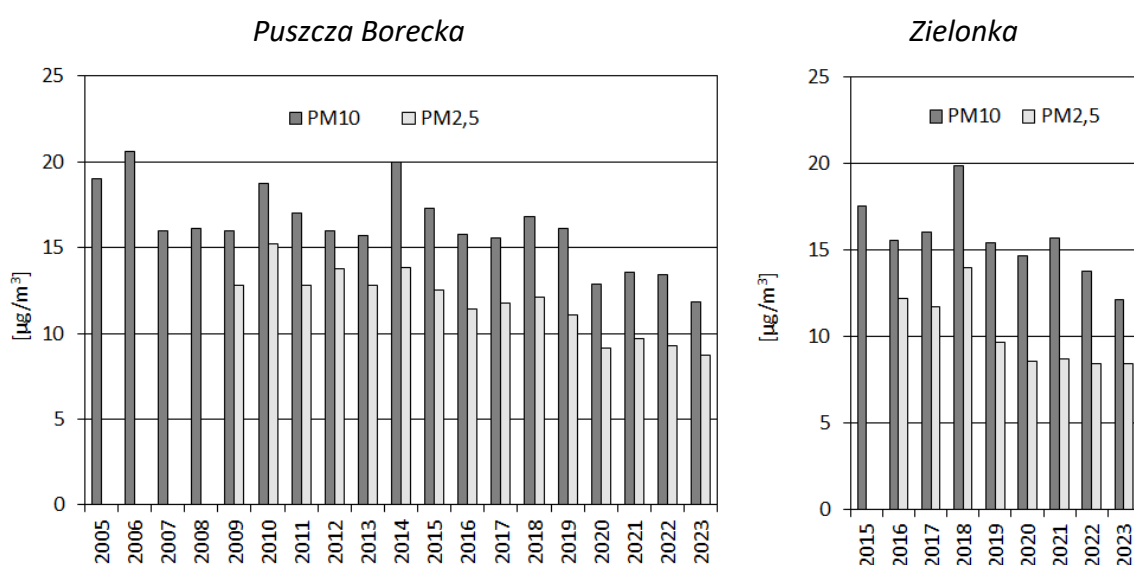
Rok	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
ng/m³	1,90	0,90	1,50	1,30	1,50	1,32	1,28	1,45	1,59	1,70	
Rok	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021*	2022*	2023*	2004-2022
ng/m³	1,10	1,40	1,80	1,10	1,40	1,80	1,61		1,31	1,42	1,43

5.5. Pył zawieszony

5.5.1. Stężenie pyłu zawieszonego

Badania stężenia pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 spośród rozważanych stacji prowadzone są na stacji Puszcza Borecka (pomiar PM10 rozpoczęto w 2005 roku, a PM2,5 – w 2009 roku), jak również na stacji Zielonka (w ramach stowarzyszenia z EMEP od 2015 roku, przy czym seria dla PM2,5 z roku 2015 została unieważniona z powodu zbyt niskiej kompletności).

Na rysunku 5.4 i w tabeli 5.6 przedstawiono wartości średnie roczne stężeń pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 na obu stacjach (dla dostępnych serii pomiarowych). Od roku 2008 wyniki podawane są dla warunków otoczenia (w poprzednich latach w odniesieniu do 20°C i 101,3 kPa).



Rys. 5.4. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 na stacjach Puszcza Borecka i Zielonka.
Źródło danych: PMŚ

Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM10 w Puszczy Boreckiej w roku 2023 było o 28% niższe od średniej z okresu 2005-2022. Średnie roczne wartości stężenia pyłu zawieszonego PM10 osiągnęły największe wartości w latach 2005, 2006, 2010 i 2014 (ok. 20 µg/m³). W krótszym okresie pomiarowym (2016-2023) najwyższą wartość średnią roczną stężenia pyłu zawieszonego PM10 na stacji w Zielonce zanotowano w 2018 roku, a najniższą w 2023 r. W latach 2009-2022 średnie roczne wartości stężenia pyłu zawieszonego PM2,5 układały się podobnie, jak pyłu zawieszonego PM10 (poza rokiem 2012 na stacji Puszcza Borecka, gdy awaria pobornika pyłu PM10 w okresie występowania wysokich stężeń pyłu mogła doprowadzić do zaniżenia wartości średniej rocznej). W roku 2023 stężenie pyłu zawieszonego PM2,5 osiągnęło wartość mniejszą niż średnia z lat 2009-2022 (o 26%). Była to najniższa wartość we wszystkich analizowanych latach. Podobnie w Zielonce – najniższe wartości obserwowano w dwóch ostatnich latach i były one niższe od średniej z lat 2016-2022 o 20%.

W roku 2023 poziom dopuszczalny dla wartości 24-godzinnej pyłu zawieszonego PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) nie został przekroczony ani w Puszczy Boreckiej ani w Zielonce. Najwięcej dni z przekroczeniami poziomu dopuszczalnego stężenia pyłu zawieszonego PM10 w Puszczy Boreckiej wystąpiło w 2006 roku (12); w kolejnych latach takich dni było po kilka. W Zielonce najczęściej przekroczeń notowano w latach 2017 i 2018 (13).

Udział pyłu zawieszonego PM2,5 w PM10 był na ogół większy w Puszczy Boreckiej niż w Zielonce. Średni udział dla wspólnego okresu badań (2016-2023) wynosi 71,5% w Puszczy Boreckiej i 65,1% w Zielonce.

Tabela 5.6. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 na stacji Puszcza Borecka i na stacji Zielonka. Źródło danych: PMŚ

Rok	Pył zawieszony PM10	Pył zawieszony PM2,5	Udział PM2,5 w PM10
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%
Puszcza Borecka			
2005	19,0	x	x
2006	20,6	x	x
2007	16,0	x	x
2008	16,1	x	x
2009	16,0	12,8	80,2
2010	18,8	15,2	81,2
2011	17,0	12,8	75,1
2012	16,0	13,8	86,3
2013	15,7	12,8	81,8
2014	20,0	13,8	69,3
2015	17,3	12,5	72,3
2016	15,7	11,4	72,6
2017	15,6	11,8	75,6
2018	16,8	12,1	72,0
2019	16,1	11,1	68,9
2020	12,9	9,1	70,7
2021	13,6	9,7	71,2
2022	13,4	9,3	69,2
2023	11,8	8,7	73,7
średnia	16,5	12,0	73,0
Zielonka			
2015	17,5	-	-
2016	15,6	12,2	78,1
2017	16,0	11,7	73,1
2018	19,8	13,9	70,3
2019	15,4	9,6	62,6
2020	14,7	8,6	58,4
2021	15,7	8,7	55,3
2022	13,7	8,4	61,1
2023	12,1	8,4	69,2
średnia	16,1	10,4	65,1

5.5.2. Metale ciężkie w pyłe zawieszonym PM10

W tabeli 5.7 oraz na rysunkach 5.5 i 5.6 przedstawiono średnie roczne stężenia metali ciężkich oznaczanych w pyłe zawieszonym PM10 w latach 2005-2023 na stacji Puszcza Borecka i w latach 2015-2023 na stacji Zielonka. W Zielonce oznaczano we wszystkich latach arsen, kadm, nikiel i ołów, a w Puszczy Boreckiej w latach 2005-2022 także chrom, miedź i cynk (w ostatnim roku program ograniczono do As, Cd, Ni i Pb).

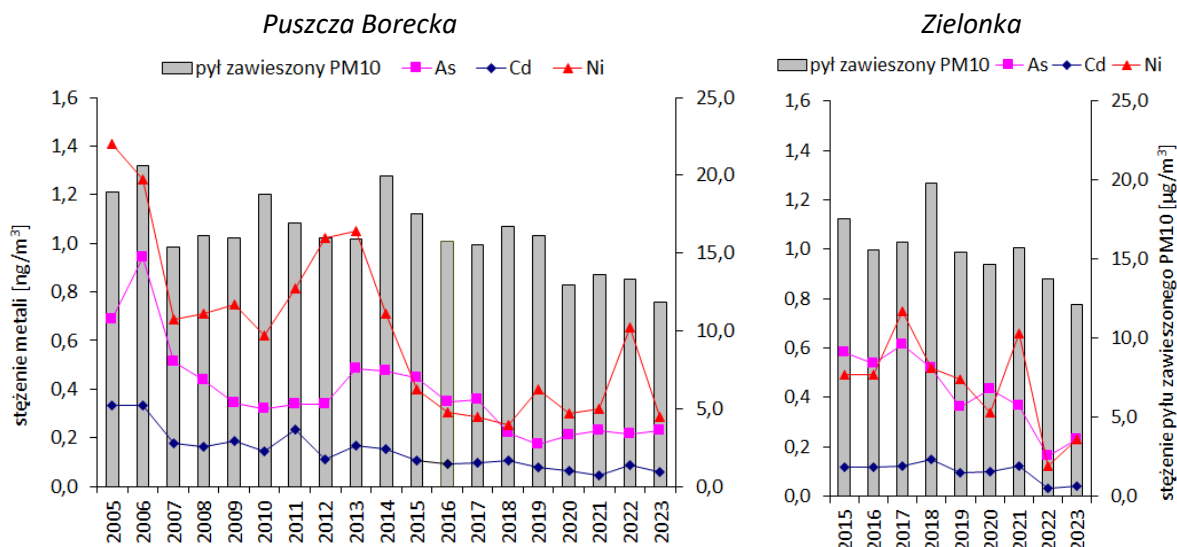
W największych ilościach w pyłe zawieszonym PM10 występują cynk i ołów. Najmniejszą zmienność i najniższe wartości średnie roczne w wieloleciu zanotowano dla arsenu i kadmu.

Tabela 5.7. Średnie roczne stężenia metali ciężkich w pyłe zawieszonym PM10 na stacji Puszcza Borecka w latach 2005-2023 i na stacji Zielonka w latach 2015-2023. Źródło danych: PMŚ

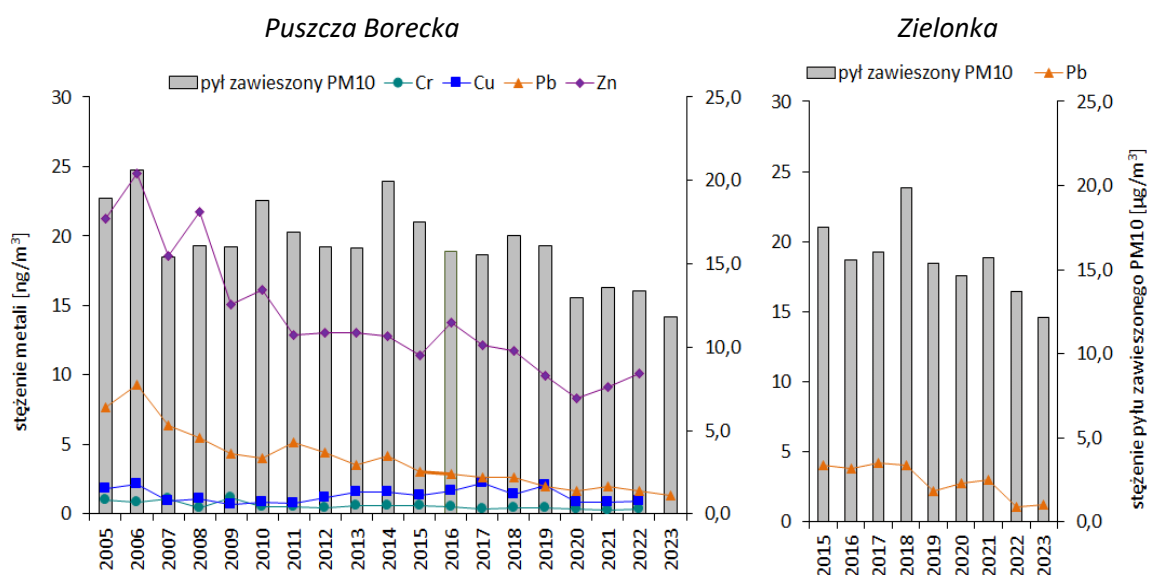
Rok	As [ng/m ³]	Cd [ng/m ³]	Cr [ng/m ³]	Cu [ng/m ³]	Ni [ng/m ³]	Pb [ng/m ³]	Zn [ng/m ³]	pył zawieszony PM10 [μg/m ³]
Puszcza Borecka								
2005	0,69	0,33	1,0	1,79	1,41	7,67	21,3	19,0
2006	0,94	0,33	0,9	2,14	1,26	9,32	24,5	20,6
2007	0,51	0,18	1,1	0,90	0,69	6,39	18,5	15,4
2008	0,44	0,16	0,5	1,11	0,71	5,48	21,8	16,1
2009	0,34	0,19	1,2	0,68	0,75	4,32	15,0	16,0
2010	0,32	0,14	0,5	0,86	0,62	4,04	16,1	18,8
2011	0,34	0,23	0,6	0,80	0,81	5,16	12,9	16,9
2012	0,34	0,11	0,5	1,21	1,02	4,39	13,0	16,0
2013	0,48	0,17	0,6	1,56	1,05	3,54	13,0	15,9
2014	0,48	0,15	0,6	1,61	0,71	4,14	12,8	19,9
2015	0,44	0,11	0,6	1,34	0,40	3,04	11,4	17,5
2016	0,35	0,09	0,5	1,62	0,30	2,85	13,8	15,8
2017	0,36	0,10	0,4	2,23	0,29	2,64	12,1	15,5
2018	0,22	0,10	0,5	1,41	0,25	2,60	11,8	16,7
2019	0,17	0,08	0,4	2,08	0,40	2,01	10,0	16,1
2020	0,21	0,06	0,4	0,84	0,30	1,63	8,3	12,9
2021	0,23	0,04	0,3	0,81	0,32	1,99	9,1	13,6
2022	0,21	0,09	0,3	0,92	0,66	1,64	10,1	13,3
2023	0,23	0,06	x	x	0,29	1,34	x	11,8
2005-2022	0,39	0,15	0,6	1,33	0,66	4,05	14,2	16,4
Zielonka								
2015	0,58	0,12	x	x	0,49	4,02	x	17,5
2016	0,53	0,12	x	x	0,49	3,77	x	15,6
2017	0,62	0,12	x	x	0,75	4,24	x	16,0
2018	0,52	0,15	x	x	0,52	4,06	x	19,8
2019	0,36	0,09	x	x	0,47	2,15	x	15,4
2020	0,43	0,10	x	x	0,34	2,72	x	14,7
2021	0,37	0,12	x	x	0,66	3,00	x	15,7
2022	0,16	0,03	x	x	0,12	1,08	x	13,7
2023	0,23	0,04	x	x	0,23	1,26	x	12,1
2015-2022	0,45	0,11	x	x	0,48	3,13	x	16,1

W stosunku do wartości średnich z wielolecia 2005-2022 w roku 2023 na stacji Puszcza Borecka średnie stężenia wszystkich oznaczanych metali były mniejsze. Spadek wyniósł od 42% (As) do 67% (Pb), przy zmniejszeniu średniego rocznego stężenia pyłu zawieszonego PM10 o 28% w stosunku do wartości średniej z wielolecia. Największe wartości stężenia większości badanych metali miały miejsce w latach 2005 i 2006 w Puszczy Boreckiej, co korelowało z maksymalną wartością średniego rocznego stężenia pyłu zawieszonego.

W krótszej serii pomiarowej dla Zielonki można zaobserwować spadek stężeń wszystkich badanych metali ciężkich w stosunku do wartości średnich z lat (2015-2022), od 49% (As) do 61% (Cd), przy spadku stężenia pyłu zawieszonego PM10 o 24%.



Rys. 5.5. Średnie roczne stężenia arsenu, kadmu i niklu w pyłe na tle stężenia pyłu zawieszonego PM10 na stacji Puszcza Borecka w latach 2005-2023 i na stacji Zielonka w latach 2015-2023. Źródło danych: PMS



Rys. 5.6. Średnie roczne stężenia chromu, miedzi, ołowiu i cynku w pyłe na tle stężenia pyłu zawieszonego PM10 na stacji Puszcza Borecka w latach 2005-2022 i 2005-2023 oraz stężenie ołowiu na tle stężenia pyłu zawieszonego PM10 na stacji Zielonka w latach 2015-2023. Źródło danych: PMS

Największe stężenia w pyłe PM10 zanotowano w wieloleciu i w roku 2021 na stacji Puszcza Borecka dla ołowiu (po kilka ng/m^3), najmniejsze zaś dla kadmu (poniżej $0,1 \text{ ng}/\text{m}^3$). Były to wartości mniejsze niż w pierwszych latach badania zawartości metali ciężkich w pyłe zawieszonym PM10 (Tab. 5.7). W latach 2015-2023 na stacji Zielonka uzyskano bardzo zbliżone (nieznacznie wyższe do roku 2021 i niższe w dwóch ostatnich latach) poziomy arsenu, kadmu i niklu do obserwowanych na stacji Puszcza Borecka, a wyższe ołowiu.

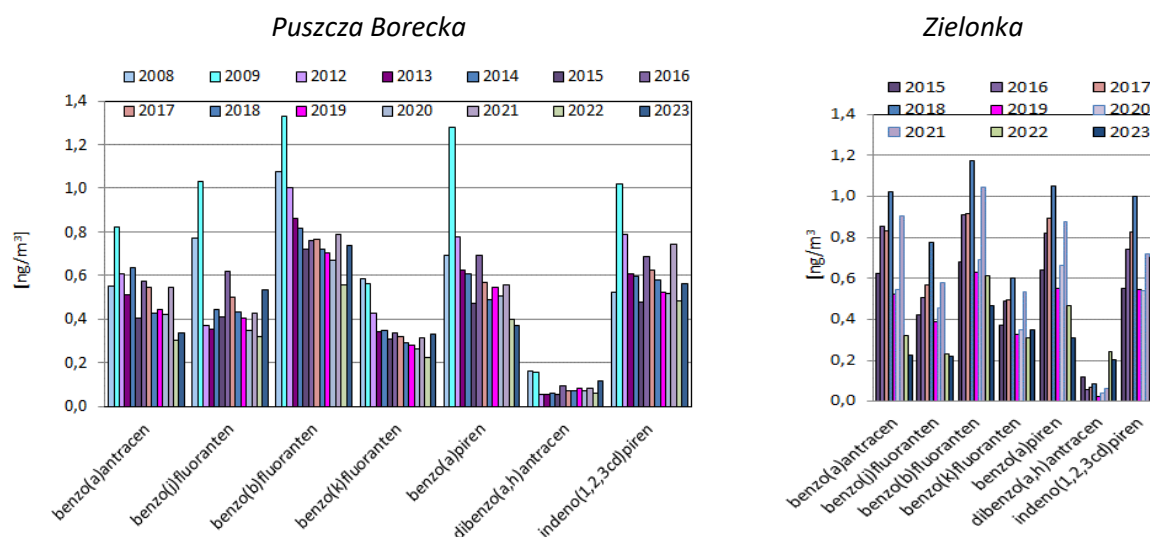
5.5.3. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w pyłe zawieszonym PM₁₀

Zawartość wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) była badana w pyłe zawieszonym PM₁₀ na stacji Puszcza Borecka okresie 2008-2023, a na stacji Zielonka w okresie 2015-2023. W tabeli 5.8 i na rysunku 5.7 przedstawiono wartości liczbowe stężeń średnich rocznych siedmiu węglowodorów aromatycznych ze stacji Puszcza Borecka i Zielonka.

W największych ilościach w pyłe zawieszonym PM₁₀ na stacji Puszcza Borecka występowały na ogół benzo(b)fluoranten, indeno(1,2,3-cd)piren i benzo(a)piren, a w najmniejszych – dibenzo(a,h)antracen. W stosunku do wartości średniej z piętnastu poprzednich lat (2008-2022) stężenie sumy WWA na stacji Puszcza Borecka było o 18% mniejsze. Odnotowano zmniejszenie średnich rocznych wartości stężenia wszystkich badanych WWA, za wyjątkiem dibenzo(a,h)antracenu - Rys. 5.7. Względne różnice stężeń osiągnęły od -42% dla benzo(a)pirenu i -38% dla benzo(a)antracenu przez -15% dla benzo(b)fluorantenu, -15% dla indeno(1,2,3-cd)pirenu i -9% dla benzo(k)fluorantenu do -4% dla benzo(j)fluorantenu i wreszcie do 34% dla dibenzo(a,h)antracenu.

W 2023 roku na stacji w Zielonce na pierwszych trzech miejscach odnotowano indeno(1,2,3-cd)piren, benzo(b)fluoranten i benzo(b)fluoranten, a na ostatnim – dibenzo(a,h)antracen, a w wieloleciu 2015-2022 na pierwszych miejscach: benzo(b)fluoranten, benzo(a)piren oraz indeno(1,2,3-cd)piren i benzo(a)antracen, a na ostatnim bez zmian. W Zielonce odnotowano w roku 2023 niższe stężenia badanych węglowodorów niż w poprzednim roku.

Bardzo wyraźnie, na obydwu uwzględnionych w ocenie stacjach, zaznaczała się zmienność sezonowa stężeń poszczególnych WWA w pyłe zawieszonym – znacząco wyższe wartości notowano w pyłe zawieszonym PM₁₀ zbieranym w chłodnej połowie roku niż w próbkach pyłu pochodzących z ciepłej połowy roku.



Rys. 5.7. Średnie roczne wartości stężenia badanych WWA w pyłe zawieszonym PM₁₀ na stacji Puszcza Borecka w latach 2008-2023 i na stacji Zielonka w latach 2015-2023. Źródło danych: PMŚ

Tabela 5.8. Średnie roczne wartości stężenia badanych WWA w pyłe zawieszonym PM10 na stacji Puszcza Borecka w latach 2008-2023 i na stacji Zielonka w latach 2015-2023. Źródło danych: PMŚ

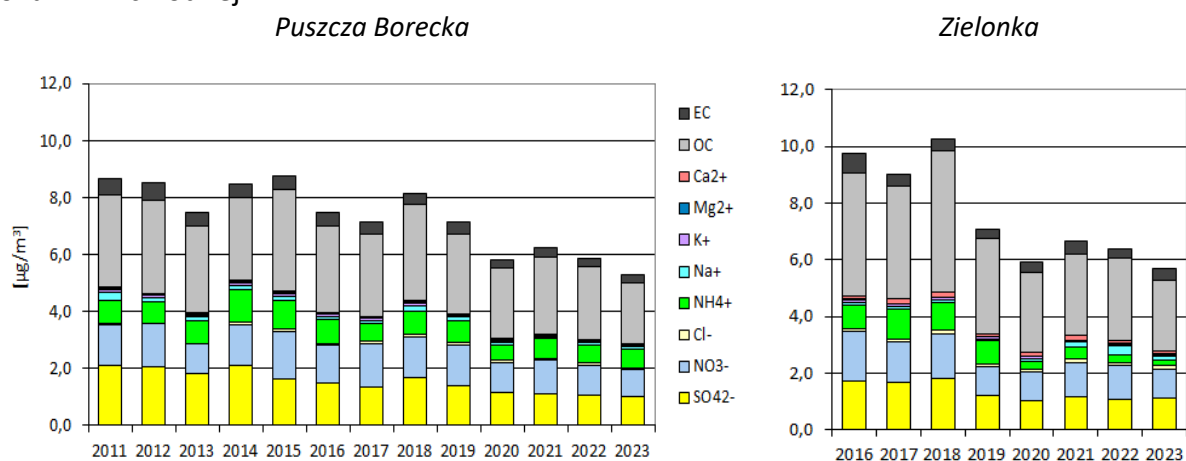
Rok	B(a)A	B(j)F	B(b)F	B(k)F	B(a)P	D(a,h)A	I(1,2,3cd)P	suma WWA	pył zawieszony PM10
	[ng/m ³]							[ng/m ³]	[µg/m ³]
2008	0,55	0,77	1,08	0,58	0,69	0,16	0,52	4,35	16,1
2009	0,82	1,03	1,33	0,56	1,28	0,16	1,02	5,94	16,0
2010	0,80	0,77	1,20	0,44	0,75	0,07	0,66	4,52	18,8
2011	0,58	1,17	1,03	0,43	0,72	0,14	0,79	4,33	17,0
2012	0,60	0,37	1,00	0,43	0,78	0,06	0,79	4,00	16,0
2013	0,51	0,35	0,86	0,34	0,63	0,05	0,61	3,35	15,7
2014	0,64	0,44	0,81	0,35	0,61	0,06	0,60	3,50	19,9
2015	0,40	0,41	0,72	0,31	0,47	0,05	0,48	2,85	17,5
2016	0,57	0,62	0,76	0,34	0,69	0,09	0,69	3,76	15,8
2017	0,54	0,50	0,77	0,32	0,57	0,07	0,62	3,39	15,6
2018	0,43	0,43	0,72	0,29	0,49	0,07	0,58	3,00	16,8
2019	0,44	0,41	0,70	0,28	0,55	0,08	0,52	2,98	16,1
2020	0,42	0,35	0,67	0,26	0,51	0,07	0,51	2,79	12,9
2021	0,54	0,43	0,79	0,31	0,56	0,08	0,74	3,45	13,6
2022	0,30	0,32	0,56	0,22	0,40	0,06	0,48	2,34	13,4
2023	0,34	0,53	0,73	0,33	0,37	0,11	0,56	2,99	11,8
2008-2022	0,54	0,56	0,87	0,36	0,64	0,09	0,64	3,64	16,1
	Zielonka								
2015	0,62	0,42	0,68	0,37	0,64	0,12	0,55	3,41	17,5
2016	0,85	0,51	0,91	0,49	0,82	0,06	0,74	4,39	15,6
2017	0,83	0,57	0,91	0,50	0,89	0,07	0,83	4,60	16,0
2018	1,02	0,77	1,18	0,60	1,05	0,09	1,00	5,71	19,8
2019	0,52	0,39	0,63	0,33	0,55	0,03	0,54	2,99	15,4
2020	0,55	0,46	0,69	0,35	0,66	0,04	0,54	3,28	14,7
2021	0,91	0,58	1,04	0,53	0,88	0,06	0,72	4,73	15,7
2022	0,32	0,23	0,61	0,31	0,47	0,24	0,70	2,89	13,7
2023	0,23	0,22	0,47	0,35	0,31	0,21	0,60	2,37	12,1
2015-2022	0,70	0,49	0,83	0,44	0,74	0,09	0,70	4,00	16,1

5.5.4. Składniki w pyłe zawieszonym PM_{2,5}

Podobnie jak pył zawieszony PM₁₀, również pył PM_{2,5} badany był tylko na stacjach Puszcza Borecka i Zielonka (z Zielonki prezentowane są dane z lat 2016-2023, gdyż seria pomiarowa z 2015 roku nie miała wymaganej kompletności). W pyłe zawieszonym PM_{2,5} oznaczane są wybrane jony: SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ oraz węgiel elementarny (EC) i organiczny (OC). Badania składu pyłu zawieszonego PM_{2,5} to najnowszy element programu pomiarowego, wprowadzany na stacjach europejskich zgodnie z wymaganiami *Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy*. Dlatego serie pomiarowe są najkrótsze spośród omawianych w tym raporcie.

W największych ilościach w pyłe zawieszonym PM_{2,5} obserwowane są: węgiel organiczny, siarczany, azotany (jako zanieczyszczenia wtórne, stanowiące produkty przemiany tlenków siarki i azotu), a w najmniejszych – jony chlorkowe i magnezowe (Rys. 5.8). W kolejnych latach zmieniały się relacje pomiędzy stężeniami siarczanów i azotanów zarówno w Puszczy Boreckiej, jak i w Zielonce – raz jedno raz drugie jony odgrywały większą rolę w kształtowaniu składu pyłu. Wszystkie składniki wykazały w Puszczy Boreckiej mniejsze stężenie średnie roczne w 2023 roku od wartości średnich z okresu 2011-2022. Najbardziej znaczące różnice – o ponad 30% – odnotowano dla węgla elementarnego, siarczanów i azotanów, a najmniejszą – 7% – dla chlorków. W Zielonce również stwierdzono mniejsze stężenia od średnich z lat 2016-2022 dla wszystkich składników poza magnezem. Zmiany te były na ogół mniej znaczące niż w Puszczy Boreckiej (poza jodem amonowym, dla którego spadek stężenia osiągnął 67%). Spadki stężeń składników były związane ze zmianami stężenia pyłu zawieszonego PM_{2,5}.

Substancje oznaczone stanowiły w poszczególnych latach ok. 60-70% zebranego pyłu zawieszonego PM_{2,5}. Udział składników niewiadomych był zwykle większy w ciepłej połowie roku niż w chłodnej.



Rys. 5.8. Średnie roczne wartości stężenia badanych składników w pyłe PM_{2,5} na stacji Puszcza Borecka w latach 2011-2023 i na stacji Zielonka w latach 2016-2023. Źródło danych: PMŚ

W ciągu lat, w których wykonywano badania składu chemicznego pyłu zawieszonego PM_{2,5} nie zauważono jednoznacznych tendencji zmian średnich rocznych wartości stężeń składników badanych w pyłe zawieszonym PM_{2,5} – zmieniają się one z roku na rok, przyjmując raz większe, raz mniejsze wartości niż w poprzednich latach (Tab. 5.9).

Tabela 5.9. Średnie roczne wartości stężenia składników badanych w pyłe zawieszonym PM_{2,5} na stacji Puszcza Borecka w latach 2011-2023 i na stacji Zielonka w latach 2015-2023. Źródło danych: PMŚ

Rok	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	OC	EC	PM _{2,5}
	[µg/m ³]										[µg/m ³]
	Puszcza Borecka										
2011	2,105	1,434	0,055	0,779	0,294	0,109	0,018	0,080	3,20	0,60	12,8
2012	2,073	1,483	0,030	0,741	0,149	0,093	0,014	0,053	3,27	0,59	13,8
2013	1,831	1,032	0,017	0,793	0,134	0,079	0,011	0,041	3,05	0,51	12,8
2014	2,091	1,438	0,082	1,135	0,169	0,108	0,015	0,061	2,91	0,48	13,8
2015	1,649	1,661	0,056	1,012	0,151	0,113	0,016	0,083	3,53	0,49	12,6
2016	1,468	1,357	0,053	0,851	0,100	0,073	0,008	0,036	3,06	0,48	11,3
2017	1,333	1,510	0,127	0,597	0,118	0,064	0,010	0,040	2,93	0,40	11,8
2018	1,675	1,448	0,089	0,813	0,185	0,100	0,015	0,078	3,33	0,38	12,1
2019	1,394	1,422	0,104	0,746	0,128	0,071	0,010	0,055	2,80	0,39	11,1
2020	1,172	1,016	0,087	0,538	0,100	0,064	0,013	0,048	2,49	0,30	9,2
2021	1,103	1,181	0,047	0,709	0,056	0,069	0,010	0,033	2,68	0,35	9,7
2022	1,065	1,063	0,079	0,600	0,087	0,074	0,012	0,027	2,55	0,30	9,3
2023	1,028	0,916	0,064	0,659	0,112	0,059	0,010	0,037	2,13	0,26	8,7
2011-2022	1,580	1,337	0,069	0,776	0,139	0,085	0,013	0,053	2,98	0,44	11,7
	Zielonka										
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	1,702	1,747	0,132	0,834	0,091	0,093	0,010	0,103	4,35	0,68	12,2
2017	1,673	1,407	0,119	1,075	0,089	0,086	0,013	0,176	3,95	0,44	11,7
2018	1,805	1,583	0,137	0,980	0,082	0,089	0,009	0,160	4,98	0,42	13,9
2019	1,222	0,993	0,101	0,820	0,073	0,058	0,004	0,087	3,38	0,34	9,6
2020	1,034	0,990	0,121	0,282	0,093	0,066	0,011	0,157	2,77	0,40	8,6
2021	1,173	1,187	0,134	0,444	0,150	0,068	0,010	0,151	2,88	0,45	8,7
2022	1,058	1,191	0,114	0,285	0,298	0,075	0,012	0,098	2,93	0,30	8,4
2023	1,096	1,040	0,115	0,223	0,117	0,068	0,015	0,100	2,52	0,38	8,4
2016-2022	1,381	1,300	0,122	0,674	0,125	0,076	0,010	0,133	3,61	0,43	10,4

* oznaczenia dla Puszczy Boreckiej wykonane w Instytucie Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrze dla Zielonki w Centralnym Laboratorium Badawczym Oddział we Wrocławiu - Pracowni w Jeleniej Górze

6. Zanieczyszczenie opadów atmosferycznych w 2023 roku na tle wielolecia

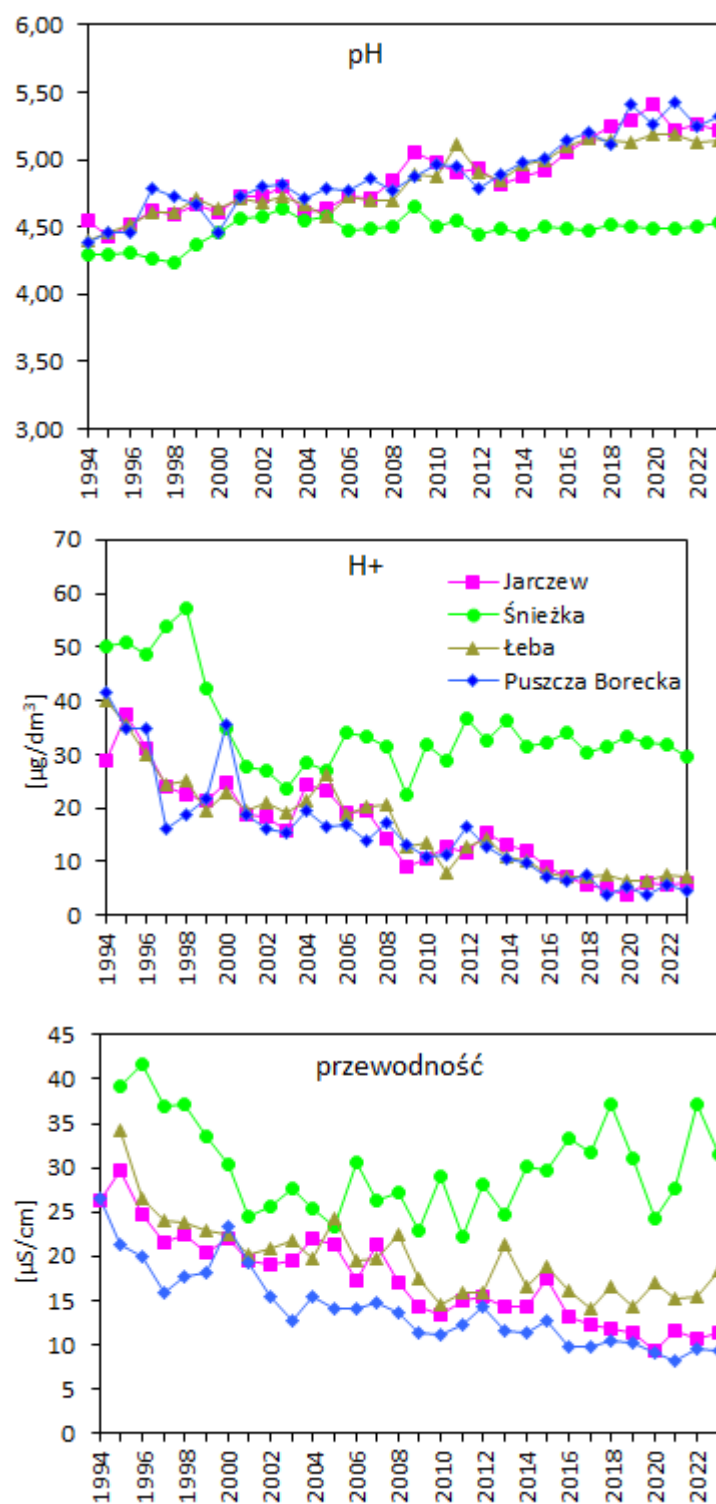
6.1. Odczyn wody opadowej

Jednym z zasadniczych czynników charakteryzujących właściwości zakwaszające opadów atmosferycznych jest zawartość i dopływ jonów wodorowych do podłoża, których miarę stanowi odczyn opadu (pH).

Od wielu lat, na skutek obecności substancji zakwaszających w atmosferze, odczyn opadów jest kwaśny (pH poniżej 5,6). W latach 80. na niektórych stacjach wartość odczynu pH oscylowała wokół 4. W latach 90. w wyniku zmniejszania emisji gazów zawierających dwutlenek siarki i dwutlenek azotu pH opadu zaczęło bardzo wyraźnie wzrastać. W roku 2023 wartość średnia roczna tego wskaźnika wahała się od 4,53 na Śnieżce do 5,33 w Puszczy Boreckiej, przy wartościach 5,14 w Łebie i 5,21 w Jarczewie. Średnie wartości pH w roku 1994 mieściły się w granicach od 4,30 na Śnieżce do 4,54 w Jarczewie (Rys. 6.1, Tab. 6.2). Na wszystkich stacjach nizinnych można zaobserwować tendencję rosnącą odczynu, mimo pewnych wahań z roku na rok. W 2009 roku na stacji w Jarczewie po raz pierwszy w dziejach pomiarów prowadzonych na stacjach EMEP w Polsce została przekroczona granica pH=5,0. Następnie, po zahamowaniu wzrostu odczynu na stacjach nizinnych od roku 2012 w kolejnych latach znów wykazywał on tendencję rosnącą, osiągając zbliżone wartości na tych trzech stacjach. Odczyn opadu na stacji wysokogórskiej utrzymywał się na stałym - niższym - poziomie, wskutek czego w ostatnich latach wzrosły różnice pomiędzy wartościami pH opadu w górach i na nizinach.

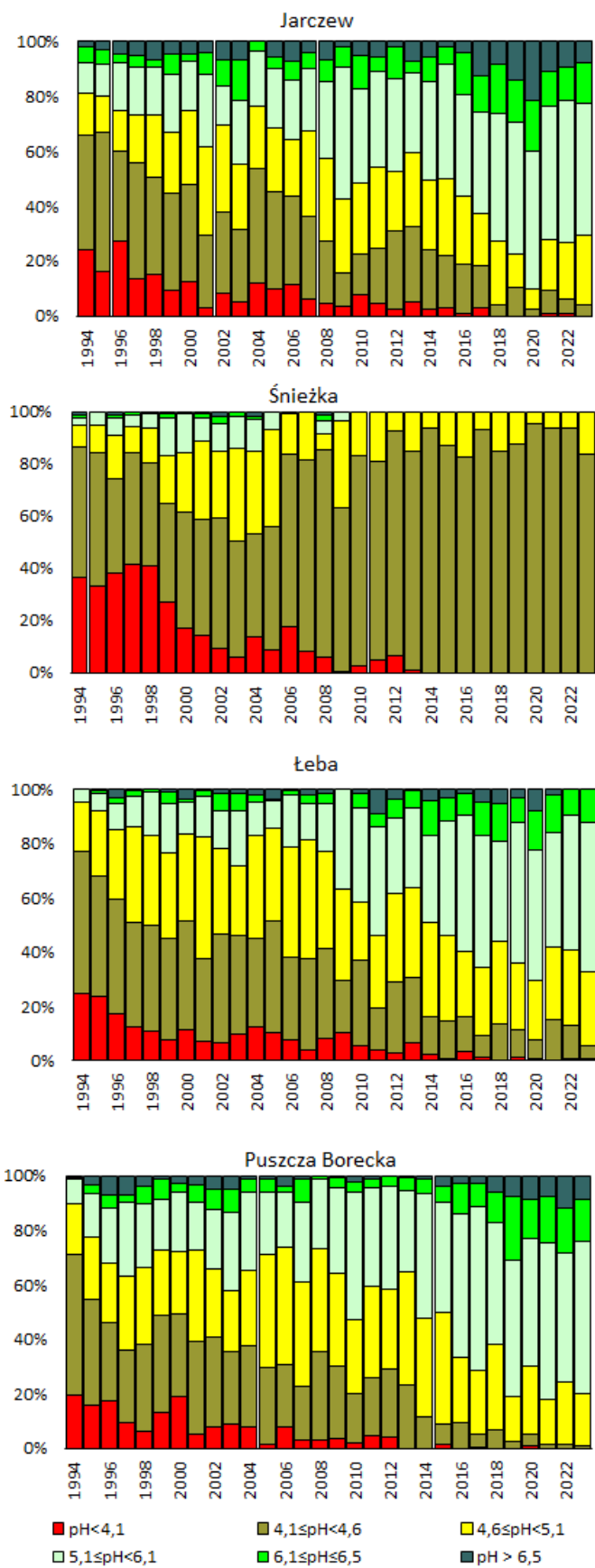
Odpowiadające tym wskaźnikom stężenia jonów wodorowych były największe na Śnieżce, przy czym znacząco malały od roku 1998 do roku 2005, by w kolejnych latach pozostawać na zbliżonym poziomie. Podobny obraz widać na początku pomiarów również na stacjach nizinnych, przy czym po roku 2005 utrzymała się tendencja malejąca stężenia jonów wodorowych (zahamowana na krótko w 2012 roku).

Widoczny na rysunku 6.1 wyraźny spadek wartości średnich rocznych przewodności elektrolitycznej właściwej opadów na nizinach świadczy o mniejszej mineralizacji opadów wskutek mniejszej zawartości m.in. związków będących prekursorami silnych kwasów. Wartość przewodności elektrolitycznej właściwej obniżała się na wszystkich stacjach nizinnych, z trzema okresami, gdy spadek był hamowany: 1999-2000, 2004-2005 i 2010-2013. Od roku 2013 w Łebie, Jarczewie i Puszczy Boreckiej wartości były niemal identyczne, co najwyraźniej widać w ostatnich dwóch latach. Od 2005 roku na stacji wysokogórskiej przewodność opadów systematycznie wzrastała, przy skokowych zmianach z roku na rok. W stosunku do wartości maksymalnych z początku lat 90. średnie roczne wartości przewodności były w roku 2023 mniejsze o 65% w Puszczy Boreckiej, o 57% w Jarczewie, o 46% w Łebie i o 20% na Śnieżce. Najniższe wartości przewodności w całym okresie 1994 – 2023 miały miejsce na stacji Puszcza Borecka, a najwyższe na Śnieżce.



Rys. 6.1. Wskaźnik pH, stężenie jonów wodorowych i przewodność elektrolityczna opadów atmosferycznych na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMS

Rozkład częstości opadów o pH w określonych przedziałach na stacjach (Rys.6.2, Tab.6.1) wskazuje na początku analizowanego wielolecia 1994-2023 na największy udział próbek o odczynie z przedziału 4,1-4,6. W miarę upływu lat widoczne jest wyraźne przesunięcie na histogramach dla wszystkich stacji w kierunku wyższych wartości pH – zwiększała się systematycznie częstość opadów w przedziałach 5,1-6,1, 6,1-6,5 i >6,5 na stacjach nizinnych i 4,1-4,6 na stacji wysokogórskiej (Rys. 6.2). W rezultacie w roku 2023 odczynem z przedziału 4,1-4,6 charakteryzowało się 83,6% próbek opadów na Śnieżce, ale niewiele na pozostałych stacjach: 4,5% próbek z Łeby, 3,8% próbek z Jarczewa i 0,9% z Puszczy Boreckiej. Na stacjach nizinnych najwięcej próbek w tym roku odnotowano w przedziale pH 5,1-6,1 – odpowiednio 48,5% w Jarczewie, 50,0% w Łebie i 56,0% w Puszczy Boreckiej. Warto zauważyć, że na stacji wysokogórskiej na Śnieżce malał też udział próbek o wyższych wartościach odczynu - w latach 1994-2008 występowały opady o pH z zakresu 5,1-6,5 i ponad 6,5, a w latach 2010-2013 – z zakresu 4,1-5,1 i poniżej 4,1. Od 2014 roku na Śnieżce nie odnotowano próbek opadów o odczynie z <4,1 (ale także powyżej 6,1). Na stacjach nizinnych z upływem czasu przybywało próbek opadów o wyższych wartościach pH.



Rys. 6.2. Częstość występowania pH wody opadowej na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

Tabela 6.1. Częstość występowania pH wody opadowej (%) na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMS

Stacja	Przedział wartości pH	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Jarczew	pH<4,1	24,0	16,2	27,3	13,7	14,9	9,5	12,7	2,9	8,1	5,0	12,0	10,0	11,4	6,0	4,6	3,3	7,6	4,6	2,7	5,3	2,7	3,0	0,8	3,0				0,8	0,8	
	4,1≤pH<4,6	41,8	50,7	32,9	42,2	35,7	35,4	35,0	26,7	29,6	26,6	41,6	35,0	32,5	30,3	22,9	12,5	15,1	20,2	28,2	27,2	21,6	19,0	17,8	15,4	4,2	10,2	2,5	8,7	5,5	3,8
	4,6≤pH<5,1	15,2	13,0	14,9	17,5	22,6	21,8	27,4	32,0	31,9	23,8	22,9	23,6	20,3	30,9	29,8	27,0	25,8	29,3	21,8	27,2	25,2	28,0	25,0	19,1	22,9	12,2	7,5	18,3	20,5	25,4
	5,1≤pH<6,1	11,4	11,7	17,4	17,5	17,3	21,1	17,8	26,2	14,1	23,0	19,9	21,4	22,0	22,8	28,2	48,0	34,1	34,9	33,7	28,9	36,1	42,0	37,1	36,8	46,9	48,0	50,0	48,4	52,0	48,5
	6,1≤pH≤6,5	5,7	5,2	3,1	3,9	3,0	7,5	2,6	8,1	9,6	15,1	3,6	4,3	6,5	6,0	7,6	7,2	12,1	5,5	11,8	4,4	9,0	6,0	15,3	13,2	17,7	15,3	18,3	12,7	11,8	14,6
	pH > 6,5	1,9	3,2	4,4	5,2	6,5	4,7	4,5	4,1	6,7	6,5		5,7	7,3	4,0	6,9	2,0	5,3	5,5	1,8	7,0	5,4	2,0	4,0	12,5	8,3	14,3	21,7	11,1	9,4	7,7
Śnieżka	pH<4,1	36,4	33,0	38,0	41,3	41,2	26,8	16,8	14,5	9,1	6,2	13,7	8,9	17,4	8,1	6,0	0,5	2,9	5,0	6,4	1,0										
	4,1≤pH<4,6	50,2	51,4	36,1	42,8	39,5	37,9	44,9	44,1	50,0	44,4	39,3	47,0	66,3	73,6	79,5	62,8	80,1	75,8	86,2	83,7	93,6	87,2	82,8	93,4	84,7	87,7	95,6	93,8	93,6	83,6
	4,6≤pH<5,1	8,5	10,6	17,1	10,1	13,2	18,3	22,9	30,0	26,0	35,2	31,8	37,1	15,8	18,3	6,0	33,5	17,0	19,2	7,4	15,3	6,4	12,8	17,2	6,6	15,3	12,3	4,4	6,2	6,4	16,4
	5,1≤pH<6,1	2,7	5,0	6,5	4,8	5,3	14,9	15,0	9,1	10,1	12,3	12,3	7,0	0,5		5,0	3,2														
	6,1≤pH≤6,5	0,9		0,9	1,0	0,4	1,3	0,4	1,8	2,9	1,9	1,0				2,0															
	pH > 6,5	1,3		1,4		0,4	0,8		0,5	1,9		1,9				1,5															
Łeba	pH<4,1	25,0	23,6	17,2	12,5	10,8	7,8	11,2	7,4	6,4	10,9	12,5	10,1	7,6	3,8	8,4	10,3	5,7	3,7	2,8	6,4	2,6	0,7	3,5	1,2		1,3	0,7		0,8	0,7
	4,1≤pH<4,6	52,0	44,6	42,2	38,3	39,2	37,0	40,5	30,4	40,4	39,7	32,5	41,3	30,3	33,8	32,9	19,3	31,4	15,6	26,3	24,3	13,8	13,8	12,5	8,0	13,7	10,1	7,2	15,1	11,6	4,5
	4,6≤pH<5,1	18,4	23,6	25,8	35,3	32,9	31,8	31,5	44,6	31,2	28,1	38,1	34,1	40,9	43,9	35,9	33,8	21,5	26,6	32,4	32,9	34,5	31,7	24,3	25,3	30,5	24,8	21,7	27,0	26,4	25,0
	5,1≤pH<6,1	4,6	6,8	9,4	11,0	15,8	18,2	11,9	14,9	14,2	22,7	11,9	10,1	18,9	13,4	17,4	36,6	34,3	40,3	27,9	29,3	31,9	42,1	50	48,3	36,7	51,7	48,0	42,1	47,3	50,0
	6,1≤pH≤6,5		0,7	2,3	2,2	1,3	3,9	1,4	2,0	6,4	7,0	3,1	0,8	1,5	3,2	3,6		5,7	4,6	6,7	6,4	12,9	8,3	8,3	12,6	13,7	8,7	14,5	13,8	9,3	11,5
	pH > 6,5		0,7	3,1	0,7		1,3	3,5	0,7	1,4	1,6	1,9	3,6	0,8	1,9	1,8		1,4	9,2	3,9	0,7	4,3	3,4	1,4	4,6	5,4	3,4	7,9	2,0	4,6	8,3
Puszcz Borecka	pH<4,1	19,6	15,7	17,5	9,6	6,4	13,1	19,2	5,2	7,7	8,7	8,1	1,4	7,7	2,8	3,2	3,8	2,2	4,6	3,9			1,5		0,6				0,8		
	4,1≤pH<4,6	51,3	38,8	28,5	26,6	31,6	35,7	30,1	34,1	32,9	26,8	29,7	28,3	23,1	19,9	32,3	26,5	17,8	21,5	25,3	23,2	11,7	7,6	9,4	4,5	7,0	2,6	4,6	1,7	1,7	0,9
	4,6≤pH<5,1	19,0	23,1	21,9	27,1	28,3	23,8	23,1	33,5	25,1	22,2	27,6	41,4	43,1	38,3	38,0	34,1	27,4	33,1	29,2	41,6	35,9	40,9	23,9	23,7	31,0	16,2	24,6	16,5	22,4	19
	5,1≤pH<6,1	8,9	15,6	20,4	27,1	23,5	18,5	21,8	17,3	21,7	28,9	28,6	22,7	20,0	29,1	25,2	31,0	46,7	36,2	37,7	29,6	45,6	40,1	52,9	59,6	45,0	50,4	46,9	57	47,4	56
	6,1≤pH≤6,5	0,6	3,4	4,4	2,3	6,4	7,7	3,2	6,4	7,7	8,7	4,9	4,8	2,3	8,5	1,3	3,8	3,7	3,1	3,9	4,8	5,8	6,1	10,9	9,0	11,0	23,1	14,6	17,4	16,4	15,5
	pH > 6,5	0,6	3,4	7,3	7,3	3,8	1,2	2,6	3,5	4,9	4,7	1,1	1,4	3,8	1,4		0,8	2,2	1,5		0,8	1,0	3,8	2,9	2,6	6,0	7,7	8,5	7,4	12,1	8,6
Stacja	Przedział wartości pH	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023

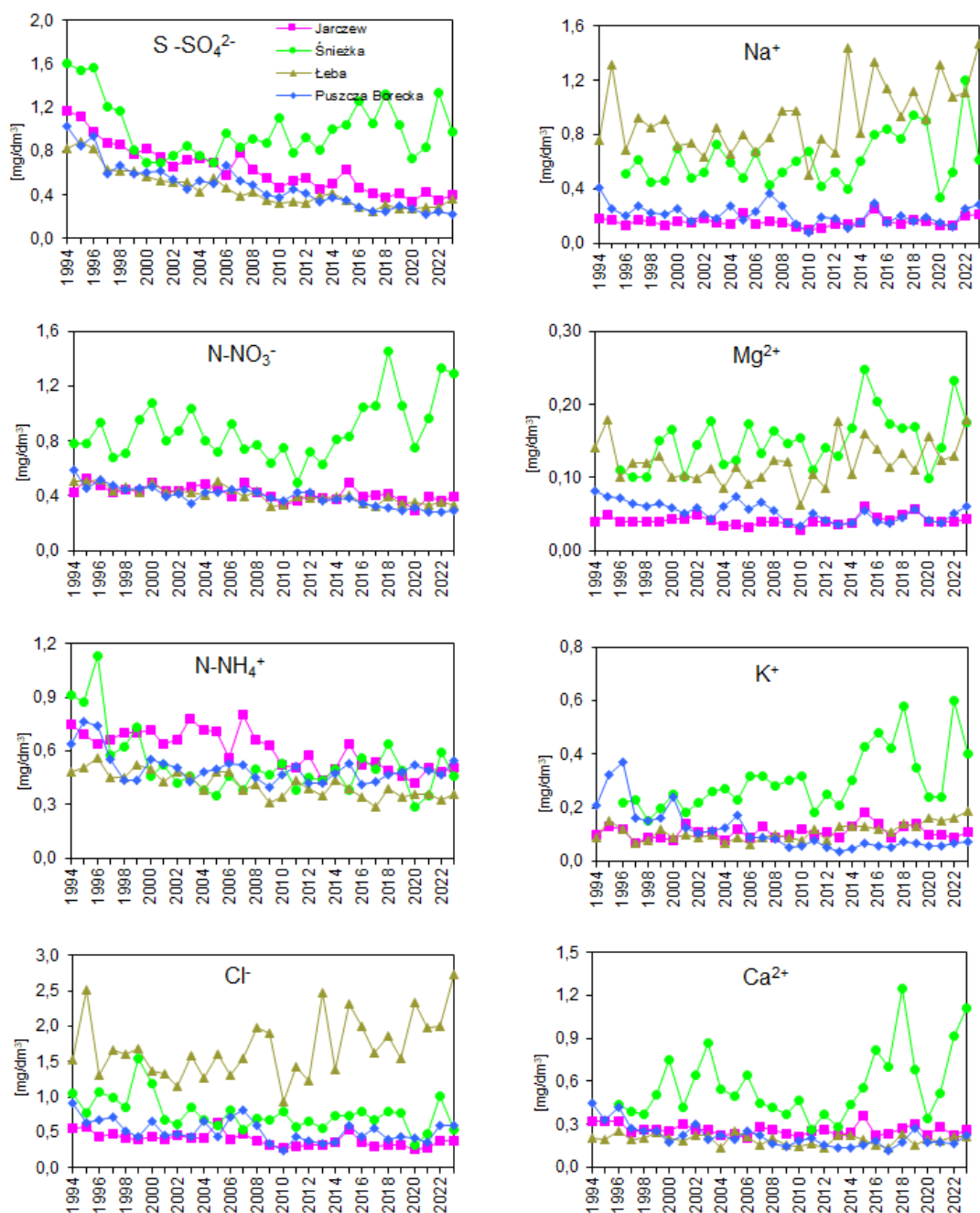
6.2. Stężenia i ładunki głównych jonów

Stężenie jonów siarczanowych w opadach malało stopniowo od roku 1994 na stacjach nizinnych. Na stacji wysokogórskiej początkowy spadek został zahamowany w roku 2000 i w następnych latach notowano wahania stężenia SO_4^{2-} , z tendencją wzrostową po roku 2005, zahamowaną w latach 2019-2021 i obserwowaną ponownie w 2022 roku. W 2023 roku stężenie siarczanów w opadach na Śnieżce było o 26% niższe od obserwowanego rok wcześniej. Stężenia siarczanów na stacjach nizinnych były zbliżone, zwłaszcza w Łebie i Puszczy Boreckiej i na nieco wyższym poziomie w Jarczewie; w latach 2013-2021 w Łebie i w Puszczy Boreckiej wartości były wręcz równe. W ostatnich dwóch latach w Łebie obserwowano nieznaczny wzrost stężeń SO_4^{2-} . We wcześniejszych latach najniższe wartości notowano na ogół w Łebie (Rys. 6.3; Tab. 6.2). Najwyższe stężenia występowały na Śnieżce. Średnie roczne stężenie SO_4^{2-} w roku 2023 było mniejsze niż w roku początkowym (1994) o 79% w Puszczy Boreckiej, o 57% w Łebie, o 66% w Jarczewie i o 39% na Śnieżce. Na wszystkich stacjach stężenie jonów siarczanowych w roku 2023 było mniejsze niż wartość średnia z lat 1994-2022, a różnice względne wyniosły od -54% w Puszczy Boreckiej do -3% na Śnieżce. Ładunki jonu siarczanowego (Rys. 6.4) docierające do podłoża były od roku 1995 bardzo podobnej wielkości na wszystkich stacjach, poza Śnieżką. Na Śnieżce, ze względu na dużo większe opady niż w rejonie pozostałych stacji i wyższe stężenia, ładunki docierające do podłoża były znacznie większe niż na nizinach. W Jarczewie, Łebie i Puszczy Boreckiej obserwuje się spadki, szczególnie w pierwszej połowie analizowanego wielolecia. Ładunki siarczanów wniesione do podłoża z opadami były w roku 2023 na wszystkich stacjach nizinnych mniejsze niż średnie w wieloleciu, a względne różnice wyniosły -59% w Puszczy Boreckiej, -37% w Jarczewie i -18% w Łebie; na Śnieżce zanotowano w 2023 roku ładunek wyższy o 3% od średniego w wieloleciu.

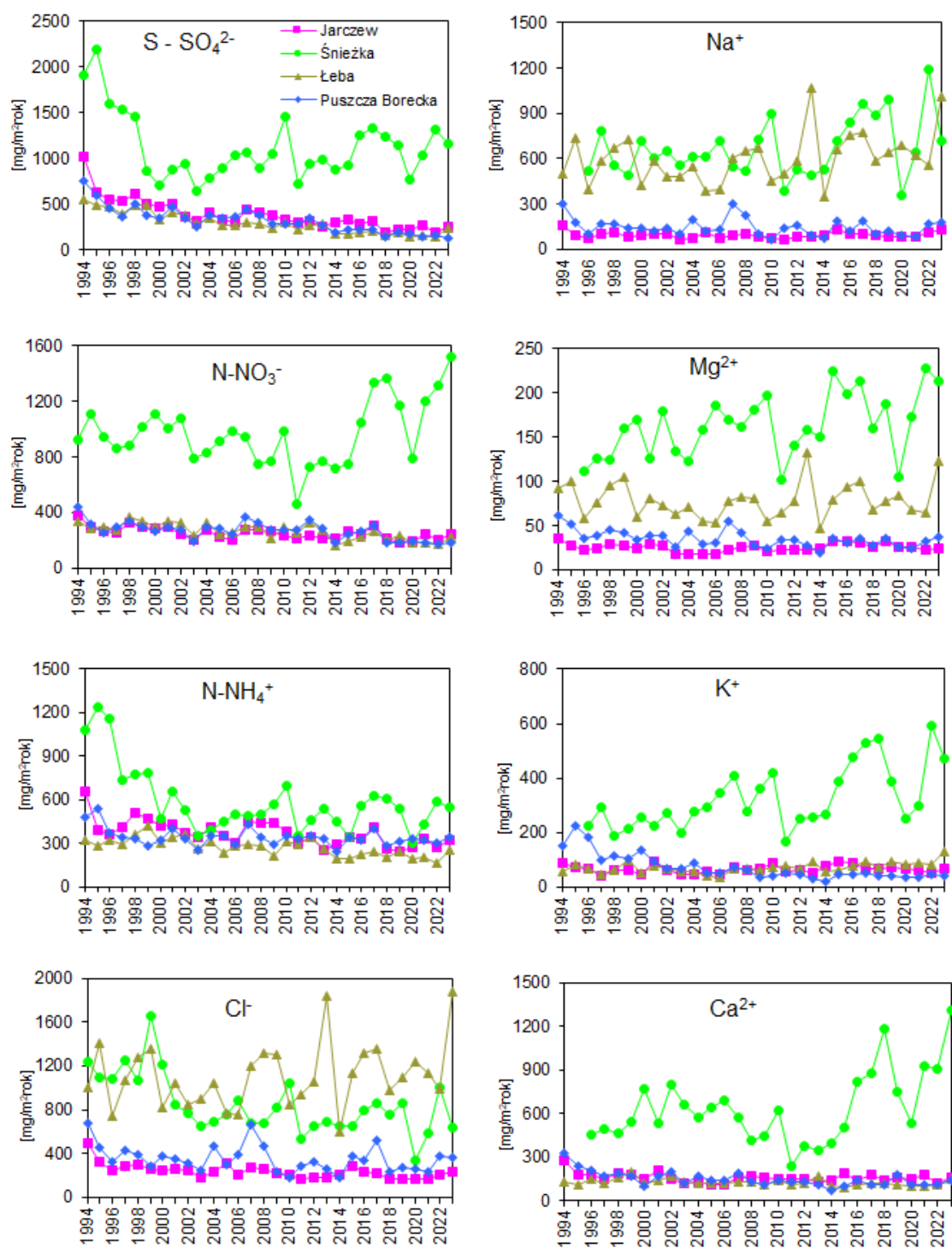
Przebiegi stężeń jonu azotanowego w większym stopniu uwidoczniają różnice pomiędzy stacją na Śnieżce i pozostałymi stacjami. Stężenia na Śnieżce w ciągu wielolecia wahały się z roku na rok, osiągając najniższą wartość w 2011 roku, a najwyższe w latach 2018, 2022 i 2023. Zmienność stężenia jonu azotanowego na Śnieżce w kolejnych latach była dużo większa niż na pozostałych stacjach, gdzie wartości były niższe i bardzo do siebie zbliżone. Podobny obraz przedstawiają ładunki docierające do podłoża, a różnica pomiędzy stacją na Śnieżce a stacjami nizinnymi jest jeszcze większa ze względu na wyższe opady w rejonie Karkonoszy. Na pozostałych stacjach ładunki azotanów docierające do podłoża były bardzo podobne i mniej zróżnicowane z roku na rok. W stosunku do wartości średniej z wielolecia 1994-2022 ładunki azotanów wniesione do podłoża w roku 2023 były niższe o 4% w Jarczewie, o 16% w Łebie i o 34% w Puszczy Boreckiej, a wyższy o 60% na Śnieżce. Na stacji wysokogórskiej w 2023 roku odnotowano najwyższy ładunek azotanów w analizowanym wieloleciu.

Inaczej kształtowała się zmienność jonu amonowego w okresie 1994–2023. Od roku 2000 do 2009 oraz w latach 2013, 2015 i 2017 najwyższe stężenia tego jonu obserwowano na stacji w Jarczewie. Na pozostałych stacjach w tym okresie były one nieco niższe i na ogół zbliżone do siebie. W kolejnych latach notowano zarówno wzrosty, jak i spadki – w zależności od stacji. W latach 2021-2023 stężenia jonu amonowego zrównały się w Jarczewie i Puszczy Boreckiej, a w Łebie ustaliły się na nieco niższym poziomie. W tych latach stężenie na Śnieżce bywało zarówno najniższe (na poziomie z Łeby w 2021 roku), najwyższe (w 2022) i równie wysokie, jak w Jarczewie i Puszczy Boreckiej (w 2023). W większości analizowanych lat najmniejsze było stężenie NH_4^+ w Łebie. Wartości te w stosunku do lat, gdy były najwyższe (1994-1996), w 2023

roku były o 15-32% niższe na stacjach nizinnych i o 49% niższe na stacji wysokogórskiej. Inaczej kształtowały się ładunki jonu amonowego. Były one na ogół zawsze najwyższe na Śnieżce, gdzie między rokiem 1994 a rokiem 1999 znacznie przewyższały wartości notowane na pozostałych stacjach. W okresie późniejszym ładunki roczne na wszystkich stacjach były podobne (z wyjątkiem lat 2010, 2013, 2016-2019, 2021-2023 na Śnieżce). Najwyższy ładunek roczny zaobserwowano na Śnieżce (w roku 1995), natomiast najniższy w Łebie (2022). W stosunku do średnich z wielolecia wartości z roku 2023 były niższe: na Śnieżce o 8%, w Łebie o 9%, w Jarczewie o 14% i równe w Puszczy Boreckiej.



Rys. 6.3. Stężenia głównych jonów w wodzie opadowej na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ



Rys. 6.4. Ładunki głównych jonów w wodzie opadowej na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023 Źródło danych: PMŚ

Najwyższe stężenia chlorków i największą zmienność wartości z roku na rok obserwowano w całym okresie na stacji w Łebie (wpływ aerozolu morskiego), najniższe w Jarczewie, a w kilku latach także w Puszczy Boreckiej, gdy zrównały się wartości notowane na tych dwóch stacjach. W Jarczewie i w Puszczy Boreckiej przebiegi stężenia chlorków były podobne – mało zróżnicowane z roku na rok. Najwyższe stężenia zanotowano w latach 1995, 2013, 2015, 2020 i w 2023 (najwyższe z najwyższych) w Łebie, a najniższe w roku 2021 w Puszczy Boreckiej. Inny charakter miał przebieg ładunków rocznych. Były one bardziej zmienne z roku na rok i wyższe na stacjach w Łebie i na Śnieżce niż na pozostałych dwóch stacjach. Wartości maksymalne odnotowano w Łebie w latach 2013 i 2023. W stosunku do wartości średniej z wielolecia 1994-2022 ładunek chlorków wniesiony do podłoża z opadami był w roku 2023 niższy o 1% w Jarczewie i o 25% na Śnieżce, a wyższy o 4% w Puszczy Boreckiej i o 73% w Łebie.

Podobny obraz widać dla sodu – stężenia i ładunki układały się inaczej na stacjach w Łebie i na Śnieżce, a inaczej w Jarczewie i Puszczy Boreckiej. Na stacji nadmorskiej i wysokogórskiej wartości stężeń były wyższe, a zmienność większa niż na pozostałych stacjach. W 2023 roku odnotowano na wszystkich stacjach wyższe stężenia sodu od średniej wieloletniej: w Łebie, gdzie osiągnęły wartość maksymalną w wieloleciu, o 56%, w Jarczewie o 37%, w Puszczy Boreckiej o 35% i na Śnieżce (o 5%). Podobne do przebiegów stężeń były przebiegi ładunków Na^+ , przy czym nastąpiło większe zbliżenie wartości ze Śnieżki i Łeby. Średnie stężenie sodu w wieloleciu było najwyższe w Łebie, a ładunek – na Śnieżce.

W przypadku kationu magnezu (także w dużym stopniu pochodzenia morskiego) najwyższe wartości i największą zmienność stężeń notowano na Śnieżce, a nieco niższe stężenia w Łebie. Tylko w Puszczy Boreckiej widać powolny spadek stężenia jonu magnezowego w wieloleciu, zahamowany w ostatnich 11 latach. Wartości w roku 2023 były wyższe od średniej z okresu 1994-2022: o 54% w Łebie, o 24% na Śnieżce, o 17% w Puszczy Boreckiej i o 3% w Jarczewie. Najwyższe ładunki i ich największą zmienność zanotowano na Śnieżce. Tam też widać wzrost ładunków w wieloleciu. Ładunki Mg^{2+} w Łebie były niższe i mniej zróżnicowane z roku na rok niż na Śnieżce. Najniższe ładunki w wieloleciu notowano w Jarczewie i były one zbliżone wartością do obserwowanych w Puszczy Boreckiej, zwłaszcza w ostatnich latach (choć w latach 2022 i 2023 ładunki Mg^{2+} w Puszczy Boreckiej nieznacznie wzrosły).

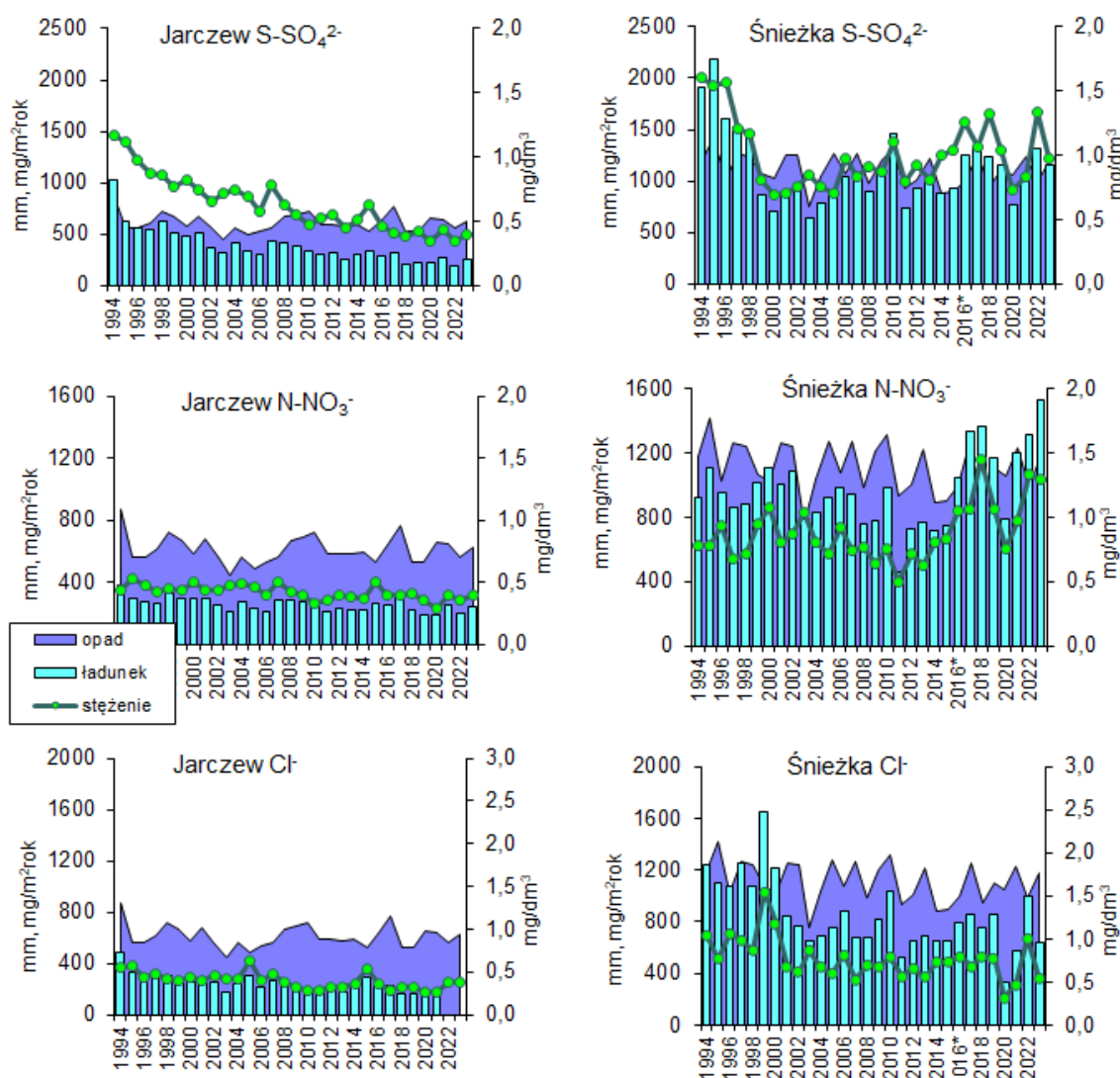
Stężenie kationu potasowego rosło powoli od roku 1996 (z zahamowaniem w latach 2011-2013) na stacji na Śnieżce, a malało wyraźnie na stacji w Puszczy Boreckiej (od wartości największych w pierwszych trzech latach do najmniejszych w ostatnich piętnastu latach). W Jarczewie i w Łebie zmienność stężenia tego kationu w wieloleciu była niewielka, a stężenia niskie i bliskie sobie. W ostatnich latach znacząco wzrosło stężenie potasu na Śnieżce, gdzie w 2022 roku odnotowano maksimum, ale w 2020 i 2021 roku stężenia osiągnęły wartości z początkowego okresu. Ładunki potasu docierające do podłoża były w okresie wielolecia, a szczególnie w ostatnich latach, znacznie wyższe na Śnieżce niż na pozostałych trzech stacjach. Na Śnieżce obserwowano wzrost ładunków kationu K^+ (z zahamowaniem w latach 2011 - 2014), a na stacji Puszcza Borecka powolny spadek. Na dwóch pozostałych stacjach ładunki były niskie i nie zmieniały się wiele w poszczególnych latach.

Wartości i zmienność stężenia kationów wapnia Ca^{2+} na Śnieżce były przez niemal wszystkie lata wyższe niż na pozostałych stacjach, gdzie obserwowano stężenia niższe i podobne do siebie. Stężenie na Śnieżce w latach 1998 - 2003 wzrastało, wykazując dużą zmienność, a na pozostałych stacjach nieznacznie malało. Od roku 2003 na Śnieżce obserwowano konsekwentny spadek stężenia wapnia aż do poziomu pozostałych stacji w roku 2011 i 2013, a następnie wzrost w latach 2014-2018 i spadek w 2019 do poziomu z roku 2017 i w 2020

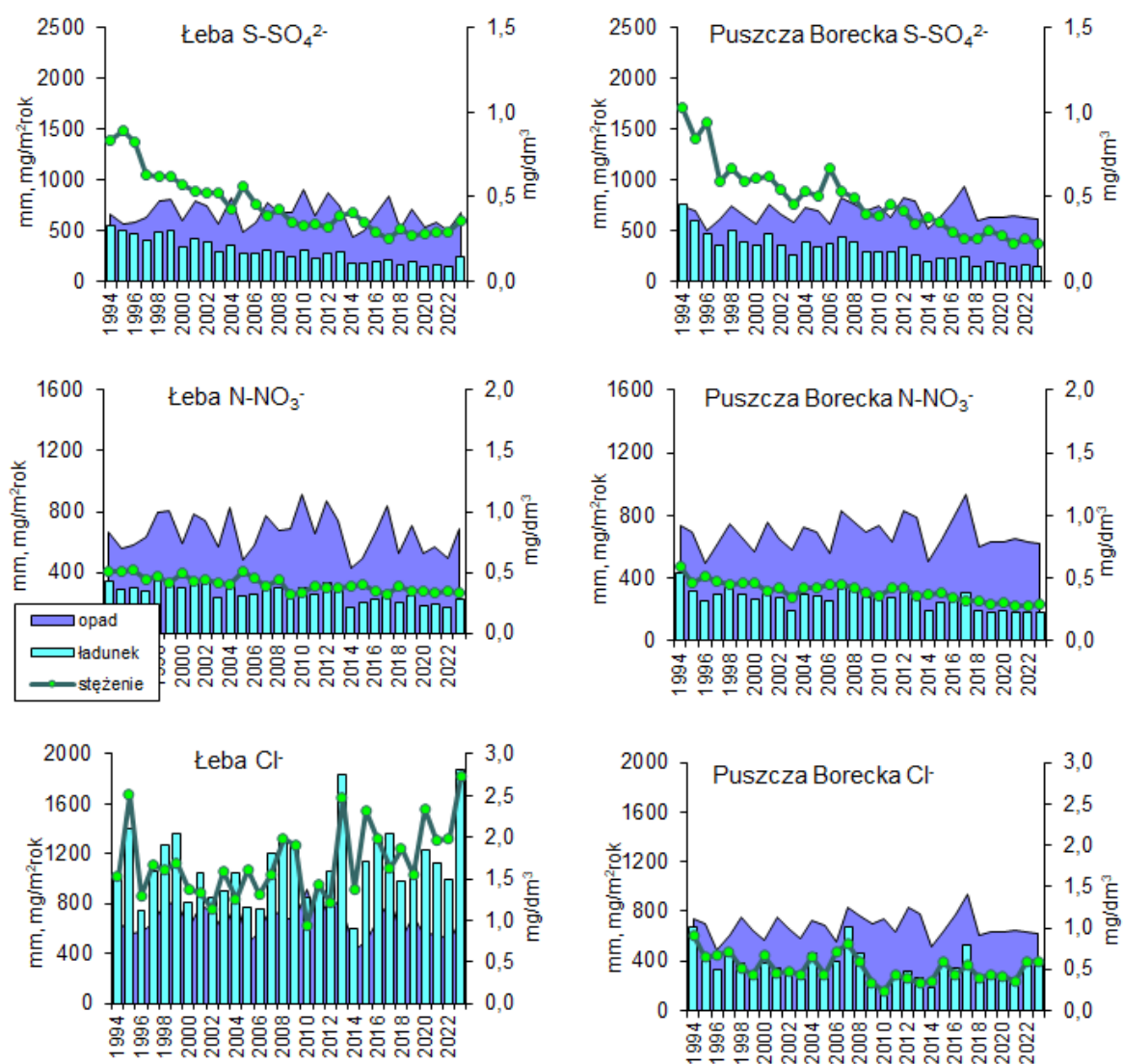
do niemal najniższego, a potem wzrost w latach 2021-2023. W stosunku do wartości średniej z wielolecia uzyskano w roku 2023 roku wartości stężeń wyższe: o 1% w Jarczewie, o 4% w Puszczy Boreckiej, o 11% w Łebie i o 101% na Śnieżce. Na wszystkich stacjach, poza Śnieżką, ładunki Ca^{2+} docierające do ziemi miały podobne wartości i powoli malały. Na Śnieżce w 2023 roku odnotowano maksymalny ładunek w wieloleciu i był on o 106% wyższy od średniego w tym czasie.

Podsumowując powyższe informacje o stężeniach i ładunkach jonów docierających z opadami do podłoża w wieloleciu można zauważyć, że dwie stacje – zlokalizowane na Śnieżce i w Łebie – wyróżniają się często wyższymi wartościami stężeń i ładunków niż dwie pozostałe stacje. Wyraźnie zaznacza się tu wpływ masywu górskiego w przypadku Śnieżki i obszaru morskiego w przypadku Łeby.

Tę odmienność – szczególnie stacji na Śnieżce – zauważyć można analizując rysunki 6.5 i 6.6. Przedstawiono na nich przebiegi stężeń i ładunków trzech anionów: siarczanowego, azotanowego i chlorkowego na tle rocznych sum opadów.



Rys. 6.5. Zmienność stężeń i ładunków głównych anionów w wieloleciu na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce (Jarczew i Śnieżka) w latach 1994-2023. Źródło danych: PMS



Rys. 6.6. Zmienność stężeń i ładunków głównych anionów w wieloleciu na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce (Łeba i Puszcza Borecka) w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

Tabela 6.2. Stężenie składników wody opadowej i mokra depozycja na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

Rok	Jarczew											
	h	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	H _{obl} ⁺	przew.
	mm	stężenie średnie roczne [mg/dm ³]									μg/dm ³	μS/cm
1994	873,1	1,17	0,43	0,75	0,56	0,18	0,10	0,040	0,32	4,54	28,7	26,4
1995	557,6	1,12	0,53	0,69	0,58	0,17	0,13	0,050	0,32	4,43	37,3	29,6
1996	564,2	0,98	0,48	0,64	0,44	0,13	0,12	0,040	0,32	4,51	30,9	24,6
1997	616,4	0,87	0,42	0,66	0,47	0,17	0,07	0,040	0,24	4,62	23,9	21,6
1998	718,0	0,86	0,45	0,70	0,42	0,16	0,09	0,040	0,26	4,59	22,4	22,4
1999	667,3	0,77	0,44	0,70	0,39	0,13	0,09	0,040	0,26	4,67	21,4	20,5
2000	579,7	0,82	0,50	0,72	0,43	0,16	0,08	0,043	0,25	4,61	24,6	21,9
2001	675,2	0,75	0,44	0,64	0,39	0,15	0,14	0,043	0,30	4,73	18,7	19,5
2002	560,4	0,66	0,44	0,66	0,45	0,18	0,11	0,050	0,26	4,73	18,4	19,1
2003	440,2	0,72	0,47	0,78	0,41	0,15	0,11	0,042	0,26	4,80	15,9	19,6
2004	561,5	0,74	0,49	0,72	0,42	0,14	0,08	0,033	0,22	4,61	24,4	22,1
2005	489,2	0,69	0,46	0,71	0,63	0,22	0,12	0,036	0,23	4,64	23,2	21,4
2006	534,2	0,58	0,39	0,56	0,40	0,14	0,09	0,032	0,20	4,72	19,3	17,3
2007	562,4	0,78	0,50	0,80	0,48	0,16	0,13	0,040	0,28	4,71	19,6	21,2
2008	664,9	0,63	0,42	0,66	0,38	0,15	0,09	0,039	0,26	4,85	14,2	17,0
2009	690,1	0,55	0,39	0,63	0,32	0,12	0,10	0,037	0,23	5,05	8,9	14,4
2010	722,1	0,47	0,33	0,52	0,28	0,10	0,12	0,029	0,21	4,98	10,4	13,3
2011	585,6	0,53	0,36	0,51	0,29	0,11	0,10	0,039	0,25	4,90	12,6	14,9
2012	585,9	0,55	0,40	0,58	0,32	0,14	0,11	0,040	0,26	4,93	11,8	15,4
2013	576,9	0,45	0,38	0,44	0,31	0,14	0,09	0,036	0,22	4,82	15,2	14,4
2014	588,2	0,51	0,37	0,50	0,36	0,15	0,13	0,038	0,24	4,88	13,2	14,3
2015	527,1	0,63	0,50	0,64	0,54	0,25	0,18	0,060	0,36	4,92	12,1	17,4
2016	639,5	0,46	0,39	0,52	0,36	0,16	0,14	0,046	0,22	5,05	8,9	13,1
2017	762,6	0,41	0,40	0,54	0,29	0,14	0,09	0,042	0,23	5,15	7,1	12,2
2018	523,8	0,38	0,41	0,49	0,32	0,17	0,13	0,049	0,27	5,25	5,6	11,7
2019	524,5	0,42	0,36	0,46	0,31	0,16	0,14	0,057	0,30	5,29	5,1	11,4
2020	657,0	0,34	0,29	0,42	0,26	0,13	0,10	0,039	0,22	5,41	3,9	9,3
2021	642,6	0,43	0,39	0,51	0,27	0,13	0,10	0,040	0,28	5,21	6,1	11,6
2022	560,6	0,35	0,36	0,48	0,37	0,20	0,09	0,039	0,22	5,26	5,5	10,6
2023	624,9	0,40	0,39	0,51	0,38	0,21	0,11	0,043	0,26	5,21	6,2	11,4
1994-2022	608,6	0,65	0,42	0,61	0,39	0,15	0,11	0,042	0,26	4,79	16,4	17,5

Rok	Jarczew									
	h	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	H ⁺
	mm	Ładunek roczny [mg/m ² rok]								
1994	873,1	1021,5	375,4	654,8	488,9	157,2	87,3	34,9	279,4	25,06
1995	557,6	624,5	295,5	384,7	323,4	94,8	72,5	27,9	178,4	20,80
1996	564,2	552,9	270,8	361,1	248,2	73,3	67,7	22,6	180,5	17,43
1997	616,4	536,3	258,9	406,8	289,7	104,8	43,1	24,7	147,9	14,73
1998	718,0	617,5	323,1	502,6	301,6	114,9	64,6	28,7	186,7	16,08
1999	667,3	513,8	293,6	467,1	260,2	86,7	60,1	26,7	173,5	14,28
2000	579,7	475,4	289,9	417,4	249,3	92,8	46,4	24,9	144,9	14,26
2001	675,2	506,4	297,1	432,1	263,3	101,3	94,5	29,0	202,6	12,63
2002	560,4	369,9	246,6	369,9	252,2	100,9	61,6	28,0	145,7	10,31
2003	440,2	316,9	206,9	343,4	180,5	66,0	48,4	18,5	114,5	7,00
2004	561,5	415,5	275,1	404,3	235,8	78,6	44,9	18,5	123,5	13,70
2005	489,2	337,5	225,0	347,3	308,2	107,6	58,7	17,6	112,5	11,35
2006	534,2	309,8	208,3	299,2	213,7	74,8	48,1	17,1	106,8	10,31
2007	562,4	438,7	281,2	449,9	270,0	90,0	73,1	22,5	157,5	11,02
2008	664,9	419,1	280,0	441,4	254,5	99,4	60,1	25,7	171,6	9,43
2009	690,1	379,6	269,1	434,8	220,8	82,8	69,0	27,6	158,7	6,14
2010	722,1	339,4	238,3	375,5	202,2	72,2	86,7	21,7	151,6	7,51
2011	585,6	310,4	210,8	298,7	169,8	64,4	58,6	23,4	146,4	7,38
2012	585,9	322,2	234,4	339,8	187,5	82,0	64,4	23,4	152,3	6,91
2013	576,9	259,6	219,2	253,8	178,8	80,8	51,9	23,1	126,9	8,77
2014	588,2	300,0	217,6	294,1	211,8	88,2	76,5	23,5	141,2	7,76
2015	527,1	332,1	263,6	337,3	284,6	131,8	94,9	31,6	189,8	6,38
2016	639,5	294,2	249,4	332,5	230,2	102,3	89,5	32,0	140,7	5,69
2017	762,6	312,7	305,0	411,8	221,2	106,8	68,6	30,5	175,4	5,41
2018	523,8	199,0	214,8	256,7	167,6	89,0	68,1	26,2	141,4	2,93
2019	524,5	220,3	188,8	241,3	162,6	83,9	73,4	31,5	157,4	2,68
2020	657,0	223,4	190,5	275,9	170,8	85,4	65,7	26,3	144,5	2,56
2021	642,6	276,3	250,6	327,7	173,5	83,5	64,3	25,7	179,9	3,92
2022	560,6	197,9	200,7	267,2	208,1	110,9	53,5	22,6	121,7	3,05
2023	624,9	250,0	243,7	318,7	237,5	131,2	68,7	25,0	162,5	3,87
1994-2022	608,6	393,9	254,5	370,0	238,9	93,3	66,1	25,4	157,0	9,65

Rok	Śnieżka											
	h	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	H _{obl} ⁺	przew.
	mm	stężenie średnie roczne [mg/dm ³]									μg/dm ³	μS/cm
1994	1183,6	1,61	0,78	0,91	1,05					4,30	50,1	
1995	1420,1	1,54	0,78	0,87	0,77					4,30	50,7	39,1
1996	1019,4	1,57	0,93	1,13	1,06	0,51	0,22	0,110	0,44	4,31	48,7	41,6
1997	1265,9	1,21	0,68	0,58	0,99	0,62	0,23	0,100	0,39	4,27	54,0	37,0
1998	1242,8	1,17	0,71	0,62	0,86	0,45	0,15	0,100	0,37	4,24	57,2	37,2
1999	1068,7	0,81	0,95	0,73	1,55	0,46	0,20	0,150	0,51	4,37	42,3	33,6
2000	1025,8	0,69	1,08	0,46	1,18	0,70	0,25	0,165	0,75	4,46	34,8	30,3
2001	1258,2	0,70	0,80	0,52	0,67	0,48	0,18	0,100	0,42	4,56	27,8	24,5
2002	1243,6	0,76	0,87	0,42	0,62	0,52	0,22	0,144	0,64	4,57	26,8	25,5
2003	757,7	0,85	1,04	0,46	0,86	0,73	0,26	0,178	0,87	4,63	23,5	27,6
2004	1035,9	0,76	0,80	0,38	0,67	0,59	0,27	0,118	0,55	4,55	28,4	25,3
2005	1273,3	0,70	0,72	0,35	0,59	0,48	0,23	0,124	0,50	4,57	26,9	23,3
2006	1072,3	0,97	0,92	0,46	0,82	0,67	0,32	0,174	0,64	4,47	34,2	30,5
2007	1272,5	0,84	0,74	0,38	0,53	0,43	0,32	0,133	0,45	4,48	33,2	26,3
2008	982,5	0,91	0,77	0,50	0,69	0,52	0,28	0,164	0,42	4,50	31,4	27,2
2009	1208,4	0,87	0,64	0,47	0,68	0,60	0,30	0,146	0,37	4,65	22,6	23,0
2010	1316,2	1,11	0,75	0,53	0,79	0,68	0,32	0,154	0,47	4,50	31,7	29,0
2011	927,7	0,79	0,50	0,38	0,57	0,42	0,18	0,111	0,26	4,54	28,8	22,3
2012	1008,1	0,93	0,72	0,45	0,65	0,52	0,25	0,140	0,37	4,44	36,6	28,2
2013	1221,5	0,81	0,63	0,44	0,56	0,40	0,21	0,130	0,28	4,49	32,5	24,8
2014	887,0	1,00	0,81	0,50	0,73	0,60	0,30	0,167	0,44	4,44	36,4	30,1
2015	897,1	1,04	0,83	0,38	0,73	0,80	0,43	0,247	0,56	4,50	31,6	29,6
2016*	995,3	1,26	1,05	0,56	0,80	0,84	0,48	0,203	0,82	4,49	32,3	33,4
2017	1257,7	1,06	1,06	0,50	0,68	0,77	0,42	0,173	0,70	4,47	34,0	31,7
2018	941,2	1,32	1,45	0,64	0,80	0,94	0,58	0,168	1,25	4,52	30,2	37,2
2019	1103,8	1,04	1,06	0,49	0,78	0,90	0,35	0,170	0,68	4,50	31,5	31,1
2020	1051,8	0,73	0,75	0,29	0,32	0,34	0,24	0,098	0,34	4,48	33,3	24,3
2021	1233,6	0,84	0,97	0,35	0,47	0,52	0,24	0,140	0,52	4,49	32,3	27,6
2022	988,9	1,33	1,33	0,59	1,01	1,20	0,60	0,232	0,92	4,50	31,9	37,2
2023	1180,9	0,98	1,29	0,46	0,54	0,61	0,40	0,176	1,11	4,53	29,4	31,4
1994-2022	1109,0	1,01	0,86	0,53	0,77	0,58	0,28	0,142	0,55	4,44	36,5	28,8

*w roku 2016 wartość obliczona na podstawie danych z niepełnego okresu

Rok	<i>Śnieżka</i>									
	h	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	H ⁺
	mm	ładunek roczny [mg/m ² rok]								
1994	1183,6	1905,6	923,2	1077,1	1242,8					59,30
1995	1420,1	2187,0	1107,7	1235,5	1093,5					72,00
1996	1019,4	1600,5	948,0	1151,9	1080,6	519,9	224,3	112,1	448,5	49,64
1997	1265,9	1531,7	860,8	734,2	1253,2	784,9	291,2	126,6	493,7	68,36
1998	1242,8	1454,1	882,4	770,5	1068,8	559,3	186,4	124,3	459,8	71,09
1999	1068,7	865,6	1015,3	780,2	1656,5	491,6	213,7	160,3	545,0	45,21
2000	1025,8	707,8	1107,9	471,9	1210,4	718,1	256,5	169,3	769,4	35,70
2001	1258,2	880,7	1006,6	654,3	843,0	603,9	226,5	125,8	528,4	34,98
2002	1243,6	945,1	1081,9	522,3	771,0	646,7	273,6	179,1	795,9	33,33
2003	757,7	644,0	788,0	348,5	651,6	553,1	197,0	134,9	659,2	17,81
2004	1035,9	787,3	828,7	393,6	694,1	611,2	279,7	122,2	569,7	29,42
2005	1273,3	891,3	916,8	445,7	751,2	611,2	292,9	157,9	636,7	34,25
2006	1072,3	1040,1	986,5	493,3	879,3	718,4	343,1	186,6	686,3	36,67
2007	1272,5	1068,9	941,7	483,6	674,4	547,2	407,2	169,2	572,6	42,25
2008	982,5	891,6	754,0	493,7	674,9	515,6	278,1	161,3	412,3	30,88
2009	1208,4	1051,3	773,4	567,9	821,7	725,0	362,5	181,3	447,1	27,31
2010	1316,2	1461	987,2	697,6	1039,8	895,0	421,2	197,4	618,6	41,72
2011	927,7	732,9	463,9	352,5	528,8	389,6	167,0	102,0	241,2	26,72
2012	1008,1	937,5	725,8	453,6	655,3	524,2	252,0	141,1	373,0	36,90
2013	1221,5	989,4	769,5	537,5	684,0	488,6	256,5	158,8	342,0	39,70
2014	887,0	887,0	718,5	443,5	647,5	532,2	266,1	150,8	390,3	32,29
2015	897,1	933,0	744,6	340,9	654,9	717,7	385,8	224,3	502,4	28,35
2016	995,3	1254,1	1045,1	557,4	796,2	836,1	477,7	199,1	816,1	32,15
2017	1257,7	1333,2	1333,2	628,8	855,2	968,4	528,2	213,8	880,4	42,76
2018	941,2	1242,4	1364,7	602,4	753,0	884,7	545,9	160,0	1176,5	28,42
2019	1103,8	1148,0	1170,0	540,9	861,0	993,4	386,3	187,6	750,6	34,77
2020	1051,8	767,8	788,9	305,0	336,6	357,6	252,4	105,2	536,4	35,02
2021	1233,6	1036,2	1196,6	431,8	579,8	641,5	296,1	172,7	925,2	39,85
2022	988,9	1315,2	1315,2	583,5	998,8	1186,7	593,3	227,4	909,8	31,55
2023	1180,9	1157,3	1523,4	543,2	637,7	720,3	472,4	212,6	1310,8	34,72
1994-2022	1109,0	1120,4	949,9	589,6	853,7	669,4	326,2	163,0	635,6	39,10

*w roku 2016 wartość obliczona na podstawie danych z niepełnego okresu

Rok	Łeba											
	h	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	H _{obl} ⁺	przew.
	mm	stężenie średnie roczne [mg/dm ³]									µg/dm ³	µS/cm
1994	660,9	0,83	0,51	0,48	1,52	0,76	0,09	0,140	0,20	4,40	40,0	
1995	560,5	0,89	0,51	0,51	2,51	1,31	0,15	0,180	0,19	4,45	35,4	34,2
1996	574,2	0,82	0,52	0,56	1,30	0,69	0,12	0,100	0,25	4,52	30,0	26,5
1997	635,9	0,63	0,44	0,45	1,67	0,92	0,07	0,120	0,19	4,61	24,5	24,1
1998	791,7	0,62	0,47	0,45	1,61	0,85	0,08	0,120	0,20	4,60	25,0	23,7
1999	803,6	0,62	0,42	0,52	1,69	0,91	0,12	0,130	0,24	4,71	19,5	23,0
2000	594,3	0,57	0,50	0,50	1,37	0,72	0,09	0,100	0,20	4,64	22,9	22,4
2001	786,6	0,53	0,43	0,43	1,33	0,74	0,10	0,102	0,18	4,71	19,6	20,2
2002	746,0	0,52	0,44	0,48	1,14	0,64	0,09	0,098	0,22	4,68	20,9	20,8
2003	569,6	0,52	0,42	0,46	1,58	0,85	0,10	0,112	0,22	4,72	19,3	21,8
2004	826,5	0,43	0,40	0,38	1,26	0,66	0,07	0,086	0,14	4,67	21,3	19,8
2005	478,6	0,56	0,51	0,48	1,60	0,80	0,09	0,115	0,25	4,58	26,3	24,3
2006	579,3	0,46	0,45	0,48	1,31	0,68	0,06	0,091	0,21	4,73	18,7	19,6
2007	775,2	0,39	0,39	0,38	1,55	0,78	0,09	0,101	0,16	4,70	20,1	19,8
2008	674,2	0,43	0,44	0,41	1,98	0,97	0,10	0,123	0,20	4,69	20,6	22,4
2009	681,7	0,35	0,32	0,31	1,91	0,98	0,09	0,122	0,16	4,89	12,9	17,5
2010	909,0	0,33	0,33	0,34	0,93	0,50	0,08	0,063	0,15	4,87	13,4	14,6
2011	652,1	0,34	0,39	0,44	1,43	0,77	0,12	0,104	0,17	5,11	7,8	15,8
2012	868,4	0,32	0,38	0,39	1,22	0,67	0,08	0,086	0,14	4,90	12,7	15,8
2013	740,2	0,39	0,38	0,35	2,48	1,44	0,13	0,178	0,22	4,85	14,3	21,2
2014	433,1	0,41	0,39	0,44	1,38	0,81	0,13	0,105	0,22	4,97	10,8	16,6
2015	493,2	0,35	0,40	0,39	2,31	1,34	0,13	0,160	0,19	4,99	10,1	18,9
2016	663,4	0,29	0,34	0,34	1,99	1,14	0,12	0,138	0,16	5,09	8,1	16,2
2017	832,9	0,25	0,32	0,29	1,63	0,93	0,11	0,115	0,14	5,15	7,0	14,1
2018	523,5	0,31	0,39	0,39	1,87	1,12	0,14	0,134	0,23	5,14	7,3	16,6
2019	704,1	0,27	0,34	0,34	1,55	0,91	0,13	0,110	0,16	5,12	7,7	14,3
2020	528,6	0,28	0,35	0,36	2,33	1,31	0,16	0,157	0,19	5,18	6,6	16,9
2021	573,6	0,29	0,33	0,36	1,97	1,08	0,15	0,124	0,18	5,18	6,6	15,2
2022	497,8	0,29	0,35	0,33	1,99	1,11	0,16	0,129	0,21	5,13	7,4	15,5
2023	685,6	0,36	0,33	0,36	2,73	1,47	0,19	0,180	0,21	5,14	7,3	18,4
1994-2022	660,6	0,46	0,41	0,41	1,64	0,94	0,11	0,117	0,19	4,76	17,4	18,9

Rok	Łęba									
	h	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	H ⁺
	mm	Ładunek roczny [mg/m ² rok]								
1994	660,9	548,5	337,1	317,2	1004,6	502,3	59,5	92,5	132,2	26,44
1995	560,5	498,8	285,9	285,9	1406,9	734,3	84,1	100,9	106,5	19,84
1996	574,2	470,8	298,6	321,6	746,5	396,2	68,9	57,4	143,6	17,23
1997	635,9	400,6	279,8	286,2	1062,0	585,0	44,5	76,3	120,8	15,58
1998	791,7	490,9	372,1	356,3	1274,6	672,9	63,3	95,0	158,3	19,79
1999	803,6	498,2	337,5	417,9	1358,1	731,3	96,4	104,5	192,9	15,67
2000	594,3	338,8	297,2	297,2	814,2	427,9	53,5	59,4	118,9	13,61
2001	786,6	416,9	338,2	338,2	1046,2	582,1	78,7	80,2	141,6	15,42
2002	746,0	387,9	328,2	358,1	850,4	477,4	67,1	73,1	164,1	15,59
2003	569,6	296,2	239,2	262,0	900,0	484,2	57,0	63,8	125,3	10,99
2004	826,5	355,4	330,6	314,1	1041,4	545,5	57,9	71,1	115,7	17,60
2005	478,6	268,0	244,1	229,7	765,8	382,9	43,1	55,0	119,7	12,59
2006	579,3	266,5	260,7	278,1	758,9	393,9	34,8	52,7	121,7	10,83
2007	775,2	302,3	302,3	294,6	1201,6	604,7	69,8	78,3	124,0	15,58
2008	674,2	290,6	300,3	279	1310,2	646,8	68,8	81,7	131,9	13,79
2009	681,7	238,6	218,1	211,3	1302	668,1	61,4	81,1	109,1	8,79
2010	909,0	300,0	300,0	309,1	845,4	454,5	72,7	54,5	136,4	12,18
2011	652,1	221,7	254,3	286,9	932,5	502,1	78,3	65,2	110,9	5,09
2012	868,4	277,9	330,0	338,7	1059,4	581,8	69,5	78,2	121,6	11,03
2013	740,2	288,7	281,3	259,1	1835,7	1065,9	96,2	133,2	162,8	10,58
2014	433,1	177,6	168,9	190,6	597,7	350,8	56,3	47,6	95,3	4,68
2015	493,2	172,6	197,3	192,3	1139,3	660,9	64,1	78,9	93,7	4,98
2016	663,4	192,4	225,6	225,6	1320,2	756,3	79,6	92,9	106,1	5,37
2017	832,9	208,2	266,5	241,5	1357,6	774,6	91,6	99,9	116,6	5,83
2018	523,5	162,3	204,2	204,2	978,9	586,3	73,3	68,1	120,4	3,82
2019	704,1	190,1	239,4	239,4	1091,4	640,7	91,5	77,5	112,7	5,42
2020	528,6	148,0	185,0	190,3	1231,6	692,5	84,6	84,6	100,4	3,49
2021	573,6	166,3	189,3	206,5	1130,0	619,5	86,0	68,6	103,2	3,79
2022	497,8	145,4	172,1	165,2	991,1	556,0	80,9	65,0	105,1	3,69
2023	685,6	246,8	226,2	246,8	1871,7	1007,8	130,3	123,4	144,0	5,00
1994-2022	660,6	300,7	268,4	272,3	1081,2	602,8	70,1	77,1	124,5	11,14

Rok	Puszcza Borecka											
	h	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	H _{obl} ⁺	przew.
	mm	stężenie średnie roczne [mg/dm ³]									µg/dm ³	µS/cm
1994	739,7	1,03	0,59	0,64	0,91	0,41	0,21	0,082	0,44	4,38	41,7	26,6
1995	699,1	0,85	0,46	0,76	0,64	0,25	0,32	0,073	0,33	4,46	34,7	21,2
1996	494,1	0,94	0,51	0,74	0,67	0,20	0,37	0,072	0,42	4,46	34,7	19,9
1997	611,0	0,59	0,48	0,55	0,71	0,28	0,16	0,064	0,28	4,79	16,2	15,8
1998	749,2	0,67	0,45	0,44	0,52	0,22	0,15	0,060	0,25	4,73	18,6	17,6
1999	653,1	0,59	0,46	0,43	0,44	0,21	0,16	0,064	0,25	4,66	21,9	18,1
2000	571,8	0,61	0,46	0,55	0,66	0,25	0,24	0,060	0,17	4,45	35,5	23,4
2001	756,5	0,62	0,39	0,53	0,46	0,16	0,13	0,052	0,22	4,72	18,9	19,2
2002	654,4	0,54	0,42	0,51	0,47	0,21	0,10	0,059	0,30	4,79	16,0	15,4
2003	580,4	0,45	0,34	0,43	0,43	0,18	0,11	0,044	0,20	4,81	15,5	12,8
2004	723,9	0,53	0,42	0,48	0,65	0,28	0,13	0,061	0,22	4,71	19,5	15,4
2005	690,2	0,50	0,42	0,50	0,43	0,17	0,17	0,073	0,19	4,78	16,6	14,0
2006	557,3	0,67	0,45	0,53	0,71	0,24	0,09	0,056	0,25	4,78	16,8	14,0
2007	827,2	0,53	0,45	0,52	0,81	0,36	0,09	0,066	0,22	4,86	13,9	14,8
2008	760,8	0,50	0,42	0,45	0,59	0,28	0,08	0,054	0,17	4,77	17,2	13,7
2009	695,7	0,40	0,38	0,40	0,33	0,14	0,05	0,038	0,15	4,88	13,2	11,4
2010	741,2	0,38	0,36	0,47	0,23	0,09	0,05	0,033	0,19	4,96	11,0	11,0
2011	629,0	0,45	0,43	0,52	0,44	0,19	0,08	0,051	0,20	4,94	11,4	12,3
2012	831,0	0,42	0,42	0,42	0,38	0,19	0,05	0,041	0,15	4,78	16,5	14,4
2013	786,3	0,34	0,36	0,42	0,33	0,11	0,04	0,035	0,14	4,89	12,8	11,6
2014	509,2	0,38	0,37	0,48	0,35	0,15	0,04	0,038	0,14	4,98	10,5	11,4
2015	637,6	0,35	0,39	0,53	0,60	0,30	0,07	0,055	0,15	5,02	9,7	12,8
2016	776,0	0,29	0,34	0,41	0,44	0,15	0,058	0,040	0,181	5,15	7,1	9,8
2017	940,0	0,25	0,32	0,42	0,56	0,20	0,054	0,038	0,121	5,19	6,4	9,7
2018	601,8	0,25	0,31	0,47	0,40	0,17	0,073	0,044	0,178	5,12	7,6	10,6
2019	631,9	0,30	0,29	0,49	0,43	0,19	0,069	0,056	0,273	5,42	3,8	10,2
2020	636,7	0,27	0,31	0,53	0,41	0,15	0,056	0,041	0,170	5,27	5,4	9,1
2021	650,8	0,22	0,28	0,49	0,36	0,12	0,057	0,037	0,170	5,42	3,8	8,2
2022	635,3	0,25	0,28	0,47	0,59	0,26	0,070	0,052	0,169	5,24	5,7	9,5
2023	619,7	0,22	0,29	0,55	0,59	0,29	0,071	0,060	0,223	5,33	4,7	9,3
1994-2022	681,8	0,48	0,40	0,50	0,52	0,21	0,11	0,052	0,21	4,80	15,9	14,2

Rok	<i>Puszcza Borecka</i>									
	h	S-SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	H ⁺
	mm	Ładunek roczny [mg/m ² rok]								
1994	739,7	762,2	436,9	474,0	674,6	300,6	152,8	60,6	328,1	30,84
1995	699,1	592,7	320,6	532,8	449,1	175,2	225,1	51,2	232,3	24,24
1996	494,1	463,3	253,8	364,9	329,8	100,8	182,8	35,7	206,0	17,13
1997	611,0	361,4	293,7	337,6	432,6	169,0	99,8	39,2	168,4	9,91
1998	749,2	501,7	336,5	327,9	389,5	166,8	113,9	44,9	186,3	13,95
1999	653,1	385,7	299,1	282,5	287,9	138,6	106,4	41,6	165,0	14,29
2000	571,8	348,3	264,3	316,0	378,8	144,4	136,8	34,1	97,3	20,29
2001	756,5	470,7	298,8	402,7	349,9	121,6	94,9	39,2	167,1	14,29
2002	654,4	356,6	274,0	331,4	308,9	138,9	67,7	38,4	195,8	10,50
2003	580,4	263,5	197,4	246,9	249,5	104,8	66,3	25,4	113,4	8,98
2004	723,9	379,9	302,2	345,0	464,8	200,2	90,2	43,9	163,0	14,11
2005	690,2	345,1	289,9	345,1	296,8	118,0	50,4	29,7	133,9	11,45
2006	557,3	373,4	250,8	295,4	395,7	131,5	49,6	31,2	141,0	9,50
2007	827,2	438,4	372,2	430,1	670,0	301,1	71,1	54,6	184,5	11,60
2008	760,8	380,3	328,7	342,1	464,2	223,8	62,2	42,3	124,3	13,20
2009	695,7	291,0	277,6	286,2	238,6	98,3	36,9	27,3	104,7	10,30
2010	741,2	285,6	272,9	346,1	175,6	63,9	40,5	24,5	138,1	8,00
2011	629,0	286,0	272,3	327,1	285,6	138,0	50,0	33,4	126,7	7,30
2012	831,0	345,0	349,1	350,4	319,3	156,0	44,0	34,4	126,3	13,69
2013	786,3	265,5	284,9	330,7	260,8	90,2	30,1	27,7	109,0	10,10
2014	509,2	194,3	189,5	243,6	181,8	77,0	22,6	18,9	68,9	5,43
2015	637,6	221,2	245,9	337,2	381,1	190,1	44,4	35,3	97,1	6,14
2016	776,0	226,0	264,3	319,4	343,6	116,7	45,0	31,0	140,6	5,54
2017	940,0	233,7	304,5	399,4	524,0	186,7	50,6	35,6	113,3	6,01
2018	601,8	150,1	189,3	280,7	237,7	99,8	43,6	26,8	107,2	4,59
2019	631,9	189,2	183,5	307,6	272,8	119,1	43,5	35,6	172,5	2,43
2020	636,7	171,6	196,2	334,4	259,4	97,1	35,9	26,3	108,3	3,45
2021	650,8	144,1	182,5	319,1	231,7	80,0	37,2	24,2	110,9	2,46
2022	635,3	159,2	179,0	296,6	375,5	164,0	44,4	32,8	107,2	3,66
2023	619,7	137,2	181,1	338,4	367,5	178,0	43,8	37,5	138,0	3,30
1994-2022	681,8	330,5	272,8	339,8	352,7	145,2	73,7	35,4	146,1	10,8

6.3. Metale ciężkie w opadzie

Wybrane metale ciężkie przez wiele lat były oznaczane w próbkach opadów w ramach sieci EMEP w Polsce na stacji w Łebie (od 1991 roku), a od 2003 roku badania prowadzone są także na stacji Puszcza Borecka. W latach 2003-2009 oznaczane były na Stacji Puszcza Borecka w próbkach opadu mokrego, a od 2010 roku oznaczane są w próbkach opadu całkowitego. Zmiana sposobu oznaczania wynikała z wymagań postawionych przez *Dyrektywę 2004/107/WE*. Przebiegi wartości stężeń w poszczególnych latach zilustrowano na rysunkach 6.7 i 6.8; dane o stężeniach metali ciężkich oraz ładunkach wprowadzanych do podłoża zawarto w tabelach 6.3 i 6.4.

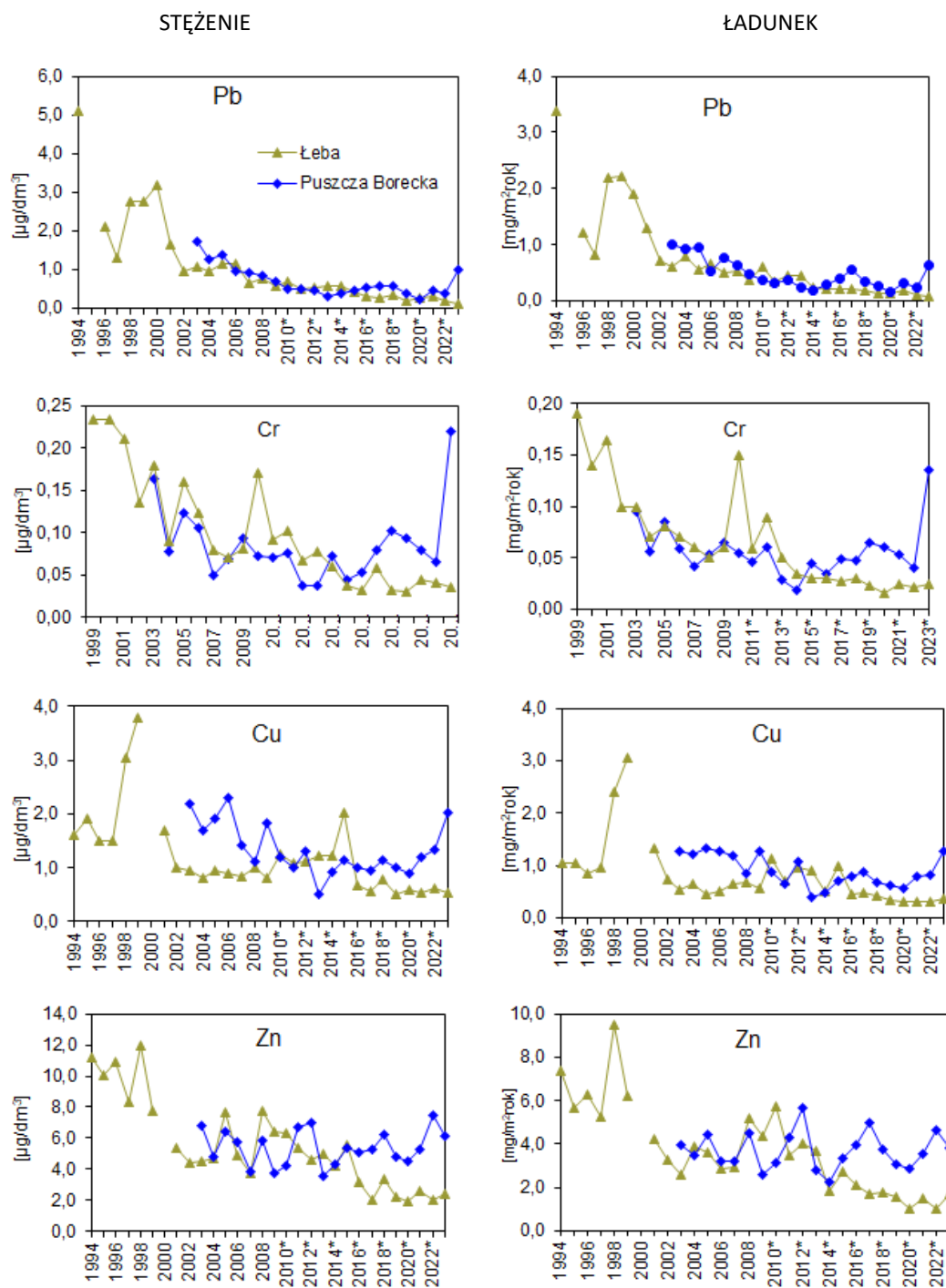
Spośród badanych metali ciężkich w największej ilości występują w opadzie cynk, a następnie miedź, ołów i nikiel, najmniej jest w wodzie opadowej arsenu, chromu i kadmu.

Stężenia ołowiu na stacji w Łebie po obniżeniu w latach 1996, 1997 i znacznym wzroście w latach 1998-2000 od roku 2002 ustabilizowały się na pięć lat na stałym poziomie ok. $1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, a następnie systematycznie, choć powoli malały. Stężenia na podobnym poziomie występowały na stacji Puszcza Borecka od roku 2004, przy czym w latach 2014-2017 tendencja spadkowa została odwrócona i odnotowano powolny wzrost stężeń Pb, a w latach 2018-2020 znów zaczęły one spadać, by się zrównać w 2020. W kolejnych 3 latach stężenia na stacji w Łebie nieznacznie malały, a w Puszczy Boreckiej rosły, szczególnie w 2023 roku. Do roku 2015 podobny przebieg na obu stacjach przedstawiały także ładunki ołowiu wprowadzane do ekosystemu, a w kolejnych latach odnotowano wzrosty i spadki na stacji Puszcza Borecka, przy niemal niezmiennych wartościach w Łebie. W odniesieniu do wartości średnich stężenie ołowiu na stacji w Łebie było w roku 2023 niższe, a w Puszczy Boreckiej wyższe a różnice względne wyniosły -88% w Łebie (w odniesieniu do wartości z wielolecia 1999-2020) i 56% w Puszczy Boreckiej (w odniesieniu do wielolecia 2003-2020); ładunek ołowiu w Łebie był o 88% niższy od średniego w wieloleciu, a w Puszczy Boreckiej był o 33% wyższy.

Obserwuje się spadkową tendencję stężeń i ładunków chromu na stacjach w Łebie i Puszczy Boreckiej. Poza rokiem 2009 (wyższe wartości w Łebie) i 2023 (wyższe wartości w Puszczy Boreckiej) stężenia i ładunki tego metalu do 2018 roku były na obydwu stacjach bardzo zbliżone. W ostatnich latach wyższe wartości notowano w Puszczy Boreckiej, a szczególnie w 2023 roku. Stężenie Cr w Łebie było w 2023 roku o 60% niższe od średniego z lat 1999-2022, a w Puszczy Boreckiej o 201% wyższe od średniego z lat 2003-2022 (zmiana metody oznaczeń). Dla ładunków zaobserwowano wartość niższą o 64% w Łebie i wyższą o 157% w Puszczy Boreckiej.

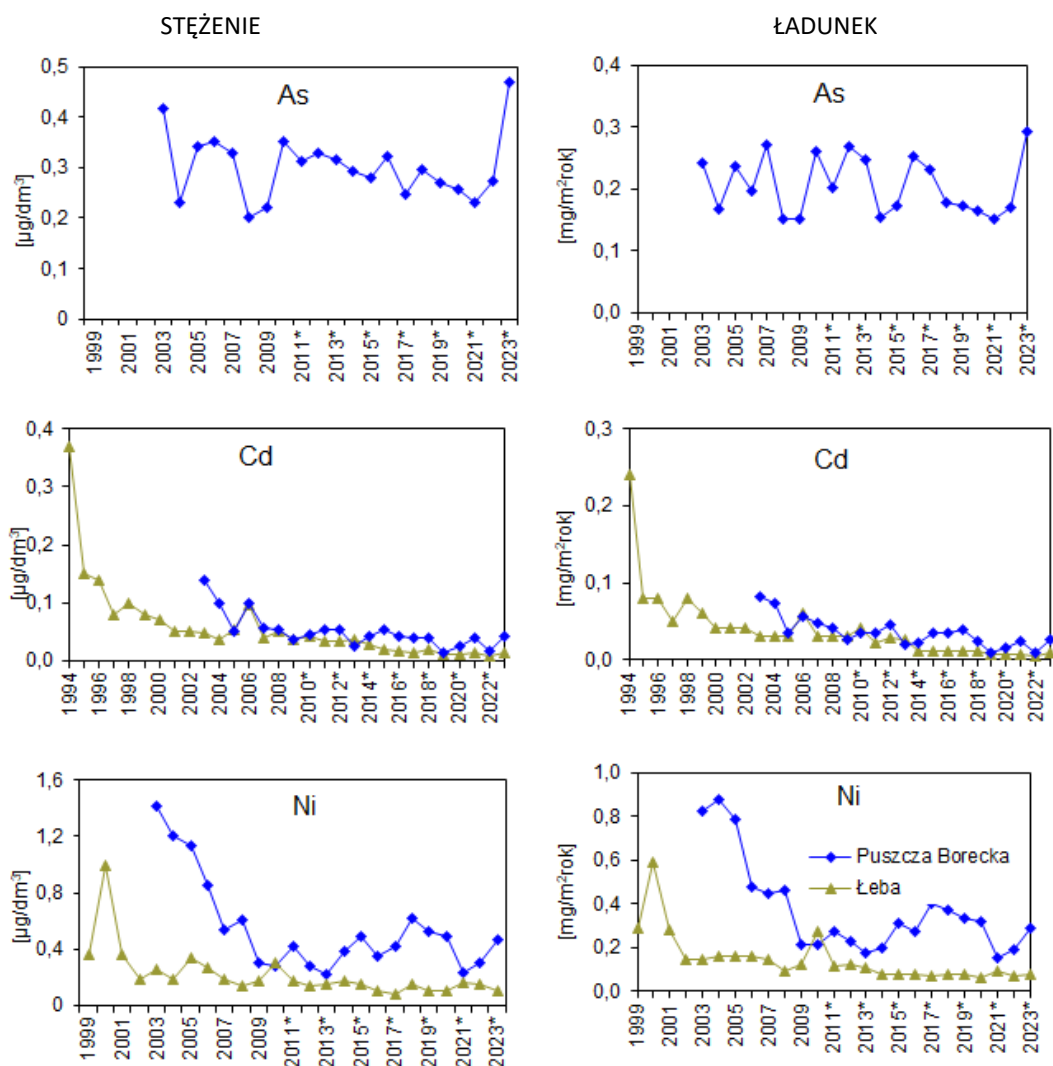
Stężenie miedzi było dosyć zróżnicowane w kolejnych latach. W Łebie, po zbliżonych wartościach notowanych w pierwszych czterech latach, w latach 1998-1999 zaobserwowano znaczący wzrost stężeń. W okresie 2002-2014 stężenie miedzi w opadach ustabilizowało się na poziomie ok. $1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, by wzrosnąć w roku 2015; w latach 2016-2023 odnotowano najniższe wartości. Wyższe stężenia obserwowane były na stacji Puszcza Borecka, ale od roku 2010 znacznie się zbliżyły do wartości z Łeby, a w 2013 były o ponad połowę niższe niż na tej stacji, w 2014 roku znowu się zbliżyły, by w 2015 różnić się po raz kolejny (niższe niż w Łebie) i zbliżyć w latach 2016-2020 (wyższe niż w Łebie). Od roku 2021 stężenia miedzi w Puszczy Boreckiej znowu zaczęły rosnąć. W 2023 roku zanotowano stężenie i ładunek Cu niższe od

średniego w wieloleciu w Łębie (stężenie o 56%, a ładunek o 56%), a wyższe w Puszczy Boreckiej (odpowiednio o 66% w przypadku stężenia i o 42% w przypadku ładunku).



* od 2010 roku na stacji Puszcza Borecka stężenia metali ciężkich oznaczane są w opadzie

Rys. 6.7. Stężenia i ładunki wybranych metali ciężkich w opadach atmosferycznych w rejonach badań tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce (Łeba i Puszcza Borecka). Źródło danych: PMS



* od 2010 roku na stacji Puszcza Borecka stężenia metali ciężkich oznaczane są w opadzie całkowitym

Rys. 6.8. Stężenia i ładunki wybranych metali ciężkich w opadach atmosferycznych w rejonach badań tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce (Łeba i Puszcza Borecka). Źródło danych: PMŚ

Stężenie cynku na stacji w Łebie było wyższe w pierwszych pięciu latach, a niższe w kolejnych, przyjmując wartości minimalne w latach 2019-2023. Stężenia obserwowane na obu stacjach od roku 2003 do 2015 były zbliżone, a w ostatnich latach zmalały tylko w Łebie. Wykazywały one jednak w niektórych latach skokowe zmiany. W stosunku do średniej wieloletniej wartości z dostępnych serii pomiarowych stężenie cynku w roku 2023 było o 56% niższe w Łebie, ale o 22% wyższe w Puszczy Boreckiej. Ze względu na podobną zmienność rocznych wysokości opadów na obu stacjach zmienność ładunków z roku na rok i tendencje zmian w wieloleciu były zbliżone do zmienności stężeń. Roczny ładunek w roku 2023 był niższy od średniego o 56% w Łebie i wyższy o 4% w Puszczy Boreckiej.

Stężenia i ładunki arsenu, mierzonego tylko na Stacji Puszcza Borecka, w początkowym okresie nie wykazywały większych prawidłowości, wahając się w poszczególnych latach dość znacznie, szczególnie w przypadku ładunków. W latach 2011-2022 ustabilizowały się z niewielką tendencją malejącą, a w 2023 roku wzrosły (zmiana metody oznaczeń). Stężenie As w roku

2023 było wyższe od średniego w okresie 2003-2022 o 69%, a ładunek o 44% od średniego w tych latach.

Stężenia kadmu w roku 2023 na stacji w Łebie spadły o 78% w stosunku do średniej z lat 1994-2022, a w Puszczy Boreckiej o 12% w stosunku do wartości średniej z lat 2003-2022. Na obydwu stacjach od roku 2005 stężenia i ładunki były bardzo zbliżone, z nieznacznym wzrostem w Puszczy Boreckiej w latach 2015-2018 i wahaniami w kolejnych latach.

Zawartość niklu w opadach w Puszczy Boreckiej w początkowym okresie była znacząco większa niż w Łebie, a następnie wyraźnie spadła i w 2009 roku zbliżyła się do wartości notowanych w Łebie, w latach 2014-2019 znowu wzrosła, oddalając się od poziomu obserwowanego na stacji nadmorskiej, by w 2021 zrównać się a w kolejnych dwóch latach wzrosnąć. Zmienność stężeń z roku na rok w Łebie była niewielka (poza pikiem odnotowanym w 2000 roku). Stężenie Ni w Łebie w 2023 roku było o 41% niższe od średniego z okresu 1999-2022, a w Puszczy Boreckiej o 4% niższe od średniego z okresu 2003-2022. Natomiast ładunki były niższe o 47% w Łebie i o 22% w Puszczy Boreckiej.

Tabela 6.3. Stężenie metali ciężkich w wodzie opadowej na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Łebie i Puszczy Boreckiej. Źródło danych: PMŚ

Objaśnienia: 'x' – brak pomiarów, '-' – niepełna seria roczna (<75% wartości), uniemożliwiająca obliczenie średniej

Rok	Łeba							Rok	Puszcza Borecka								
	h	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni		h	Pb	Cd	Cu	Zn	As	Cr	Ni	Hg
	mm	stężenie roczne [µg/dm³]							mm	stężenie roczne [µg/dm³]							
1994	660,9	5,100	0,370	1,600	11,20	x	x	1994	739,7	x	x	x	x	x	x	x	x
1995	560,5	-	0,150	1,900	10,10	x	x	1995	699,1	x	x	x	x	x	x	x	x
1996	574,2	2,100	0,140	1,500	10,90	x	x	1996	494,1	x	x	x	x	x	x	x	x
1997	635,9	1,300	0,080	1,500	8,30	x	x	1997	611,0	x	x	x	x	x	x	x	x
1998	791,7	2,760	0,100	3,030	12,01	x	x	1998	749,2	x	x	x	x	x	x	x	x
1999	803,6	2,750	0,080	3,800	7,75	0,233	0,360	1999	653,1	x	x	x	x	x	x	x	x
2000	594,3	3,190	0,070	-	-	0,233	0,990	2000	571,8	x	x	x	x	x	x	x	x
2001	786,6	1,660	0,052	1,680	5,4	0,210	0,360	2001	756,5	x	x	x	x	x	x	x	x
2002	746,0	0,960	0,051	0,990	4,41	0,136	0,190	2002	654,4	x	x	x	x	x	x	x	x
2003	569,6	1,080	0,048	0,950	4,55	0,180	0,260	2003	580,4	1,730	0,140	2,180	6,85	0,416	0,164	1,422	x
2004	826,5	0,960	0,036	0,800	4,73	0,090	0,190	2004	723,9	1,260	0,100	1,680	4,78	0,230	0,078	1,209	0,025
2005	478,6	1,160	0,055	0,940	7,62	0,160	0,340	2005	690,2	1,380	0,050	1,920	6,42	0,343	0,123	1,140	0,020
2006	579,3	1,150	0,097	0,900	4,94	0,123	0,270	2006	557,3	0,970	0,101	2,284	5,75	0,352	0,106	0,853	0,015
2007	775,2	0,650	0,039	0,840	3,77	0,080	0,190	2007	827,2	0,919	0,057	1,426	3,89	0,329	0,050	0,539	0,077
2008	674,2	0,780	0,051	0,990	7,72	0,071	0,140	2008	763,6	0,831	0,053	1,117	5,88	0,200	0,069	0,604	0,046
2009	681,7	0,560	0,038	0,820	6,38	0,082	0,180	2009	695,8	0,691	0,038	1,826	3,70	0,219	0,094	0,308	0,070
2010	909,0	0,680	0,044	1,250	6,31	0,170	0,300	2010*	743,4	0,504	0,047	1,188	4,24	0,350	0,073	0,286	0,010
2011	652,1	0,510	0,034	1,080	5,37	0,091	0,170	2011*	643,9	0,484	0,054	1,015	6,69	0,312	0,071	0,424	0,030
2012	868,4	0,540	0,034	1,100	4,62	0,102	0,140	2012*	813,0	0,460	0,055	1,309	7,00	0,330	0,075	0,277	0,043
2013	740,2	0,590	0,036	1,210	4,98	0,067	0,150	2013*	786,2	0,313	0,025	0,512	3,53	0,315	0,037	0,219	0,041
2014	433,1	0,580	0,028	1,210	4,22	0,078	0,180	2014*	522,4	0,367	0,042	0,916	4,36	0,294	0,037	0,380	0,008***
2015	493,2	0,420	0,019	2,010	5,60	0,060	0,150	2015*	623,7	0,466	0,055	1,151	5,41	0,278	0,073	0,494	0,007***
2016	663,4	0,300	0,016	0,670	3,14	0,038	0,110	2016*	784,8	0,518	0,044	1,007	5,05	0,323	0,044	0,348	0,003
2017	832,9	0,250	0,013	0,570	2,01	0,033	0,080	2017*	935,7	0,587	0,040	0,944	5,32	0,246	0,053	0,427	0,006
2018	523,5	0,350	0,021	0,780	3,33	0,058	0,150	2018*	601,3	0,575	0,039	1,132	6,23	0,295	0,079	0,622	0,002
2019	704,1	0,200	0,010	0,500	2,24	0,032	0,100	2019*	635,8	0,397	0,013	0,998	4,78	0,271	0,102	0,529	0,002
2020	528,6	0,250	0,011	0,590	1,92	0,030	0,110	2020*	643,0	0,243	0,024	0,898	4,49	0,256	0,094	0,489	0,010
2021	574,1	0,320	0,013	0,530	2,63	0,044	0,160	2021*	667,4	0,476	0,040	1,190	5,29	0,230	0,080	0,230	0,006
2022	497,8	0,190	0,009	0,620	2,01	0,041	0,150	2022*	617,9	0,378	0,016	1,334	7,47	0,274	0,066	0,304	0,003
2023	685,6	0,130	0,013	0,530	2,40	0,035	0,110	2023*	619,7	1,002	0,043	2,033	6,17	0,470	0,220	0,470	0,005
1994-2022**	660,7	1,109	0,060	1,216	5,506	0,087	0,187	2003-2022	692,8	0,643	0,048	1,224	5,08	0,278	0,073	0,517	0,030

*) od 2010 roku na stacji Puszcza Borecka stężenia metali ciężkich oznaczane są w opadzie całkowitym ***) 1999-2020 dla Cr i Ni na stacji w Łebie ***) trzy kwartały

Tabela 6.4. Depozycja metali ciężkich w wodzie opadowej na stacjach tła zanieczyszczenia atmosfery w Łebie i Puszczy Boreckiej. Źródło danych: PMŚ

Objaśnienia: 'x' – brak pomiarów, '-' - niepełna seria roczna (<75% wartości), uniemożliwiająca obliczenie średniej

Rok	Łeba							Rok	Puszcza Borecka								
	h	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni		h	Pb	Cd	Cu	Zn	As	Cr	Ni	Hg
	mm	depozycja roczna [mg/m²rok]							mm	depozycja roczna [mg/m²rok]							
1994	660,9	3,370	0,240	1,060	7,4	x	x	1994	739,7	x	x	x	x	x	x	x	x
1995	560,5	-	0,080	1,060	5,66	x	x	1995	699,1	x	x	x	x	x	x	x	x
1996	574,2	1,210	0,080	0,860	6,26	x	x	1996	494,1	x	x	x	x	x	x	x	x
1997	635,9	0,830	0,050	0,950	5,28	x	x	1997	611,0	x	x	x	x	x	x	x	x
1998	791,7	2,190	0,080	2,400	9,51	x	x	1998	749,2	x	x	x	x	x	x	x	x
1999	803,6	2,210	0,060	3,050	6,23	0,190	0,289	1999	653,1	x	x	x	x	x	x	x	x
2000	594,3	1,900	0,040	-	-	0,140	0,588	2000	571,8	x	x	x	x	x	x	x	x
2001	786,6	1,300	0,041	1,320	4,24	0,165	0,283	2001	756,5	x	x	x	x	x	x	x	x
2002	746,0	0,720	0,040	0,740	3,29	0,100	0,142	2002	654,4	x	x	x	x	x	x	x	x
2003	569,6	0,620	0,030	0,540	2,59	0,100	0,148	2003	580,4	1,004	0,081	1,265	3,98	0,241	0,095	0,825	x
2004	826,5	0,790	0,030	0,660	3,91	0,070	0,157	2004	723,9	0,912	0,072	1,216	3,46	0,167	0,056	0,875	0,021
2005	478,6	0,560	0,030	0,450	3,65	0,080	0,163	2005	690,2	0,952	0,035	1,325	4,43	0,237	0,085	0,787	0,010
2006	579,3	0,670	0,060	0,520	2,86	0,070	0,156	2006	557,3	0,541	0,056	1,273	3,20	0,196	0,059	0,475	0,009
2007	775,2	0,500	0,030	0,650	2,92	0,060	0,147	2007	827,2	0,760	0,047	1,179	3,22	0,272	0,042	0,446	0,060
2008	674,2	0,530	0,030	0,670	5,20	0,050	0,094	2008	763,6	0,635	0,041	0,853	4,49	0,153	0,053	0,462	0,031
2009	681,7	0,380	0,030	0,560	4,35	0,060	0,123	2009	695,8	0,481	0,026	1,270	2,57	0,153	0,065	0,214	0,048
2010	909,0	0,620	0,040	1,140	5,74	0,150	0,273	2010*	743,4	0,374	0,035	0,883	3,15	0,260	0,054	0,213	0,009
2011	652,1	0,330	0,022	0,700	3,50	0,059	0,113	2011*	643,9	0,311	0,034	0,654	4,31	0,201	0,045	0,273	0,020
2012	868,4	0,460	0,029	0,950	4,01	0,089	0,121	2012*	813,0	0,374	0,045	1,064	5,69	0,268	0,061	0,225	0,035
2013	740,2	0,440	0,026	0,900	3,69	0,050	0,110	2013*	786,2	0,246	0,019	0,403	2,77	0,248	0,029	0,172	0,032
2014	433,1	0,250	0,012	0,520	1,83	0,034	0,077	2014*	522,4	0,192	0,022	0,478	2,28	0,153	0,019	0,199	0,003***
2015	493,2	0,210	0,010	0,990	2,76	0,030	0,073	2015*	623,7	0,291	0,034	0,718	3,37	0,173	0,045	0,308	0,004***
2016	663,4	0,200	0,010	0,450	2,08	0,030	0,080	2016*	784,8	0,406	0,034	0,790	3,96	0,253	0,034	0,273	0,002
2017	832,9	0,210	0,011	0,470	1,68	0,027	0,067	2017*	935,7	0,549	0,038	0,883	4,98	0,231	0,049	0,399	0,005
2018	523,5	0,180	0,011	0,410	1,74	0,030	0,077	2018*	601,3	0,346	0,024	0,681	3,75	0,177	0,048	0,374	0,001
2019	704,1	0,140	0,007	0,350	1,58	0,023	0,073	2019*	635,8	0,252	0,008	0,634	3,04	0,172	0,065	0,337	0,001
2020	528,6	0,130	0,006	0,310	1,02	0,016	0,058	2020*	643,0	0,156	0,016	0,578	2,88	0,165	0,061	0,314	0,007
2021	574,1	0,190	0,007	0,300	1,51	0,025	0,093	2021*	667,4	0,318	0,023	0,793	3,53	0,151	0,054	0,150	0,004
2022	497,8	0,100	0,005	0,310	1,00	0,021	0,072	2022*	617,9	0,233	0,010	0,824	4,61	0,169	0,041	0,188	0,002
2023	685,6	0,090	0,009	0,370	1,67	0,025	0,079	2023*	619,7	0,621	0,026	1,260	3,83	0,291	0,136	0,291	0,003
1994-2022**	660,7	0,759	0,040	0,832	3,768	0,070	0,149	2003-2022	692,8	0,467	0,035	0,888	3,684	0,202	0,053	0,375	0,017

*) od 2010 roku na stacji Puszcza Borecka stężenia metali ciężkich oznaczane są w opadzie całkowitym ***) 1999-2020 dla Cr i Ni na stacji w Łebie ***) trzy kwartały

6.4. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w opadzie

Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w opadach badane są na stacji Puszcza Borecka od 2008 roku w myśl Dyrektywy 2004/107/WE.

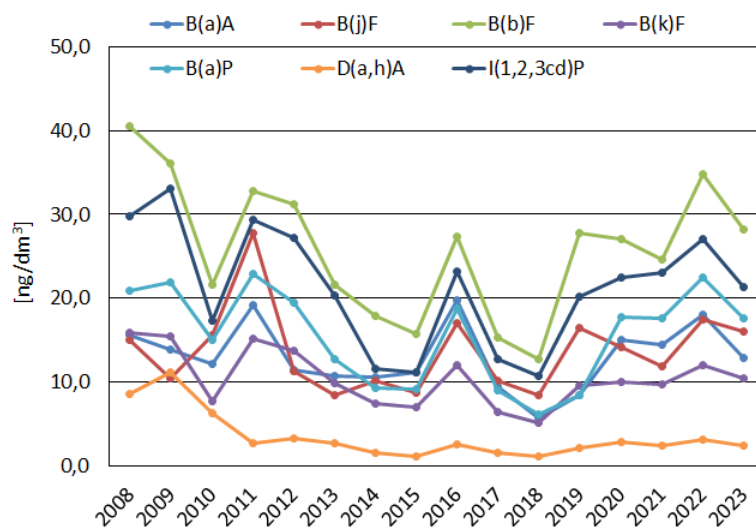
W największych ilościach w opadach występował benzo(b)fluoranten i indeno(1,2,3-cd)piren, a w najmniejszych – dibenzo(a,h)antracenu. Jest to obraz ukształtowany w wieloleciu 2008-2023, obserwowany regularnie w poszczególnych latach (Rys. 6.9).

Stężenie sumy WWA oznaczanych w opadach osiągnęło w roku 2023 wartość o 3% wyższą niż średnia z lat 2008-2022 (Tab. 6.5). Stężenia większości badanych WWA, oprócz benzo(j)fluorantenu, benzo(b)fluorantenu i benzo(a)pirenu były w roku 2023 mniejsze od średniej z piętnastu poprzednich lat. Względne różnice wyniosły od -31% dla dibenzo(a,h)antracenu do 20% dla benzo(j)fluorantenu.

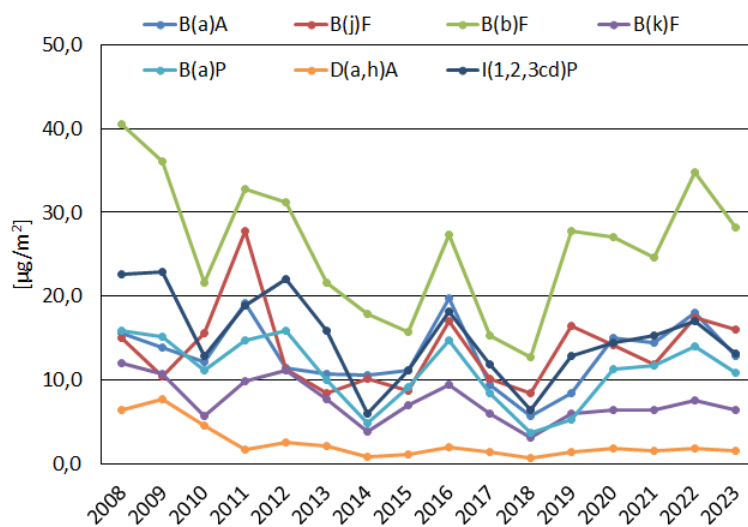
Tabela 6.5. Wartości średnich rocznych stężeń WWA w opadach atmosferycznych oraz roczne sumy opadów na Stacji Puszcza Borecka w latach 2008 – 2023. Źródło danych: PMŚ

Rok	B(a)A	B(j)F	B(b)F	B(k)F	B(a)P	D(a,h)A	I(1,2,3-cd)P	suma WWA	Wysokość opadu
	[ng/dm ³]							[ng/dm ³]	[mm]
2008	15,62	14,99	40,49	15,84	20,85	8,54	29,79	144,88	760,8
2009	13,96	10,42	36,11	15,49	21,98	11,13	33,06	147,38	692,5
2010	12,15	15,60	21,62	7,78	15,01	6,26	17,29	95,71	743,4
2011	19,14	14,62	32,83	15,24	22,88	2,74	29,28	135,18	643,9
2012	11,52	11,28	31,14	13,69	19,52	3,27	27,16	116,49	813,0
2013	10,80	8,40	21,56	9,93	12,77	2,70	20,28	91,69	786,2
2014	10,62	10,16	17,88	7,45	9,31	1,57	11,54	70,79	522,4
2015	11,13	8,74	15,79	6,99	9,23	1,18	11,11	64,16	623,7
2016	19,72	17,06	27,38	12,01	18,80	2,57	23,24	120,80	784,2
2017	9,50	10,16	15,31	6,41	9,05	1,53	12,69	64,65	935,7
2018	5,77	8,51	12,70	5,23	6,13	1,20	10,73	50,27	601,3
2019	8,46	16,50	27,77	9,58	8,44	2,17	20,19	93,10	635,9
2020	15,03	14,24	26,99	10,07	17,69	2,94	22,43	109,39	643,0
2021	14,49	11,84	24,68	9,75	17,64	2,38	23,05	103,82	667,4
2022	18,07	17,43	34,75	12,09	22,41	3,10	27,13	134,99	625,9
2023	12,96	16,03	28,25	10,46	17,69	2,51	21,36	109,27	619,7
średnia 2008-2022	13,48	13,39	26,44	10,82	16,25	3,66	21,82	106,03	698,7

Układ stężeń WWA przełożył się na układ ładunków – największe dla benzo(b)fluorantenu, a w najmniejsze – dibenzo(a,h)antracenu (Rys. 6.10).



Rys. 6.9. Średnie roczne stężenia WWA w opadach całkowitych na Stacji Puszcza Borecka w latach 2008 – 2023. Źródło danych: PMŚ



Rys. 6.10. Roczne ładunki WWA wniesione do podłoża na Stacji Puszcza Borecka w latach 2008 – 2023. Źródło danych: PMŚ

Utrzymanie stężenia WWA na poziomie średnim wraz ze zmniejszeniem rocznej wysokości opadów spowodowało, że roczny ładunek sumy WWA był o 9% mniejszy od wartości uśrednionej z lat 2008-2022 (Tab. 6.6). Wartości ładunków poszczególnych WWA były na ogół mniejsze od średnich z wielolecia, a względne różnice pomiędzy depozycją w roku 2023 a średnią dla tych związków wyniosły od -39% dla dibenzo(a,h)antracenu do 6% dla

benzo(j)fluorantenu (tylko dla B(j)F odnotowano wzrost). Do obliczania wielkości depozycji WWA wykorzystywano wysokość opadu zmierzoną deszczomierzem Hellmanna.

Tabela 6.6. Wartości rocznych ładunków WWA i sum opadów na Stacji Puszcza Borecka w latach 2008 – 2023. Źródło danych: PMS

Rok	B(a)A	B(j)F	B(b)F	B(k)F	B(a)P	D(a,h)A	I(1,2,3-cd)P	suma WWA	Wysokość opadu
	[μg/m ²]							[μg/m ²]	[mm]
2008	11,886	11,407	30,802	12,047	15,866	6,500	22,667	110,222	760,8
2009	9,665	7,219	25,009	10,729	15,220	7,706	22,892	102,061	692,5
2010	9,034	11,598	16,071	5,786	11,156	4,650	12,855	71,149	743,4
2011	12,349	9,416	21,180	9,832	14,762	1,769	18,888	87,208	645,1
2012	9,365	9,170	25,316	11,131	15,870	2,655	22,085	94,710	813,0
2013	8,492	6,604	16,949	7,804	10,039	2,125	15,944	72,084	786,2
2014	5,547	5,306	9,339	3,893	4,865	0,822	6,026	36,974	522,3
2015	11,128	8,739	15,788	6,992	9,235	1,179	11,106	64,165	623,7
2016	15,462	13,377	21,471	9,415	14,745	2,017	18,226	94,731	784,2
2017	8,893	9,506	14,322	5,997	8,466	1,428	11,878	60,491	935,7
2018	3,472	5,116	7,636	3,146	3,686	0,721	6,451	30,228	601,3
2019	5,378	10,490	17,656	6,092	5,364	1,379	12,839	59,199	635,9
2020	9,667	9,155	17,357	6,472	11,377	1,888	14,421	70,338	643,0
2021	9,669	7,899	16,470	6,509	11,771	1,591	15,383	69,292	667,4
2022	11,311	10,911	21,748	7,570	14,029	1,941	16,980	84,489	625,9
2023	8,029	9,936	17,508	6,483	10,960	1,558	13,238	67,713	619,7
średnia 2008-2022	9,421	9,358	18,474	7,561	11,355	2,558	15,243	74,081	698,7

7. Depozycja zanieczyszczeń do podłoża w 2023 roku na tle wielolecia

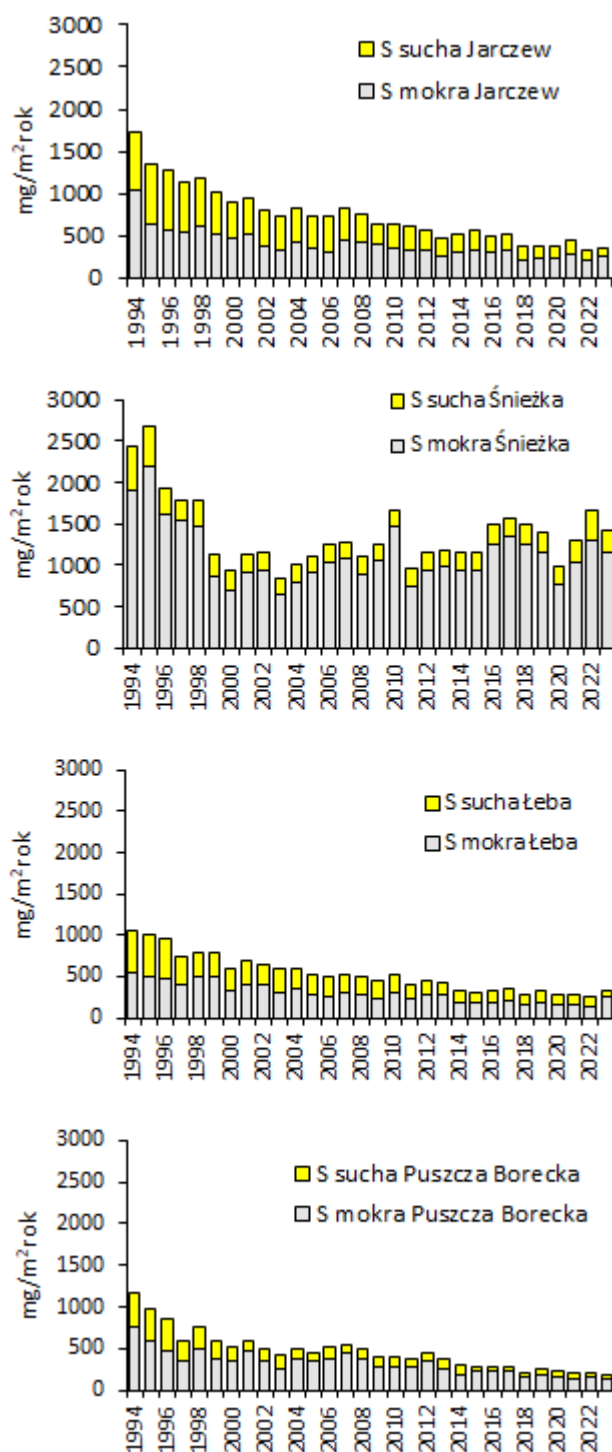
Roczną suchą depozycję tlenowych związków siarki i azotu określono, podobnie jak w latach ubiegłych, mierząc stężenia tych związków w powietrzu oraz zakładając prędkość ich osiadania [Lehmhaus i in., 1986]. Oszacowano również roczną depozycję jonu wodorowego związaną z depozycją dwutlenku siarki. Mokłą depozycję tlenowych związków siarki, azotu oraz jonu wodorowego przyjęto na podstawie pomiarów i obliczeń (jon wodorowy z pH opadu) (Tabela 6.2). Na rysunku 7.1 przedstawiono przebieg wartości suchej i mokrej depozycji tlenowych związków siarki i azotu oraz jonu wodorowego dla stacji sieci EMEP w Polsce w latach 1994-2023.

W Jarczewie udziały suchej i mokrej depozycji tlenowych związków siarki w depozycji całkowitej były w okresie wielolecia dla kolejnych lat bliskie 50% (z tendencją wzrostową udziału mokrej depozycji w całkowitej w ostatnich latach). Podobne jak w Jarczewie, udziały suchej i mokrej depozycji związków siarki obserwowano na stacji w Łebie. Tutaj jednak przewagę miała depozycja mokra nad depozycją suchą (średni udział depozycji mokrej w całkowitej w wieloleciu wyniósł 58%).

Zdecydowana przewaga depozycji mokrej tlenowych związków siarki nad depozycją suchą występowała w okresie wielolecia na stacjach: Puszcza Borecka oraz szczególnie, na Śnieżce. Na tej ostatniej stacji średnio ponad 80% związków siarki docierało do podłoża z opadem atmosferycznym, a tylko ok. 20% w wyniku suchego osiadania.

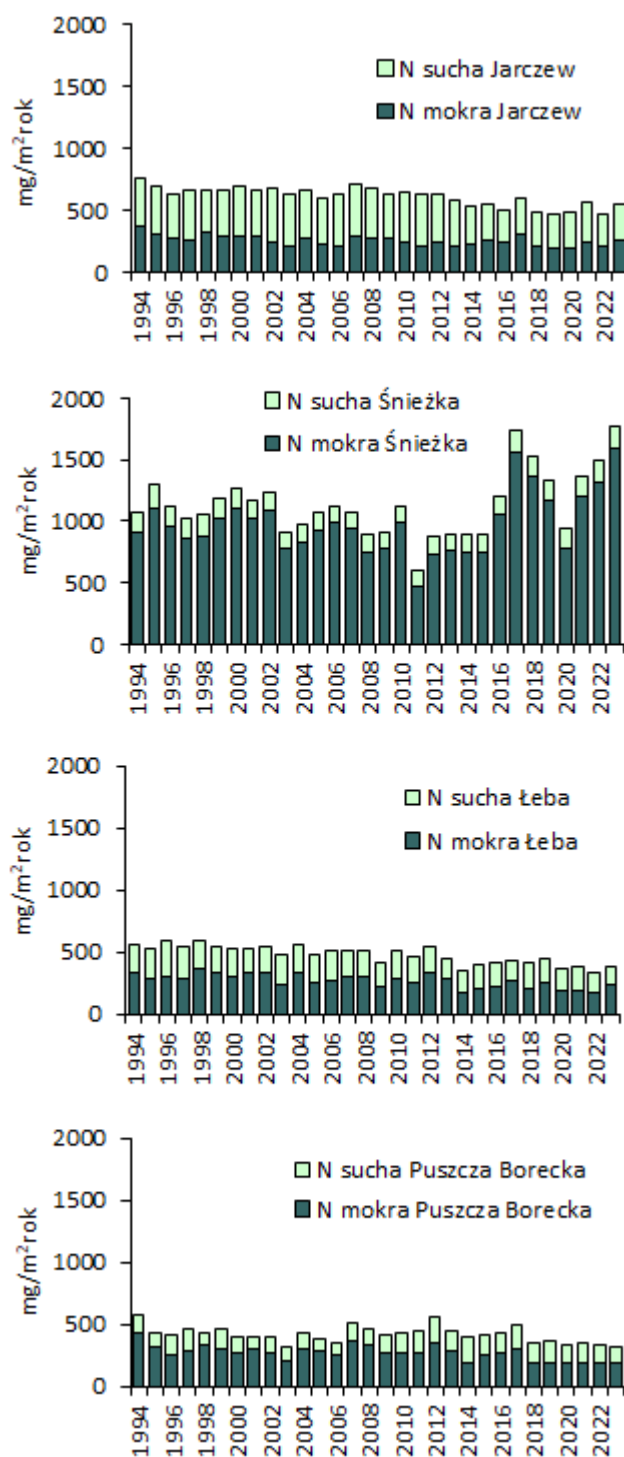
Tlenowe związki azotu docierały do podłoża na stacji w Jarczewie w większej ilości w wyniku suchej depozycji (poza rokiem 2017). Na stacji w Łebie udział suchej i mokrej depozycji tych związków w depozycji całkowitej był prawie równy w okresie wielolecia, ze wzrostem udziału mokrej depozycji w całkowitej w ostatnich latach (poza rokiem 2014 i 2018, gdy dominowała sucha i 2021, gdy się zrównały). Przewaga depozycji mokrej nad suchą miała miejsce na stacji w Puszczy Boreckiej (poza rokiem 2014), a w szczególności była ona widoczna na Śnieżce, gdzie we wszystkich latach (poza 2011) stanowiła ponad 80%, często blisko 90%.

Jon wodorowy docierał do podłoża w przeważającej ilości w wyniku suchej depozycji na stacji w Jarczewie. Średnio 66% depozycji tego jonu w wieloleciu odbywało się tą drogą. Na stacjach w Łebie i w Puszczy Boreckiej depozycja jonu wodorowego rozłożona była bardziej równomiernie. Można stwierdzić, że w Puszczy Boreckiej średnio ok. 40% stanowiła depozycja sucha, a kolejne 60% depozycja mokra, zaś w Łebie średnio było to po ok. 50% dla obu procesów, przy zmienności z roku na rok zależnej głównie od sum opadów. Podobnie jak dla związków siarki i azotu, na Śnieżce jon wodorowy dostarczany był średnio w 73% w depozycji mokrej.



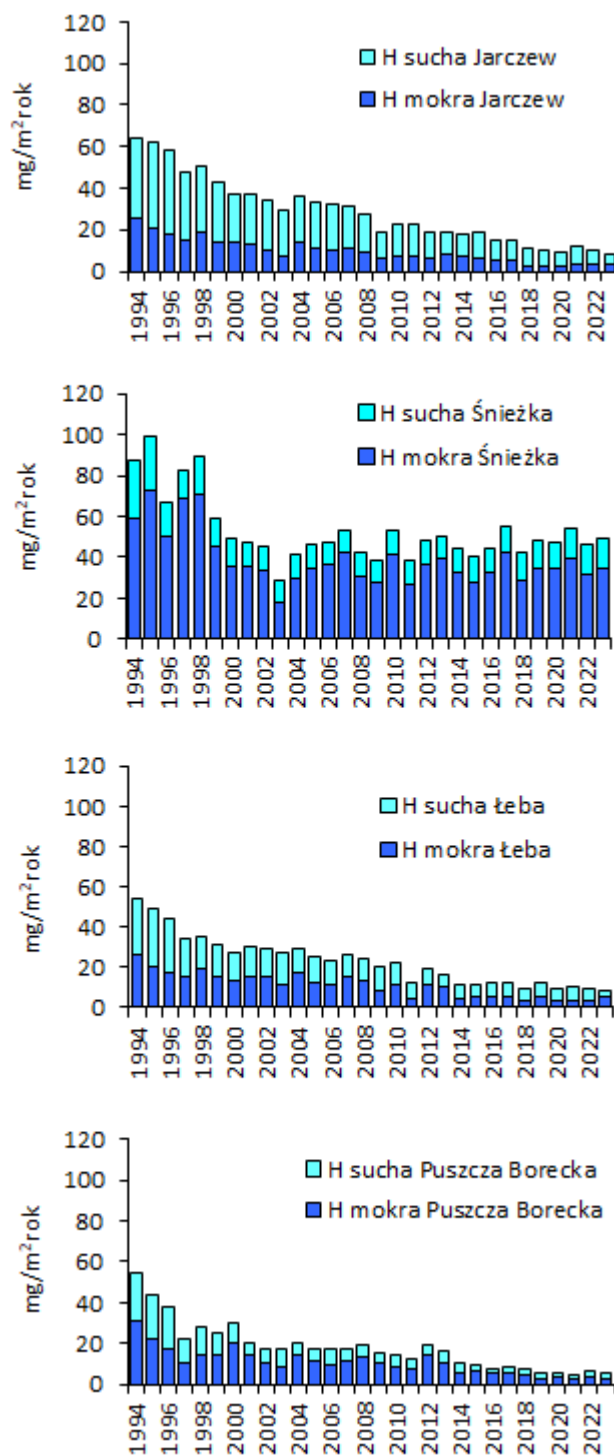
sucha depozycja S – S-SO₂ oraz S-SO₄²⁻ (aerozol)

Rys. 7.1. Udział suchej i mokrej depozycji w całkowitej depozycji siarki w rejonach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ



sucha depozycja N – N-NO₂ oraz N-NO₃⁻ (aerozol)

Rys. 7.2. Udział suchej i mokrej depozycji w całkowitej depozycji azotu w rejonach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ



sucha depozycja H^+ - z suchej $S-SO_2$

Rys. 7.3. Udział suchej i mokrej depozycji w całkowitej depozycji jonu wodorowego w rejonach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

W Jarczewie miał miejsce spadek zarówno suchej, jak i mokrej depozycji tlenowych związków siarki oraz jonu wodorowego, natomiast dostawa związków azotu w wyniku suchej depozycji

była w okresie wielolecia prawie niezmienna, a nieznacznie zmniejszała się mokra depozycja tego składnika.

Na Śnieżce w okresie 1994-2000 nastąpił wyraźny spadek mokrej depozycji tlenowych związków siarki oraz jonu wodorowego, a następnie zaczęła ona wzrastać aż do roku 2010, po czym nastąpiła stabilizacja w latach 2012-2015. W kolejnych latach notowano wyższe wartości depozycji siarki (głównie za sprawą wzrostu mokrej depozycji) i niewielką zmienność depozycji jonu wodorowego. Sucha depozycja związków siarki, azotu i jonu wodorowego bardzo wolno malała w wieloleciu, chociaż w ostatnich latach można zauważyć jej nieznaczny wzrost. Mokra depozycja związków azotu wykazywała w kolejnych latach znaczną zmienność, zależną od sum opadów, przy lekkiej tendencji spadkowej w skali wielolecia 1994-2015, wahaniach w kolejnych latach i wzroście na końcu analizowanego okresu (2021-2023). Mokra depozycja azotu ukształtowała w znacznym stopniu obraz całkowitej depozycji.

Na stacji w Łebie depozycja sucha i mokra tlenowych związków siarki i jonu wodorowego w ciągu wielolecia nieznacznie malała. Mokra depozycja związków azotu była zmienna z roku na rok, wykazując tendencję malejącą w wieloleciu, natomiast sucha depozycja tego zanieczyszczenia pozostawała nieomal niezmienna.

Na stacji Puszcza Borecka sucha i mokra depozycja jonów siarki i wodoru malała intensywniej w latach 1994 – 2000, a następnie jej spadek zmniejszył się i w ostatnim okresie można mówić o braku zmienności z roku na rok. Mokra depozycja azotu wykazała niewielką tendencję spadkową w całym okresie pomiarowym, natomiast dopływ azotu w wyniku suchej depozycji w ostatnich latach wykazał nieznaczną tendencję rosnącą.

W tabelach 7.1 - 7.4 przedstawiono wartości depozycji tlenowych związków siarki, tlenowych związków azotu i jonów wodorowych w rejonach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023.

Tabela 7.1. Depozycja tlenowych związków siarki, tlenowych związków azotu i jonów wodorowych w rejonach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

Objaśnienia: *) S-SO₂ oraz S-SO₄²⁻ (aerozol), **) N-NO₂ oraz N-NO₃⁻ (aerozol), ***) z depozycji SO₂
Depozycje roczne obliczone jako sumy wartości miesięcznych.

Jarczew

Rok	Depozycja siarki			Depozycja azotu tlenowego			Depozycja jonów wodorowych		
	sucha*	mokra	całkowita	sucha**	mokra	całkowita	z suchej S-SO ₂ ***	mokra	całkowita
	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²
1994	698,5	1025,6	1724,1	385,4	363,6	749,0	39,10	25,30	64,40
1995	713,0	639,7	1352,7	388,8	301,0	689,8	40,70	21,00	61,70
1996	721,0	554,8	1275,8	364,8	270,8	635,6	40,30	17,60	57,90
1997	595,8	537,8	1133,6	405,4	260,0	665,4	33,00	14,90	47,90
1998	571,6	616,2	1187,8	333,0	323,3	656,3	32,50	18,50	51,00
1999	502,4	510,7	1013,1	358,6	295,0	653,6	28,20	14,30	42,50
2000	411,1	474,7	885,8	396,6	290,8	687,4	22,50	14,20	36,70
2001	441,9	504,1	946,0	372,5	295,0	667,5	24,90	12,60	37,50
2002	428,1	370,7	798,8	431,4	244,2	675,6	24,00	10,30	34,30
2003	415,5	316,0	731,5	416,3	205,9	622,2	22,70	7,00	29,70
2004	405,4	419,4	824,8	381,6	277,0	658,6	22,60	13,70	36,30
2005	399,9	335,9	735,8	366,9	223,0	589,9	21,90	11,30	33,20
2006	410,9	310,9	721,8	424,8	209,1	633,9	22,10	10,30	32,40
2007	380,0	439,1	819,1	421,3	284,0	705,3	20,59	11,02	31,61
2008	337,6	419,1	756,7	396,2	280,0	676,2	18,09	9,43	27,52
2009	249,9	385,2	635,1	355,9	270,9	626,8	12,69	6,11	18,80
2010	295,5	336,9	632,4	401,8	237,1	638,9	15,55	6,96	22,51
2011	288,1	312,0	600,1	413,2	213,0	626,2	15,34	7,32	22,66
2012	226,9	332,2	559,1	388,5	237,3	625,8	11,90	6,76	18,66
2013	201,6	258,0	459,6	365,1	212,8	577,9	10,65	8,46	19,11
2014	205,3	300,2	505,5	312,9	218,9	531,8	10,54	7,24	17,78
2015	237,2	331,9	569,1	289,1	260,3	549,4	12,58	6,31	18,89
2016	185,6	293,4	479,0	262,6	241,6	504,2	9,70	5,35	15,05
2017	194,5	312,1	506,6	289,9	309,1	599,0	9,78	5,36	15,14
2018	164,2	205,3	369,5	268,4	214,5	482,9	8,22	2,79	11,01
2019	149,6	221,2	370,9	286,3	187,5	474,0	7,41	2,62	10,03
2020	139,7	222,5	362,2	289,2	190,6	479,8	6,99	2,50	9,49
2021	163,4	275,5	438,9	313,5	247,7	561,2	8,30	3,82	12,12
2022	136,0	197,9	333,9	269,9	200,7	497,6	7,13	3,05	10,18
2023	86,5	251,9	338,4	296,4	251,4	547,8	4,54	3,89	8,43
1994-2022	354,1	395,1	749,3	356,9	254,0	611,8	19,31	9,87	29,17

Tabela 7.2. Depozycja tlenowych związków siarki, tlenowych związków azotu i jonów wodorowych w rejonach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

Objaśnienia: *) S-SO₂ oraz S-SO₄²⁻ (aerozol), **) N-NO₂ oraz N-NO₃⁻ (aerozol), ***) z depozycji SO₂

Depozycje roczne obliczone jako sumy wartości miesięcznych.

Śnieżka

Rok	Depozycja siarki			Depozycja azotu tlenowego			Depozycja jonów wodorowych		
	sucha*	mokra	całkowita	sucha**	mokra	całkowita	z suchej S-SO ₂ ***	mokra	całkowita
	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²
1994	517,7	1909,6	2427,3	155,9	917,9	1073,8	28,10	59,10	87,20
1995	476,9	2194,1	2671,0	206,5	1101,5	1308,0	26,60	72,30	98,90
1996	317,3	1605,3	1922,6	174,6	951,9	1126,5	17,10	49,80	66,90
1997	242,1	1531,6	1773,7	152,7	865,9	1018,6	13,60	68,60	82,20
1998	312,3	1458,7	1771,0	174,2	878,1	1052,3	18,10	70,80	88,90
1999	252,8	867,2	1120,0	165,1	1018,2	1183,3	14,40	45,00	59,40
2000	241,0	703,6	944,6	157,6	1109,7	1267,3	13,60	35,70	49,30
2001	220,4	900,5	1120,9	150,2	1020,4	1170,6	12,40	35,20	47,60
2002	207,5	945,1	1152,6	142,4	1085,5	1227,9	11,60	33,40	45,00
2003	192,9	645,2	838,1	126,2	785,5	911,7	10,70	17,80	28,50
2004	209,2	790,7	999,9	140,2	828,5	968,7	11,60	29,40	41,00
2005	215,4	898,0	1113,4	149,1	923,3	1072,4	11,90	34,20	46,10
2006	201,1	1038,3	1239,4	128,4	989,7	1118,2	11,00	36,72	47,72
2007	193,8	1072,2	1266,0	127,1	949,1	1076,2	10,52	42,35	52,87
2008	218,6	891,6	1110,2	131,6	754,0	885,6	12,03	30,88	42,91
2009	187,0	1059,4	1246,4	128,0	774,1	902,1	10,04	28,03	38,07
2010	210,8	1459,4	1670,2	139,6	983,5	1123,1	11,47	41,80	53,27
2011	217,3	735,6	952,9	139,9	468,6	608,5	11,91	26,84	38,75
2012	216,3	938,2	1154,5	141,6	728,4	870,0	11,71	36,98	48,69
2013	197,9	986,5	1184,4	129,8	765,4	895,2	10,75	39,73	50,48
2014	220,4	932,7	1153,1	139,6	747,4	887,0	12,11	32,19	44,30
2015	228,5	930,0	1158,5	149,3	745,0	894,3	12,62	28,09	40,71
2016	228,3	1255,2	1483,5	152,9	1049,2	1202,1	12,45	32,18	44,63
2017	235,9	1335,8	1571,7	165,9	1567,5	1733,4	12,76	42,80	55,56
2018	254,2	1239,1	1493,3	170,6	1359,1	1529,7	14,03	28,51	42,54
2019	244,3	1147,2	1391,5	159,5	1173,0	1332,5	13,40	34,85	48,25
2020	228,9	764,2	993,1	155,1	785,2	940,3	12,47	35,08	47,55
2021	255,5	1032,2	1287,7	169,6	1200,2	1369,8	14,09	39,88	53,97
2022	367,6	1299,0	1566,8	184,8	1317,9	1502,7	14,70	31,75	46,45
2023	270,2	1155,2	1425,6	175,9	1599,2	1775,0	14,63	34,62	49,25
1994-2022	252,1	1123,0	1371,7	152,0	960,1	1112,1	13,72	39,31	53,02

Tabela 7.3. Depozycja tlenowych związków siarki, tlenowych związków azotu i jonów wodorowych w rejonach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

Objaśnienia: *) S-SO₂ oraz S-SO₄²⁻ (aerozol), **) N-NO₂ oraz N-NO₃⁻ (aerozol), ***) z depozycji SO₂
Depozycje roczne obliczone jako sumy wartości miesięcznych.

Łeba

Rok	Depozycja siarki			Depozycja azotu tlenowego			Depozycja jonów wodorowych		
	sucha*	mokra	całkowita	sucha**	mokra	całkowita	z suchej S-SO ₂ ***	mokra	całkowita
	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²
1994	502,5	551,0	1053,5	216,8	338,4	555,2	27,70	26,50	54,20
1995	521,6	496,5	1018,1	244,1	285,9	530,0	28,90	19,90	48,80
1996	481,6	476,3	957,9	279,0	303,9	582,9	26,20	17,60	43,80
1997	335,1	404,7	739,8	268,7	281,2	549,9	18,30	15,50	33,80
1998	287,2	490,9	778,1	229,3	368,7	598,0	15,50	19,80	35,30
1999	279,4	500,6	780,0	209,2	339,9	549,1	15,00	15,90	30,90
2000	264,1	339,2	603,3	230,6	294,9	525,5	14,00	13,40	27,40
2001	287,5	413,2	700,7	189,0	340,0	529,0	14,80	15,40	30,20
2002	261,2	391,1	652,3	218,9	327,8	546,7	13,60	15,60	29,20
2003	303,5	297,9	601,4	227,4	242,1	469,5	16,00	11,00	27,00
2004	230,4	358,3	588,7	227,1	334,8	561,9	12,00	17,60	29,60
2005	239,0	273,7	512,7	231,3	250,5	481,8	12,40	12,50	24,90
2006	242,6	266,9	509,5	253,8	261,6	515,4	12,50	11,00	23,50
2007	208,3	303,8	512,1	212,5	300,6	513,1	10,60	15,53	26,13
2008	209,4	290,6	500,0	214,0	300,3	514,3	10,40	13,79	24,19
2009	223,1	237,9	461,0	197,8	222,6	420,4	11,45	8,65	20,10
2010	212,4	299,2	511,6	222,7	288,4	511,1	10,83	11,73	22,56
2011	165,1	231,0	396,1	204,9	254,5	459,4	7,89	4,77	12,66
2012	160,3	279,1	439,4	208,4	328,7	537,1	8,06	10,94	19,00
2013	135,7	285,5	421,2	158,3	284,2	442,5	6,66	10,12	16,78
2014	146,7	176,4	323,1	182,0	169,5	351,5	7,16	4,65	11,81
2015	139,0	171,9	310,9	192,6	199,7	392,3	6,86	4,98	11,84
2016	138,4	194,3	332,7	196,1	222,9	419,0	6,87	5,32	12,19
2017	146,3	205,1	351,4	173,7	263,2	436,9	7,01	5,86	12,87
2018	121,9	165,3	287,2	213,3	205,4	418,7	5,79	3,77	9,56
2019	134,3	187,0	321,7	198,6	244,6	443,2	6,65	5,36	12,01
2020	128,6	148,9	277,5	179,6	183,7	363,3	6,42	3,48	9,90
2021	121,7	167,6	289,3	189,2	189,1	378,3	6,22	3,75	9,97
2022	117,1	145,4	262,5	156,6	172,1	328,7	5,97	3,69	9,66
2023	71,1	247,5	318,6	144,8	231,3	376,1	3,64	4,97	8,61
1994-2022	232,6	301,7	534,3	211,2	268,9	480,2	12,13	11,31	23,44

Tabela 7.4. Depozycja tlenowych związków siarki, tlenowych związków azotu i jonów wodorowych w rejonach monitoringu tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

Objaśnienia: *) S-SO₂ oraz S-SO₄²⁻ (aerazol), **) N-NO₂ oraz N-NO₃⁻ (aerazol), ***) z depozycji SO₂

Depozycje roczne obliczone jako sumy wartości miesięcznych.

Puszcza Borecka

Rok	Depozycja siarki			Depozycja azotu tlenowego			Depozycja jonów wodorowych		
	sucha*	mokra	całkowita	sucha**	mokra	całkowita	z suchej S-SO ₂ ***	mokra	całkowita
	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²
1994	412,9	762,1	1175,0	139,5	438,7	578,1	23,40	30,96	54,36
1995	374,9	592,6	967,4	104,4	318,8	423,2	21,22	22,22	43,45
1996	390,8	463,7	854,4	163,7	253,8	417,5	21,04	17,32	38,36
1997	233,1	362,1	595,2	163,9	292,1	456,0	12,10	10,10	22,20
1998	263,1	499,5	762,6	97,6	333,7	431,3	13,90	14,00	27,90
1999	197,4	388,2	585,6	167,5	299,7	467,2	10,60	14,10	24,70
2000	177,4	347,8	525,2	136,1	264,7	400,8	9,60	20,30	29,90
2001	116,0	469,9	585,9	102,5	297,0	399,5	5,50	14,50	20,00
2002	141,4	356,1	497,5	116,6	275,4	392,0	7,10	10,60	17,70
2003	153,8	263,8	417,6	119,0	197,9	316,8	8,00	8,90	16,90
2004	119,2	379,9	499,1	121,7	302,2	424,0	6,10	14,10	20,20
2005	109,4	347,4	456,8	102,0	287,7	389,7	5,70	11,50	17,20
2006	151,2	370,1	521,3	97,1	249,8	346,9	8,10	9,40	17,50
2007	113,9	442,2	556,1	142,2	369,4	511,6	5,80	11,10	16,90
2008	117,2	380,3	497,5	128,4	328,7	457,1	6,00	13,20	19,20
2009	97,6	291,0	388,6	142,0	277,6	419,6	4,90	10,30	15,20
2010	111,4	285,6	397,1	164,9	272,9	437,8	5,70	8,30	14,00
2011	102,5	286,0	388,7	176,1	272,3	448,4	5,30	7,40	12,70
2012	99,5	344,2	443,7	201,4	351,5	552,9	5,10	14,10	19,20
2013	110,4	265,5	376,2	167,8	286,4	454,4	5,80	10,20	16,00
2014	107,5	194,3	301,6	215,6	189,5	405,1	5,40	5,40	10,80
2015	64,7	222,2	286,8	172,2	246,2	418,3	3,00	6,10	9,10
2016	42,7	226,7	269,5	159,8	265,9	425,7	1,60	5,50	7,10
2017	55,8	233,5	289,3	193,4	306,1	499,4	2,50	6,00	8,50
2018	57,6	151,4	209,1	166,3	191,7	358,3	2,60	4,70	7,30
2019	55,9	189,64	245,5	175,5	186,6	362,1	2,70	2,60	5,30
2020	50,2	171,4	221,7	145,7	195,9	341,6	2,30	3,40	5,70
2021	58,9	144,6	203,5	165,7	185,0	350,7	2,60	2,40	5,00
2022	55,6	160,8	216,4	160,5	181,9	342,4	2,70	3,70	6,40
2023	52,8	137,3	190,1	141,2	181,4	322,6	2,70	2,80	5,50
1994-2022	142,8	330,8	473,6	148,6	273,1	421,67	7,46	10,77	19,20

8. Ocena trendów

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki analizy zmian stężeń w powietrzu i opadach oraz depozycji związków siarki, azotu utlenionego i azotu zredukowanego, kationów w opadach atmosferycznych i depozycji oraz parametrów fizyko-chemicznych opadów przy użyciu narzędzia stosowanego przez Grupę Zadaniową ds. Pomiarów i Modelowania EMEP.

8.1. Metoda analizy trendów

Do wykrywania i analizy trendów w rocznych seriach danych charakteryzujących stężenie i depozycję zanieczyszczeń opadów zastosowano nieparametryczny test Manna-Kendalla, który służy do wykrycia istnienia malejącego lub rosnącego trendu w serii danych, a następnie nieparametryczną metodę Sena do szacowania wielkości trendu - nachylenia linii trendu (Gilbert, 1997). Testy te służą do analizy danych, w których nie występują cykle sezonowe lub inne (zatem nadają się do wartości rocznych lub wartości średnich dla sezonów). Dopuszczają braki danych i nie wymagają, by analizowane serie charakteryzowały się konkretnym rozkładem (Gibbons i in., 2001).

Test Manna-Kendalla ma zastosowanie, gdy wartości x_i w serii danych można opisać wzorem:

$$x_i = f(t_i) + \varepsilon_i \quad (8.1)$$

gdzie $f(t_i)$ jest ciągłą monotoniczną rosnącą lub malejącą funkcją czasu a reszty ε_i mają ten sam rozkład ze średnią wartością równą 0.

Testowana jest hipoteza zerowa H_0 o braku istnienia trendu, czyli zakładająca przypadkowy rozkład obserwacji x_i w czasie wobec alternatywnej hipotezy H_1 , przyjmującej istnienie rosnącego lub malejącego trendu. Stosowane narzędzie – opracowane przez Fiński Instytut Meteorologiczny (Salmi i in., 2002) – wykorzystuje tzw. wielkość S (Gilbert, 1987) i zwykle oszacowanie dla tego testu – wielkość Z . Test z wartością S stosowany jest dla serii pomiarowych zawierających mniej niż 10 danych, a dla większych serii ma zastosowanie aproksymacja z wartością Z .

Statystyka S w teście Manna – Kendalla dla liczby danych n ($n < 10$) jest obliczana na podstawie wzoru:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (8.2)$$

gdzie x_j i x_k są wartościami w latach j i k , $j > k$ oraz

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x_j - x_k) &= 1 \text{ jeśli } x_j - x_k > 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= 0 \text{ jeśli } x_j - x_k = 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= -1 \text{ jeśli } x_j - x_k < 0 \end{aligned} \quad (8.3)$$

W wykorzystywanym narzędziu używany jest dwustronny test dla czterech różnych poziomów istotności α : 0,1, 0,05, 0,01 i 0,001. Z określonym prawdopodobieństwem hipoteza zerowa H_0 jest odrzucana na rzecz H_1 jeśli wartość bezwzględna S jest równa lub większa od specyficznej wartości $S_{\alpha/2}$, gdzie $S_{\alpha/2}$ jest najmniejszą wartością S , która z prawdopodobieństwem mniejszym niż $\alpha/2$ występuje w przypadku braku trendu. Dodatnia wartość S świadczy o trendzie rosnącym, a ujemna – o malejącym.

Poziom istotności 0,001 (***) oznacza 0,1% prawdopodobieństwa, że wartości x_i mają przypadkowy rozkład i z tym prawdopodobieństwem popełnia się błąd odrzucając hipotezę zakładającą brak istnienia trendu. Poziom 0,001 istotności oznacza, że istnienie trendu jest

bardzo prawdopodobne (***) . Poziom 0,01 oznakowano (**), 0,05 (*) a 0,1 – oznaczający 10% prawdopodobieństwa, że błędem jest odrzucenie hipotezy o braku trendu – oznakowano (+). Dla testowanej liczby danych większej niż 10 używana jest zwykła postać testu (Salmi i in., 2002). W pierwszej kolejności oblicza się wariancję S według wzoru, który uwzględnia możliwość istnienia grup danych:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (8.4)$$

gdzie q jest liczbą grup a t_p liczbą danych w p-tej grupie.

Wartości S i VAR(S) są wykorzystywane do obliczenia wartości Z tego testu :

$$\begin{aligned} Z &= \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} \quad \text{jeśli } S>0 \\ Z &= 0 \quad \text{jeśli } S=0 \\ Z &= \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} \quad \text{jeśli } S<0 \end{aligned} \quad (8.5)$$

Istnienie statystycznie istotnego trendu stwierdza się na podstawie wartości Z. Dodatnia wartość Z wskazuje na rosnący a ujemna – na malejący trend. Wartość Z ma rozkład normalny. Testując obecność rosnącego lub malejącego trendu na poziomie istotności α , odrzuca się hipotezę H_0 , jeśli wartość bezwzględna Z jest większa niż $Z_{1-\alpha/2}$, gdzie $Z_{1-\alpha/2}$ otrzymuje się ze standardowych tablic rozkładu normalnego.

Do określenia właściwego nachylenia istniejącego trendu stosowana jest nieparametryczna metoda Senna. Metoda ta jest używana, gdy trend można uznać za liniowy. Oznacza to, że $f(t)$ w równaniu (8.6) jest określone jako:

$$f(t) = Q(t) + B \quad (8.6)$$

gdzie Q jest współczynnikiem nachylenia, a B stałą.

Aby uzyskać współczynnik nachylenia Q w równaniu (8.7) na wstępie oblicza się nachylenie dla wszystkich par wyników według wzoru:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (8.7)$$

gdzie $j>k$

Mając n wartości x_i w serii otrzymamy $N=n(n-1)/2$ współczynników nachylenia Q_i . Oszacowanie nachylenia jest medianą z tych N wartości Q_i . Wartości te są porządkowane od najmniejszej do największej, a wówczas oszacowanie Senna jest równe:

$$\begin{aligned} Q &= Q_{[(N+1)/2]} \quad \text{jeśli } N \text{ jest nieparzyste} \\ \text{lub} \\ Q &= \frac{1}{2} (Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]}) \quad \text{jeśli } N \text{ jest parzyste} \end{aligned} \quad (8.8)$$

Aby uzyskać wartość stałej B w równaniu (8.6) oblicza się n wartości różnic $x_i - Qt_i$. Mediana tych wartości daje oszacowanie B (Salmi i in., 2002).

W dalszej części rozdziału w tabelach przedstawiających wyniki obliczeń wskazano wartość Z charakterystyczną dla tego testu, która świadczy o istnieniu statystycznie istotnego trendu ($Z>0$ wskazuje na trend rosnący a $Z<0$ na trend malejący), poziom istotności (oznakowanie *** świadczy, że istnienie trendu jest bardzo prawdopodobne, mniejsza ilość gwiazdek i znak +

oznacza, że istnienie trendu jest dla każdego przypadku mniej prawdopodobne, a puste pole świadczy o braku trendu), współczynniki nachylenia (Q) i przesunięcia (B) linii trendu (Salmi i in., 2002). Przy interpretacji wyników brano pod uwagę wielkość Z, poziom istotności i nachylenie linii trendu.

8.2. Trendy emisji

Zmiany stężeń zanieczyszczeń w powietrzu i opadach są zależne od zmian emisji, dlatego analizę rozpoczęto od zbadania trendów emisji. Emisje związków siarki i azotu w Polsce w okresie 1994-2022 charakteryzował wyraźny trend malejący, co wykazały testy statystyczne. Świadczą o tym ujemne wartości Z i Q (nachylenie linii trendu) oraz duże prawdopodobieństwo istnienia trendu (istotność ***), przedstawione w Tabeli 8.1. Trend emisji siarki był bardziej znaczący niż trend emisji azotu (utlenionego NO_x i zredukowanego NH_3), co wskazała większa wartość bezwzględna Z oraz przebieg linii trendu. Trendy malejące widać również w przypadku emisji pyłu zawieszonego PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$, przy czym dla grubszej frakcji trend był bardziej znaczący (***) niż dla drobnej (**). Spośród składników badanych w pyłe zawieszonym istotny statystycznie trend malejący wystąpił dla ołowiu (**) i benzo(a)pirenu (*), a nie odnotowano go dla kadmu. Emisja rtęci gazowej wykazała istotny statystycznie trend malejący (***).

Tabela 8.1. Trendy emisji związków siarki i azotu, pyłu zawieszonego i wybranych składników w nim badanych oraz rtęci w Polsce w latach 1994-2022. Źródło danych: CEIP EMEP

	Początek	Koniec	Test Z	Istotność	Q	B
SO₂	1994	2022	-7,33	***	-53,9	1718,7
NO_x	1994	2022	-6,10	***	-17,3	1064,4
NH₃	1994	2022	-5,35	***	-3,3	370,2
PM₁₀	1994	2022	-3,96	***	-4,9	521,7
PM_{2,5}	1994	2022	-2,87	**	-2,7	368,9
B(a)P	1994	2022	-2,31	*	-1,2	127,2
Cd	1994	2022	0,06		0,0	10,3
Pb	1994	2022	-3,13	**	-4,9	402,6
Hg	1994	2022	-7,00	***	-0,2	13,2

8.3. Trendy wyników pomiarów z lat 1994-2023

Wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń w powietrzu i opadach atmosferycznych oraz depozycji z polskich stacji EMEP wykazują zróżnicowanie zarówno czasowe, jak i przestrzenne, przy czym jest ono różne dla poszczególnych składników.

8.3.1. Związki siarki

Wyniki pomiarów związków siarki (stężenia dwutlenku siarki i siarczanów w powietrzu oraz depozycji siarczanów) dobrze odzwierciedlają zmiany emisji w Polsce – na wszystkich stacjach nizinnych odnotowano istotny trend malejący (Tab. 8.2). Na Śnieżce nie odnotowano trendu w przypadku dwutlenku siarki oraz siarczanów w opadach i depozycji, a dla stężenia siarczanów w powietrzu obserwuje się trend rosnący.

Tabela 8.2. Trendy stężeń w powietrzu, opadach i depozycji związków siarki na stacjach EMEP w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

	Seria	Początek	Koniec	Test Z	Istotność	Q	B
Jarczew PL02	powietrze S-SO ₂	1994	2023	-6,95	***	-0,11	3,40
	powietrze S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-6,02	***	-0,05	2,09
	opad S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-6,42	***	-0,02	0,94
	depozycja S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-5,92	***	-13,38	574,40
Śnieżka PL03	powietrze S-SO ₂	1994	2023	-1,05		0,00	1,10
	powietrze S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	3,27	**	0,01	0,68
	opad S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	0,37		0,00	0,88
	depozycja S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-0,18		-1,22	1061,90
Łeba PL04	powietrze S-SO ₂	1994	2023	-6,79	***	-0,05	1,88
	powietrze S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-5,55	***	-0,04	1,73
	opad S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-6,04	***	-0,02	0,68
	depozycja S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-5,96	***	-12,21	481,56
Puszcza Borecka PL05	powietrze S-SO ₂	1994	2023	-6,28	***	-0,04	1,34
	powietrze S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-6,50	***	-0,02	1,07
	opad S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-6,46	***	-0,02	0,75
	depozycja S-SO ₄ ²⁻	1994	2023	-5,89	***	-12,74	504,62

Stężenie dwutlenku siarki na wszystkich stacjach nizinnych malało równie szybko jak stężenie siarczanów, co może świadczyć podobnym ograniczaniu wpływu bliskich i dalekich źródeł emisji na kształtowanie imisji w rejonach reprezentowanych przez te stacje. Zarówno parametry Z, jak i nachylenie linii trendu dla stacji nizinnych są niemal identyczne. Natomiast redukcja emisji SO₂ w rejonie Śnieżki znajduje mniejsze odbicie w wartościach stężenia mierzonych na stacji wysokogórskiej (brak trendu, nieznaczna tendencja malejąca).

Linie trendu opisujące zmiany depozycji siarczanów z opadami są bardzo zbliżone dla stacji nizinnych i bardziej strome niż w przypadku Śnieżki. Świadczy to o tym, że stacje nizinne w podobny sposób odzwierciedlają zmiany emisji siarki z dalekich źródeł, podlegającej transformacji w czasie transportu transgranicznego. Wartości depozycji siarczanów na stacji górskiej były znacząco większe niż na stacjach nizinnych w wyniku występowania większych sum opadów w rejonie górskim, ale nie odnotowano na tej stacji istotnego statystycznie trendu zmian depozycji siarczanów.

8.3.2. Tlenowe związki azotu

Zupełnie inaczej przedstawiają się tendencje zmian stężenia tlenowych związków azotu w powietrzu oraz depozycji tych zanieczyszczeń do podłoża.

Tylko na stacjach w Łebie i w Jarczewie stwierdzono istnienie malejącego trendu (poziom istotności odpowiednio *** i **) dla stężenia dwutlenku azotu w powietrzu. Natomiast na Śnieżce trendu dla NO₂ nie wykryto (tylko tendencję malejącą), a w Puszczy Boreckiej stwierdzono trend rosnący (**) (Tab. 8.3). Serie wyników pomiarów sumy kwasu azotowego i azotanów pochodzące z Łeby i Jarczewa wykazały znaczący trend malejący (***). Na Śnieżce trend był rosnący (***), a w Puszczy Boreckiej brak trendu. Wiąże się to z faktem, iż emisja NO_x w Polsce i w Europie pochodzi w największym stopniu z transportu, a w drugiej kolejności z procesów spalania przy produkcji i transformacji energii. Źródła emisji związane z transportem to w większości niskie źródła o mniejszym zasięgu oddziaływania, zatem stężenie NO₂ mierzone na stacjach w większym stopniu niż w przypadku SO₂ pochodzi

ze źródeł lokalnych (o mniejszej skali oddziaływania niż kraj). Źródła związane z produkcją i transformacją energii to na ogół te same źródła emisji, z których pochodzi SO₂ i ich zasięg oddziaływania jest podobny. Jednak spadek emisji azotu utlenionego był mniej znaczący niż spadek emisji siarki. Znalazło to odzwierciedlenie w stężeniach związków azotu utlenionego mierzonych na stacjach.

Tabela 8.3. Trendy stężeń w powietrzu, opadach i depozycji tlenowych związków azotu na stacjach EMEP w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

	Seria	Początek	Koniec	Test Z	Istotność	Q	B
Jarczew PL02	powietrze N-NO ₂	1994	2023	-2,87	**	-0,03	3,01
	powietrze N-(HNO ₃ +NO ₃ ⁻)	1994	2023	-5,02	***	-0,01	0,93
	powietrze N-NO ₃ ⁻	1994	2023	-4,83	***	-0,01	0,75
	opad N-NO ₃ ⁻	1994	2023	-3,46	***	0,00	0,47
	depozycja N-NO ₃ ⁻	1994	2023	-3,35	***	-2,70	290,58
Śnieżka PL03	powietrze N-NO ₂	1994	2023	-0,61		0,00	1,10
	powietrze N-(HNO ₃ +NO ₃ ⁻)	1994	2023	5,33	***	0,02	0,19
	powietrze N-NO ₃ ⁻	1994	2023	5,99	***	0,01	0,14
	opad N-NO ₃ ⁻	1994	2023	1,70	+	0,01	0,76
	depozycja N-NO ₃ ⁻	1994	2023	0,71		5,27	913,01
Łeba PL04	powietrze N-NO ₂	1994	2023	-4,17	***	-0,02	1,83
	powietrze N-(HNO ₃ +NO ₃ ⁻)	1995	2023	-4,26	***	-0,01	0,68
	powietrze N-NO ₃ ⁻	1994	2023	-4,43	***	-0,01	0,56
	opad N-NO ₃ ⁻	1994	2023	-4,82	***	-0,01	0,49
	depozycja N-NO ₃ ⁻	1994	2023	-3,96	***	-4,73	332,24
Puszcza Borecka PL05	powietrze N-NO ₂	1994	2023	2,91	**	0,01	0,81
	powietrze N-(HNO ₃ +NO ₃ ⁻)	1994	2023	0,04		0,00	0,64
	opad N-NO ₃ ⁻	1994	2023	-5,51	***	-0,01	0,50
	depozycja N-NO ₃ ⁻	1994	2023	-3,71	***	-4,63	328,21

Depozycja azotanów wykazała istotny trend malejący (***) w rejonach reprezentowanych przez stacje nizinne (przy podobnym trendzie dla stężenia azotanów w opadach). Na Śnieżce stwierdzono niewielki trend rosnący dla stężenia azotanów w opadach i nieznaczną tendencję rosnącą dla depozycji (kształtowanej zarówno przez stężenia, jak i wysokości opadów).

8.3.3. Beztlenowe związki azotu

Badania zawartości związków azotu zredukowanego w powietrzu reprezentowane są przez stężenia sumy amoniaku i jonów amonowych NH₃+NH₄⁺. Stwierdzono istnienie malejącego trendu na stacjach w Jarczewie i Łebie (***) i na stacji górskiej (istotność *) (Tab. 8.4). W Puszczy Boreckiej wykryto nieznaczący trend rosnący (+). Malało stężenie azotu amonowego w opadach na wszystkich stacjach, przy czym w Jarczewie i Łebie trend malejący był bardziej istotny (***) niż na Śnieżce i w Puszczy Boreckiej (istotność odpowiednio * i +). Malała również depozycja, z tym że trend bardziej istotny charakteryzował serie pomiarowe depozycji pochodzące z Jarczewa i Łeby (***), mniej ze Śnieżki (*), a najmniej z Puszczy Boreckiej (+).

Tabela 8.4. Trendy stężeń w powietrzu, opadach i depozycji beztlenowych związków azotu na stacjach EMEP w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

	Seria	Początek	Koniec	Test Z	Istotność	Q	B
Jarczew PL02	powietrze N-(NH ₃ +NH ₄ ⁺)	1994	2023	-3,68	***	-0,03	3,27
	powietrze N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-5,91	***	-0,05	2,04
	opad N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-4,36	***	-0,01	0,74
	depozycja N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-4,03	***	-6,16	452,56
Śnieżka PL03	powietrze N-(NH ₃ +NH ₄ ⁺)	1994	2023	-2,07	*	-0,01	0,96
	powietrze N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-2,96	**	-0,01	0,64
	opad N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-2,08	*	-0,01	0,58
	depozycja N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-2,21	*	-9,36	711,74
Łeba PL04	powietrze N-(NH ₃ +NH ₄ ⁺)	1995	2023	-3,76	***	-0,02	1,65
	powietrze N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-5,68	***	-0,03	1,32
	opad N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-4,40	***	-0,01	0,51
	depozycja N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-4,00	***	-4,79	335,75
Puszcza Borecka PL05	powietrze N-(NH ₃ +NH ₄ ⁺)	1994	2023	1,70	+	0,01	1,42
	opad N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-1,89	+	0,00	0,54
	depozycja N-NH ₄ ⁺	1994	2023	-1,71	+	-1,53	360,00

8.3.1. Kationy w opadach

Analizie trendów poddano również stężenie w opadach i depozycję kationów: sodu, potasu, wapnia i magnezu (Tab. 8.5). Składniki te, w dużej mierze pochodzące ze źródeł naturalnych, wykazują inne prawidłowości niż omawiane wcześniej. Jedynie na stacji Puszcza Borecka dla wszystkich kationów odnotowano istotne statystycznie trendy malejące zarówno stężenia w opadach, jak i depozycji. Na stacji w Jarczewie obserwuje się tylko tendencje – malejące dla stężenia w opadach i depozycji sodu i depozycji wapnia. Dla pozostałych jonów zaznacza się niewielka tendencja rosnąca. W Łebie trend malejący wystąpił tylko w przypadku depozycji wapnia (*), a dla stężeń i depozycji pozostałych składników – tendencje rosnące i trendy (dla stężenia (***) i depozycji (**)) potasu oraz stężenia sodu (*). Na Śnieżce stwierdzono trendy rosnące dla stężeń i depozycji wszystkich badanych kationów (jedynie dla depozycji sodu była to nieistotna statystycznie tendencja), przy czym miały one różny poziom istotności. Najbardziej istotne były trendy dla stężenia i depozycji potasu (***) oraz depozycji magnezu (**).

Tabela 8.5. Trendy stężeń w opadach i depozycji kationów na stacjach EMEP w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

	Seria	Początek	Koniec	Test Z	Istotność	Q	B
Jarczew PL02	stężenie Na ⁺	1994	2023	-0,32		0,00	0,15
	depozycja Na ⁺	1994	2023	-0,04		-0,07	90,77
	stężenie K ⁺	1994	2023	1,09		0,00	0,10
	depozycja K ⁺	1994	2023	0,79		0,25	60,73
	stężenie Mg ²⁺	1994	2023	0,07		0,00	0,04
	depozycja Mg ²⁺	1994	2023	0,21		0,03	24,80

	stężenie Ca^{2+}	1994	2023	0,07		0,00	0,04
	depozycja Ca^{2+}	1994	2023	-1,28		-0,91	168,45
Śnieżka PL03	stężenie Na^+	1996	2023	1,88	+	0,01	0,46
	depozycja Na^+	1996	2023	1,60		8,42	526,31
	stężenie K^+	1996	2023	3,56	***	0,01	0,17
	depozycja K^+	1996	2023	3,46	***	9,40	188,88
	stężenie Mg^{2+}	1996	2023	2,55	*	0,00	0,11
	depozycja Mg^{2+}	1996	2023	2,79	**	2,45	126,72
	stężenie Ca^{2+}	1996	2023	2,55	*	0,00	0,11
	depozycja Ca^{2+}	1996	2023	1,96	+	13,21	436,81
Łeba PL04	stężenie Na^+	1994	2023	2,52	*	0,01	0,72
	depozycja Na^+	1994	2023	1,61		6,15	494,66
	stężenie K^+	1994	2023	3,35	***	0,00	0,08
	depozycja K^+	1994	2023	2,75	**	0,99	57,33
	stężenie Mg^{2+}	1994	2023	1,30		0,00	0,11
	depozycja Mg^{2+}	1994	2023	0,04		0,05	76,69
	stężenie Ca^{2+}	1994	2023	1,30		0,00	0,11
	depozycja Ca^{2+}	1994	2023	-2,50	*	-0,96	133,59
Puszcza Borecka PL05	stężenie Na^+	1994	2023	-1,68	+	0,00	0,24
	depozycja Na^+	1994	2023	-1,64		-1,73	154,78
	stężenie K^+	1994	2023	-4,64	***	-0,01	0,18
	depozycja K^+	1994	2023	-5,14	***	-3,35	118,56
	stężenie Mg^{2+}	1994	2023	-3,60	***	0,00	0,07
	depozycja Mg^{2+}	1994	2023	-2,89	**	-0,53	42,65
	stężenie Ca^{2+}	1994	2023	-3,60	***	0,00	0,07
	depozycja Ca^{2+}	1994	2023	-3,68	***	-3,10	186,07

8.3.2. Parametry fizykochemiczne w opadach

Testom statystycznym mającym na celu wykrycie trendu poddano także wysokości opadów oraz ich odczyn i przewodność na poszczególnych stacjach w latach 1994-2023. Na stacjach nizinnych wszystkie te parametry wykazały istotne statystycznie trendy (***) – malejące w przypadku wysokości opadów i przewodności a rosnące w przypadku odczynu (Tab. 8.6). Natomiast na stacji wysokogórskiej wysokość opadu charakteryzowała się nieznaczną tendencją rosnącą, przewodność nieznaczną tendencją malejącą a odczyn opadów – najmniej znaczącym trendem rosnącym (+).

Tabela 8.6. Trendy wysokości opadów oraz ich odczynu i przewodności na stacjach EMEP w Polsce w latach 1994-2023. Źródło danych: PMŚ

	Seria	Początek	Koniec	Test Z	Istotność	Q	B
Jarczew PL02	wysokość opadu	1994	2023	-6,42	***	0,0	0,9
	pH	1994	2023	6,00	***	0,0	4,5
	przewodność el. wł.	1994	2023	-6,25	***	-0,5	24,4
Śnieżka PL03	wysokość opadu	1994	2023	0,37		0,0	0,9
	pH	1994	2023	1,79	+	0,0	4,4
	przewodność el. wł.	1995	2023	-0,43		-0,1	30,7
Łęba PL04	wysokość opadu	1994	2023	-6,04	***	0,0	0,7
	pH	1994	2023	6,12	***	0,0	4,5
	przewodność el. wł.	1995	2023	-4,79	***	-0,4	25,0
Puszcza Borecka PL05	wysokość opadu	1994	2023	-6,46	***	0,0	0,7
	pH	1994	2023	6,08	***	0,0	4,4
	przewodność el. wł.	1994	2023	-6,08	***	-0,4	19,5

9. Sytuacja w Polsce na tle Europy

9.1. Zmiany emisji zanieczyszczeń powietrza

Do Konwencji w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości wynegocjowano i podpisano siedem protokołów dotyczących ograniczania emisji zanieczyszczeń, które transportowane na dalekie odległości powodują niekorzystne skutki dla zdrowia ludzi i środowiska [www.unece.org]. Cztery z nich już wygasły, a trzy pozostają w mocy:

- *Protokół w sprawie przeciwdziałania zakwaszeniu, eutrofizacji i powstawaniu ozonu przyziemnego* tzw. *Protokół z Göteborga - Göteborg, 1999 i rewizja w 2012 r.* Podstawowym celem tego protokołu jest osiągnięcie takich poziomów ładunków kwasowości i eutrofizacji, które będą niższe od wartości krytycznych oraz stężeń ozonu troposferycznego nieprzekraczających stężeń krytycznych zarówno z punktu widzenia ochrony zdrowia ludzi, jak i ekosystemów. Cel ten może zostać osiągnięty dzięki przestrzeganiu pułapów emisyjnych dwutlenku siarki, tlenków azotu, lotnych związków organicznych i amoniaku. Największe ograniczenia powinny wprowadzić te kraje, których emisje powodują największe szkody dla zdrowia lub środowiska, a podejmowane przez nie działania będą stosunkowo tanie [Jagusiewicz, 2004]. W pierwotnej wersji Protokół ten ustalał wymagania redukcji emisji na rok 2010, następnie określono poziomy redukcji emisji dla poszczególnych krajów do roku 2020 (przy przyjęciu roku 2005, jako bazowego) [www.unece.org];
- *Protokół w sprawie metali ciężkich - Aarhus, 1998.* Celem tego protokołu jest ograniczenie emisji szczególnie niebezpiecznych dla zdrowia ludzi i środowiska metali ciężkich: kadmu, ołowiu i rtęci poniżej poziomu z roku 1990 lub innego roku pomiędzy 1985 a 1995 (bez podania roku docelowego);
- *Protokół w sprawie trwałych zanieczyszczeń organicznych - Aarhus, 1998.* Celem tego protokołu jest nie tylko ograniczenie emisji trwałych związków organicznych (TZO), ale również eliminacja lub ograniczenie produkcji i użytkowania niektórych substancji, jak np. aldryny, DDT, PCB i WWA. Nie wskazano roku docelowego, ale dla konkretnych TZO zostały określone terminy eliminacji i ograniczeń, licząc od daty wejścia w życie protokołu, czyli od roku 2003 [Jagusiewicz, 2004]. Strony zobligowano również do redukcji emisji dioksyn, furanów, PAH i HCB poniżej poziomu z roku 1990 (lub dowolnego z okresu 1985-1995).

Polska nie ratyfikowała tych protokołów, jednak ich stroną jest Unia Europejska, co nakłada na nasz kraj zobowiązanie przestrzegania przyjętych zapisów.

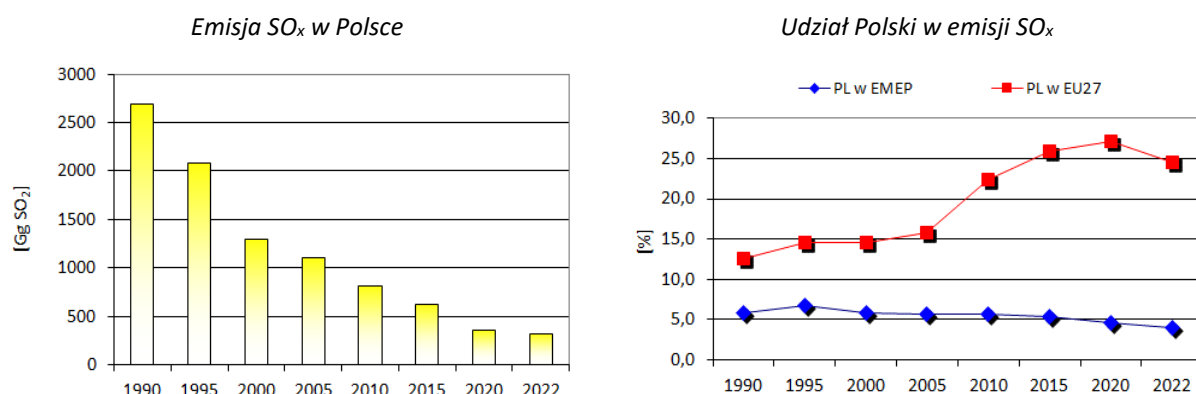
W niniejszym rozdziale przedstawiono wielkości emisji wybranych zanieczyszczeń powietrza z polskich źródeł w okresie 1990-2020 w odstępach 5-cio letnich oraz w roku 2022, który jest ostatnim, dla którego dostępne są dane o emisji. Są to dane wykorzystywane przez EMEP do obliczeń modelowych i pochodzą z bazy danych EMEP, do której przekazywane są wyniki przez państwa członkowskie i weryfikowane przez ekspertów (<http://www.ceip.at/webdab-emission-database/emissions-as-used-in-emeep-models/>). Wykorzystano dane zweryfikowane w 2024 roku. Dla metali ciężkich i benzo(a)pirenu zaprezentowano dane dla lat 2015, 2020 i 2022.

Dla kolejnych lat w odstępach 5-cio letnich i w roku 2022 (a dla metali ciężkich i benzo(a)pirenu dla lat 2015, 2020 i 2022) obliczono udziały emisji zanieczyszczeń ze źródeł polskich

w całkowitej emisji ze źródeł antropogenicznych z całego obszaru EMEP i w emisji z 27 krajów - obecnych członków Unii Europejskiej (EU27).

Tlenki siarki

Na obszarze EMEP pułapy emisji SO_x określone w *Protokole z Göteborga* dla roku 2010 zostały osiągnięte już w 2004 roku. Są jednak duże różnice w osiąganiu celów określonych w tym protokole przez różne państwa [Vestreng, 2006]. Emisja siarki w Polsce w okresie 1990-2020 systematycznie malała (Rys. 9.1), w konsekwencji czego emisja SO_x została zmniejszona o 71% w stosunku do roku 1990 (przy wymaganej redukcji na poziomie 56%). Według kolejnych wymagań *Protokołu z Göteborga* emisja SO_x w Polsce w 2020 roku powinna zostać zredukowana o 59 % w stosunku do roku 2005.



Rys. 9.1. Zmiany emisji tlenków siarki z polskich źródeł w okresie 1990-2022
Źródło danych EMEP: <http://www.ceip.at/webdab-emission-database>

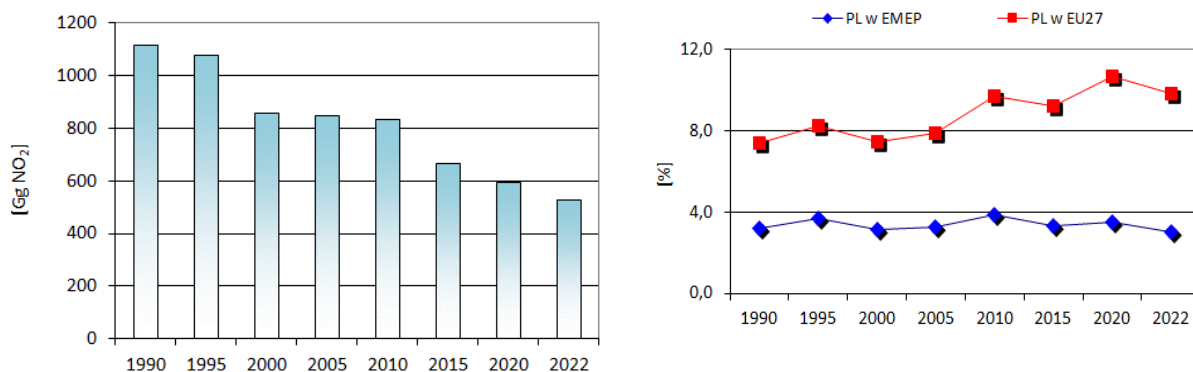
Udział polskich źródeł w emisji z całego EMEP osiągnął ponad blisko 6% w roku 1990, ponad 6% w 1995, a następnie systematycznie malał - do 4% w 2022 roku. Inaczej zmieniał się udział tych źródeł w emisji z 27 krajów obecnie tworzących UE, wzrastając – od 12,5% w 1990, przez 22,5% w 2010, do ponad 27% w roku 2020 i spadając w 2022 roku poniżej 25% (Rys. 9.1). Oznacza to, że spadek emisji w Polsce jest wolniejszy niż w innych krajach europejskich. Warto zauważyć, że w roku 1990 emisja z 27 krajów, które obecnie wchodzą w skład Unii Europejskiej stanowiła 47% emisji z obszaru EMEP i zmalała w 2022 roku do 16%.

Tlenki azotu

W przypadku tlenków azotu widoczne jest w Europie najmniejsze zaawansowanie w redukcji emisji spośród zanieczyszczeń objętych *Protokołem z Göteborga*. Obserwowany w latach 90. spadek emisji NO_x w Polsce został zahamowany – w latach 2000-2010 emisja utrzymywała się na zbliżonym poziomie, następnie zmalała latach 2015, 2020 i w 2022 (Rys. 9.2). Zgodnie z aktualnymi wymaganiami *Protokołu z Göteborga* emisja NO_x w Polsce w 2020 roku powinna zostać zredukowana o 30% w stosunku do roku 2005.

Emisja NO_x w Polsce

Udział Polski w emisji NO_x

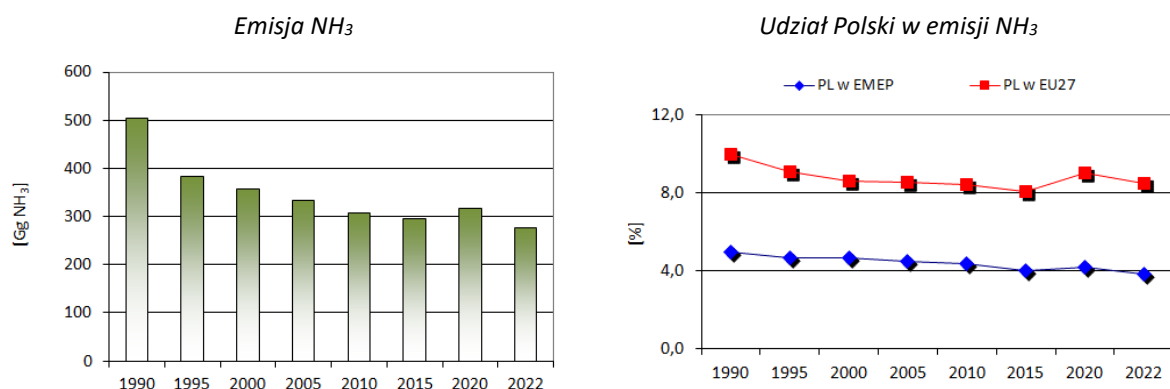


Rys. 9.2. Zmiany emisji tlenków azotu z polskich źródeł w okresie 2000-2022
Źródło danych EMEP: <http://www.ceip.at/webdab-emission-database>

Udział emisji tlenków azotu z polskich źródeł w całkowitej emisji z obszaru EMEP wykazywał niewielkie zmiany w latach 1990-2022 (wynosił ok. 3-4% emisji z domeny EMEP). W odniesieniu do emisji z UE27 udział ten zwiększył się z blisko 7,5% w 1990 do blisko 11% w 2020 roku, a następnie spadł poniżej 10% w 2022 roku. Udział emisji NO_x z 27 krajów wchodzących obecnie w skład Unii Europejskiej wynosił w 1990 roku blisko 43% emisji z obszaru EMEP i zmalał do blisko 31% w 2022 roku.

Amoniak

Liczba państw - stron *Konwencji*, które osiągnęły swój pułap emisji przewidziany na rok 2010 jest dla amoniaku większa niż dla jakiegokolwiek innego zanieczyszczenia zamieszczonego w *Protokole z Göteborga*. Prawie 65% wszystkich krajów osiągnęło pułapy emisyjne dla amoniaku już w roku 2004 [Vestreng, 2006]. W latach 1990-2015 w Polsce emisja NH₃ systematycznie malała, ale w 2020 roku odnotowano wzrost do poziomu bliższego temu z roku 2005, by w 2022 osiągnąć najmniejszą wartość (Rys. 9.3).



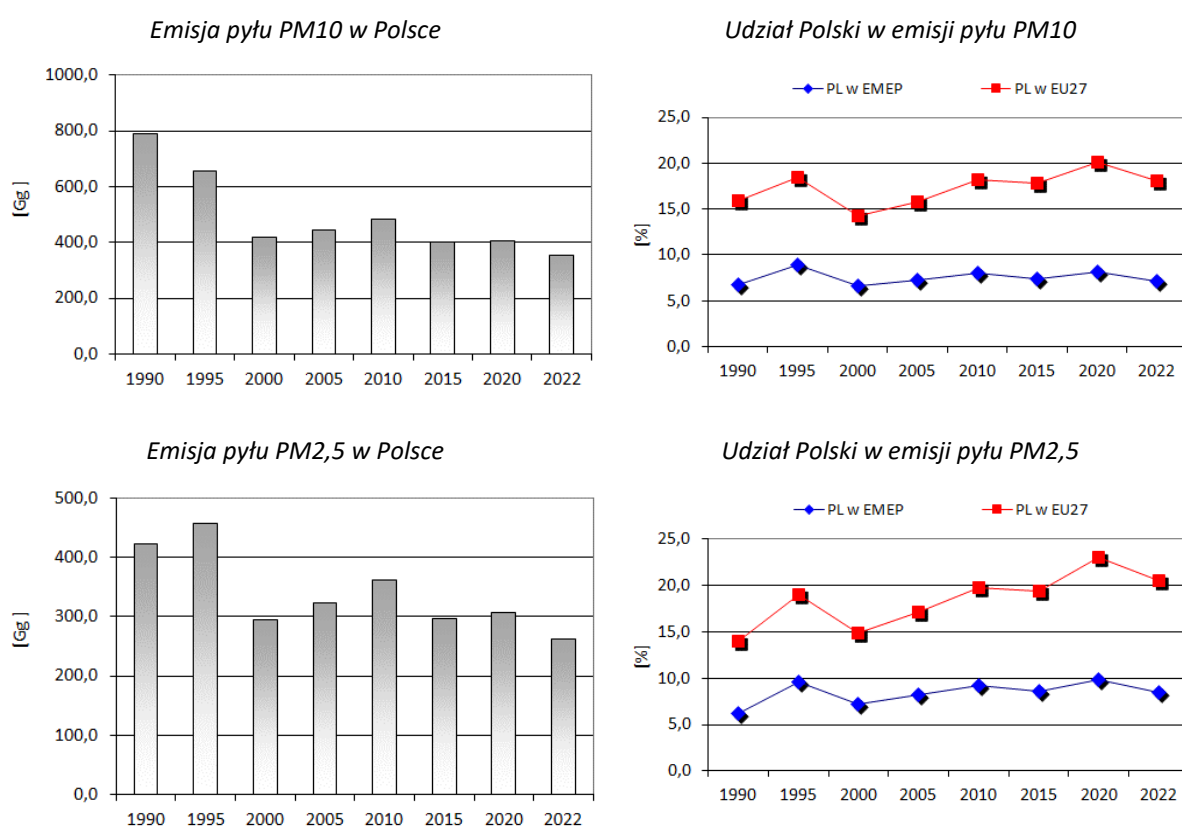
Rys. 9.3. Zmiany emisji amoniaku z polskich źródeł w okresie 2000-2022
Źródło danych EMEP: <http://www.ceip.at/webdab-emission-database>

Emisja z polskich źródeł została zredukowana w roku 2010 o 39% w stosunku do wartości z roku 1990 (z *Protokołu* wynika redukcja na poziomie 8%). Według wymagań *Protokołu z Göteborga* emisja NH₃ w Polsce w 2020 roku nie powinna przekraczać 267 Gg (redukcja o 1% w stosunku do roku 2005).

W przypadku emisji amoniaku udział polskich źródeł w emisji sumarycznej utrzymywał się na poziomie ok. 3-4% emisji z obszaru EMEP. Udział Polski w emisji z 27 krajów wchodzących obecnie w skład Unii Europejskiej wynosił początkowo 10%, a następnie pozostawał przez kolejne lata na poziomie ok. 8-9% (Rys. 8.3). Emisja amoniaku w krajach tworzących obecnie Unię Europejską w roku 1990 stanowiła blisko 50%, w kolejnych latach przekroczyła 50%, a w 2022 roku stanowiła 45% emisji z obszaru EMEP.

Pył zawieszony

Poziom stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu kształtowany jest zarówno przez emisję pierwotną pyłu, jak i przemiany jego prekursorów. Poniżej przedstawiono informacje o emisji pierwotnej dwóch frakcji pyłu: PM₁₀ i PM_{2,5}. Emisja w okresie 1990-1995 była na wyższym poziomie niż w latach późniejszych. W latach 2000-2022 utrzymywała się na zbliżonym poziomie, z nieznacznym wzrostem w 2010 roku (Rys. 9.4).



Rys. 9.4. Zmiany emisji pierwotnej pyłu zawieszonego z polskich źródeł w okresie 2000-2022

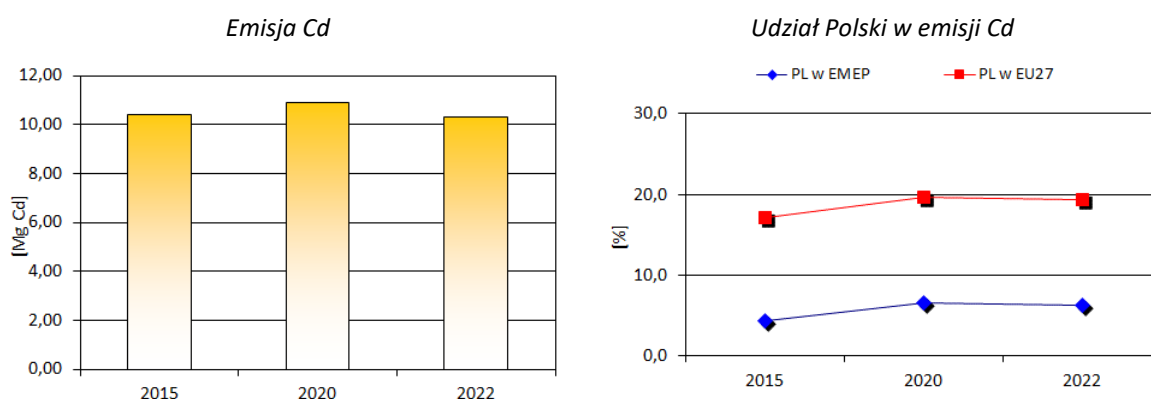
Źródło danych EMEP: <http://www.ceip.at/webdab-emission-database>

Udział emisji pyłu PM₁₀ z polskich źródeł w emisji z całego obszaru EMEP wyniósł ok. 7% w 1990 roku i ok. 9% w 1995, a od roku 2000 utrzymuje się na poziomie 7-8%. Udział Polski w emisji z UE27 wynosił ok. 16% w roku 1990, wzrósł do 18,5% w roku 1995, a następnie powoli wzrastał do 20% w 2020 roku. Wzrost został zatrzymany w 2022 roku. 27 krajów Unii Europejskiej wniosło do emisji z całego obszaru EMEP 42% w 1990 roku i udział ten wahał się w kolejnych latach w przedziale 41-48% i malejąc do 39% w 2022 roku. Polska wносиła do emisji pierwotnej pyłu PM_{2,5} na obszarze EMEP nieco ponad 6% w roku 1990, 10% w 2020

i 8,5% w 2022 roku. W emisji na obszarze UE27 udział Polski wynosił od 14% w roku 1990 do 23% w 2020 roku, a w 2022 zmalał do 20,5%. Według uzgodnień *Protokołu z Göteborga* emisja pyłu PM_{2,5} w Polsce w roku 2020 powinna zostać zredukowana o 16% w stosunku do wartości z roku 2005.

Kadm

W emisji kadmu w Polsce nie zaobserwowano znaczących zmian wartości w latach 2015-2022 (Rys. 9.5). Różnica względna emisji w roku 2022 wyniosła -1% w stosunku do wartości z roku 2015.

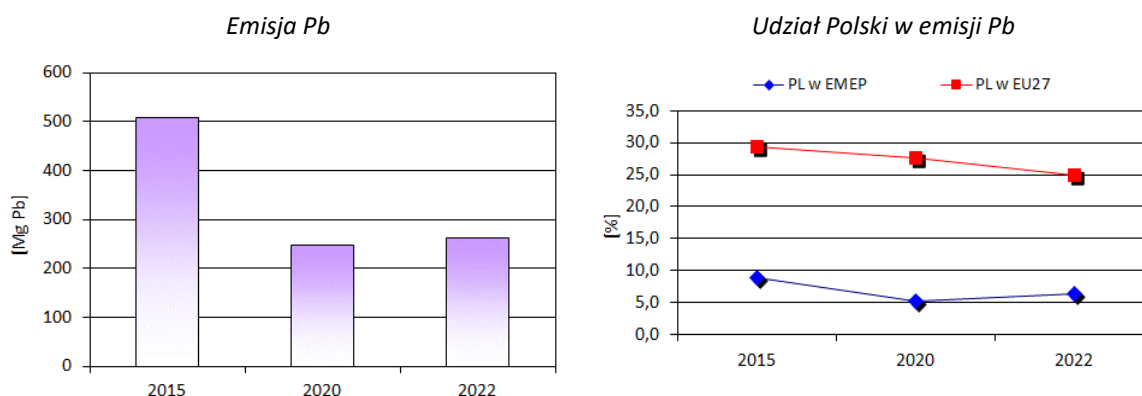


Rys. 9.5. Zmiany emisji kadmu z polskich źródeł w latach 2015-2022
Źródło danych EMEP: <http://www.ceip.at/webdab-emission-database>

Udział polskich źródeł w emisji sumarycznej z obszaru EMEP był nieco mniejszy w roku 2015, gdy wyniósł 4,4%, niż w roku 2022 - 6,3% (Rys. 9.5). Udział Polski w emisji z 27 krajów wchodzących w skład Unii Europejskiej osiągnął w roku 2015 poziom 17,1%, a w roku 2022 – 19,4%. Emisja kadmu w krajach Unii Europejskiej stanowiła w 2015 roku 25,8% emisji z obszaru EMEP, a następnie udział ten uległ zmianie i w roku 2022 wyniósł 32,4%.

Ołów

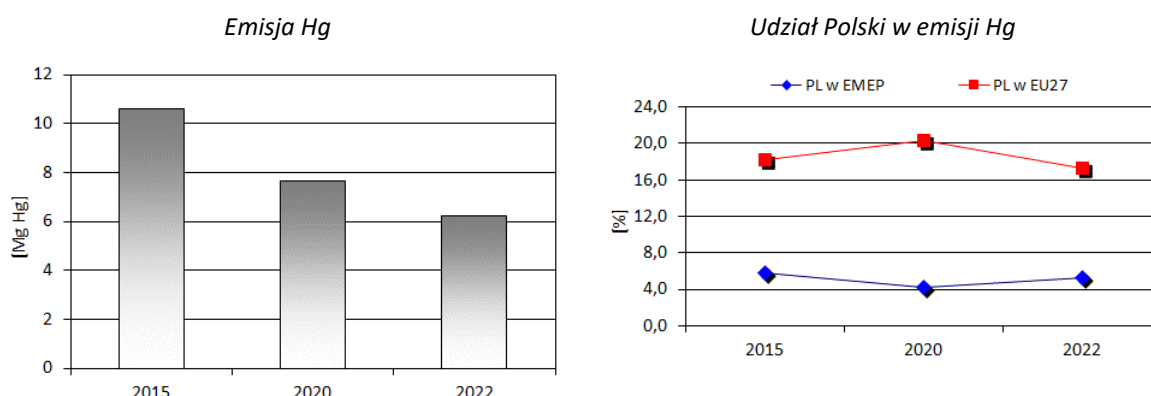
Emisja ołowiu w Polsce zmalała w roku 2022 o 48% w stosunku do poziomu z roku 2015 (Rys. 9.6). Udział polskich źródeł w emisji sumarycznej z obszaru EMEP również uległ zmniejszeniu - od 8,9% w 2015 roku do 6,4% w 2022 roku. Udział Polski w emisji z 27 krajów wchodzących w skład Unii Europejskiej spadł – z 29,3% w 2015 do 24,9% w 2022 roku. Emisja Pb w krajach UE27 w latach 2015 i 2022 wносиła odpowiednio 30,3% i 25,7% emisji z obszaru EMEP.



Rys. 9.6. Zmiany emisji ołowiu z polskich źródeł w latach 2015-2022
Źródło danych EMEP: <http://www.ceip.at/webdab-emission-database>

Rtęć

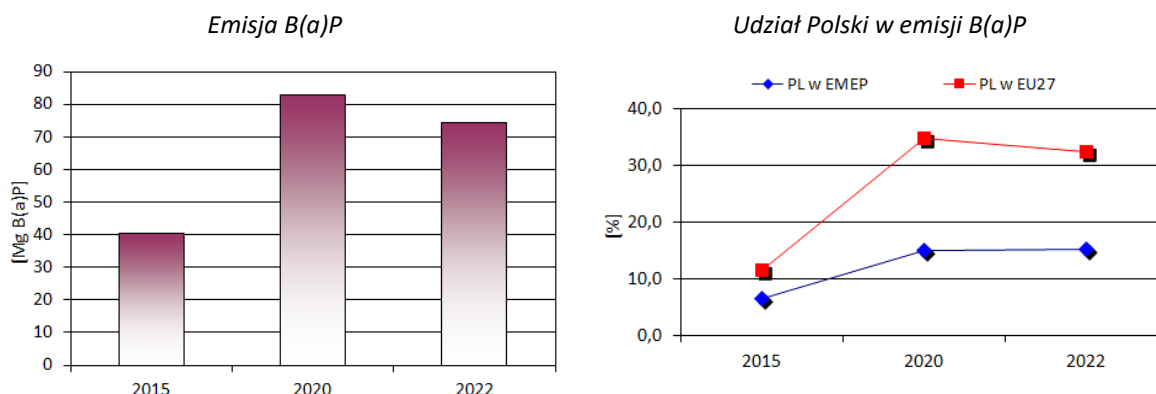
W roku 2022 wielkość emisji rtęci w Polsce była mniejsza o 41% niż w 2015 (Rys. 9.7). Udział emisji rtęci z polskich źródeł w całkowitej emisji z obszaru EMEP zmienił się z 5,8% w 2015 roku do 5,3% w 2022 roku. Udział Polski w emisji z 27 krajów wchodzących w skład Unii Europejskiej wynosił 18,3% w 2015 roku i 17,3% w 2022 roku. Kraje tworzące Unię Europejską w roku 2015 wniósł 31,9% do całkowitej emisji rtęci z obszaru EMEP, a w 2022 – 30,6%.



Rys. 9.7. Zmiany emisji rtęci z polskich źródeł w latach 2015-2022
Źródło danych EMEP: <http://www.ceip.at/webdab-emission-database>

Benzo(a)piren

Emisja benzo(a)pirenu w okresie 2015-2022 wykazała tendencją wzrostową (była wyższa w 2022 r. o 84%), co wynika ze zmian w inwentaryzacji (Rys. 9.8). Z polskich źródeł emisji pochodziło od 6,6% benzo(a)pirenu na obszarze EMEP w 2015 roku do 15,3% w roku 2022. Podobnie układał się udział emisji z polskich źródeł w emisji ze źródeł w krajach Unii Europejskiej – mniejszy był w roku 2015 (11,6%), a większy w roku 2022 (32,5%). W 2015 r. ponad połowa emisji benzo(a)pirenu na obszarze EMEP pochodziła z krajów UE27 – 57,1%, a w 2022 roku – 47,1%.



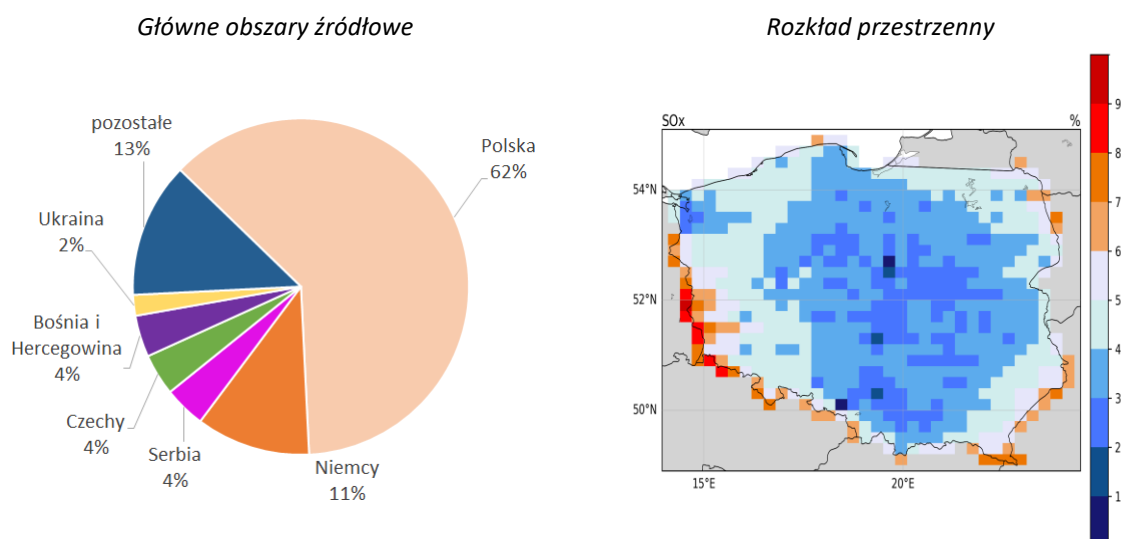
Rys. 9.8. Zmiany emisji benzo(a)pirenu z polskich źródeł w latach 2015-2022
Źródło danych EMEP: <http://www.ceip.at/webdab-emission-database>

9.2. Udział transgranicznego transportu w depozycji wybranych zanieczyszczeń powietrza w Polsce

W niniejszym rozdziale przeanalizowano udział krajowych i zagranicznych źródeł emisji w kształtowaniu depozycji wybranych zanieczyszczeń w Polsce. Posłużono się rezultatami obliczeń modelowych źródło-receptor wykonanych przez Meteorologiczne Centrum Syntetyzujące – Zachód (MSC-W) i Meteorologiczne Centrum Syntetyzujące – Wschód (MSC-E) EMEP. Przedstawiono udział procentowy polskich źródeł, pięciu największych obszarów źródłowych i pozostałych (potraktowanych sumarycznie) w depozycji wybranych zanieczyszczeń w Polsce w 2022 roku. Pokazano również na mapach udział transportu transgranicznego w depozycji wybranych zanieczyszczeń w Polsce.

Siarka

W kształtowaniu depozycji siarki w Polsce największy był udział własnych źródeł emisji – wyniósł on w 2022 roku 62% (Rys. 9.9). Następne w kolejności były głównie kraje sąsiadujące z Polską: Niemcy z udziałem 11%, Czechy, a także Serbia oraz Bośnia i Hercegowina z udziałami po 4%, Ukraina 2%; udział pozostałych obszarów w kształtowaniu depozycji siarki w Polsce wyniósł w 2022 roku 13%.



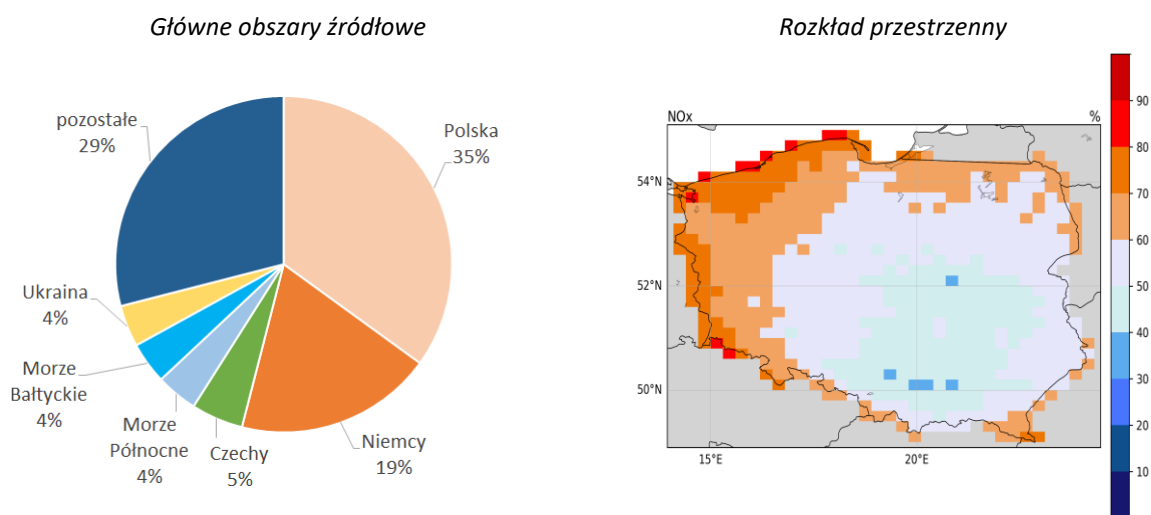
Rys. 9.9. Udział transgranicznego transportu w depozycji siarki w Polsce w 2022 roku [%]
Źródło: EMEP [Klein i in., 2024]

W rozkładzie przestrzennym widoczna jest pewna prawidłowość – udział transportu transgranicznego w kształtowaniu wielkości depozycji w kwadratach w głębi kraju (20-30%) jest mniejszy niż na obrzeżach (60-90% przy zachodniej granicy) - Rys. 9.9.

Azot utleniony

Udział krajowych źródeł emisji NO_x w kształtowaniu depozycji azotu utlenionego w Polsce był znacznie mniejszy niż w przypadku siarki i wynosił w 2022 roku 35% (Rys. 9.10). Udział kolejnego kraju w kształtowaniu depozycji azotu – Niemiec – wyniósł 19%, a następnego – Czech – 5%. Ruch statków na Morzu Północnym i Bałtyckim przyczynił się w 2022 roku w sumie do depozycji 8% azotu utlenionego w Polsce (po 4% każdy akwen), a źródła zlokalizowane w Ukrainie – do 4%. Na uwagę zasługuje znaczący udział pozostałych krajów, świadczący o dużym rozdrobnieniu źródeł emisji poza granicami, mających wpływ na wielkość depozycji azotu utlenionego w Polsce – 30% w 2022 roku (Rys. 9.10).

W rozkładzie przestrzennym udziału transgranicznych źródeł w depozycji azotu utlenionego w Polsce potwierdza się znaczący udział źródeł położonych na zachód i północ od granic kraju – w oczkach siatki zlokalizowanych na północy i zachodzie udział zagranicznych źródeł był w 2022 roku większy niż 60%, a w niektórych nawet niż 70%. Udział ten był najmniejszy w województwach: małopolskim, świętokrzyskim i części mazowieckiego.

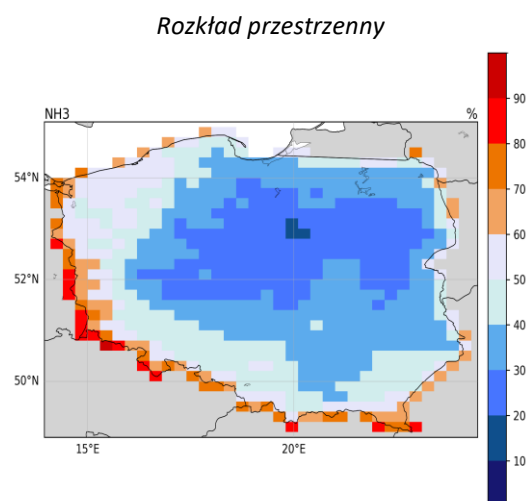
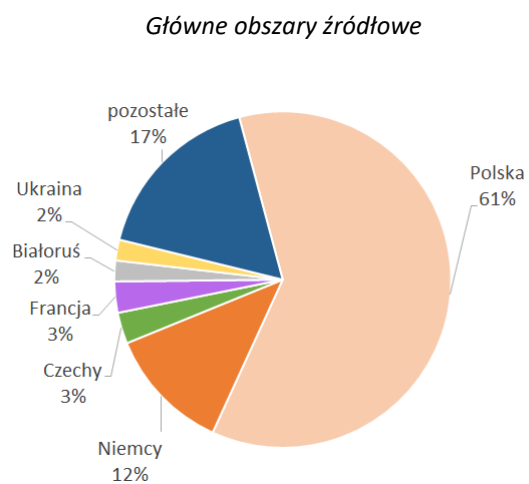


Rys. 9.10. Udział transgranicznego transportu w depozycji azotu utlenionego w Polsce w 2022 roku [%]
Źródło: EMEP [Klein i in., 2024]

Azot zredukowany

Depozycja azotu zredukowanego była kształtowana w 2022 roku przez własne źródła emisji w 61%. Poza polskimi źródłami znaczącą rolę odgrywały źródła niemieckie – 12%, czeskie i francuskie (po 3%), a także ukraińskie i białoruskie (po 2%) (Rys. 9.11). Reszta krajów w domenie EMEP dostarczyła 17% azotu zredukowanego zdeponowanego w 2022 roku na terenie Polski.

Odzwierciedlenie tej sytuacji stanowi rozkład przestrzenny, w którym oczka siatki o największym udziale transportu transgranicznego w depozycji azotu zredukowanego położone są przy granicach Polski, zwłaszcza zachodniej i południowej, a w miarę oddalania się od granic i zbliżania do centrum kraju rośnie udział własnych źródeł w kształtowaniu depozycji tego zanieczyszczenia (Rys. 9.11).



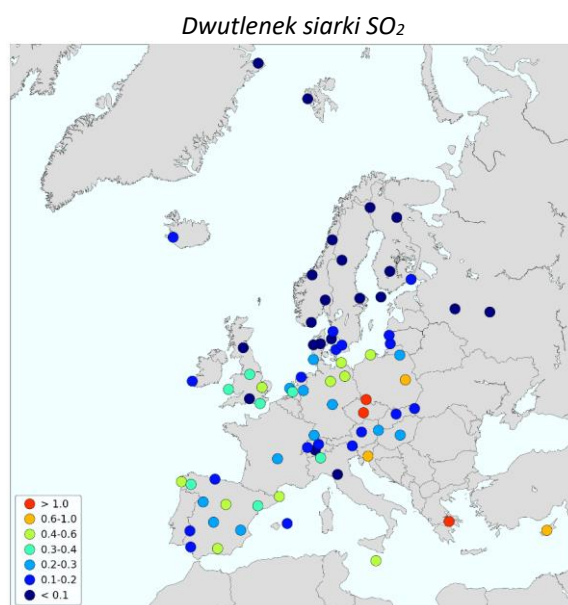
Rys. 9.11. Udział transgranicznego transportu w depozycji azotu zredukowanego w Polsce w 2022 roku [%]
 Źródło: EMEP [Klein i in., 2024]

9.3. Wyniki pomiarów zanieczyszczeń powietrza i opadów na stacjach EMEP

Prezentację wyników pomiarów wybranych zanieczyszczeń powietrza i opadów atmosferycznych na stacjach EMEP oparto na danych z Chemicznego Centrum Koordynacyjnego CCC EMEP, prezentowanych w raportach: *Data Report 2022: Particulate matter, carbonaceous and inorganic compounds* [Hjellbrekke, 2024] i *EMEP/CCC-Report 3/2024: Heavy metals and POP measurements 2022*.

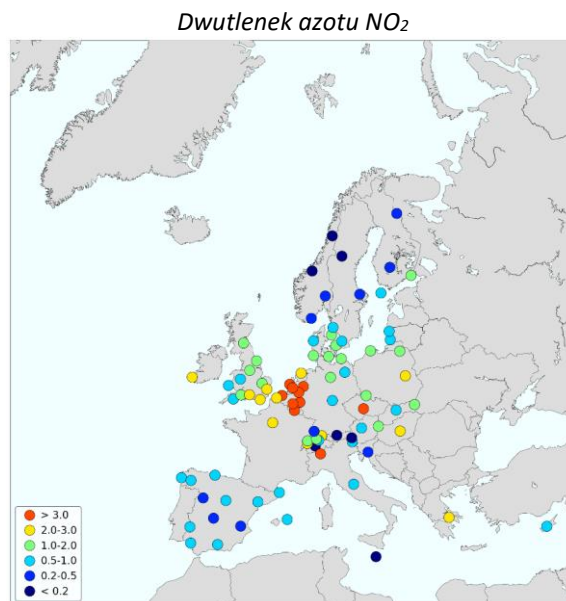
9.3.1. Zanieczyszczenia powietrza

Najmniejsze stężenia dwutlenku siarki na terenach pozamiejskich w Europie (reprezentowanych przez stacje EMEP) notowane były w 2022 roku w Skandynawii, Rosji i w Alpach (w przedziale 0,1-0,2 $\mu\text{gS}/\text{m}^3$, a nawet poniżej 0,1 $\mu\text{gS}/\text{m}^3$). W miarę przesuwania się na wschód i południe stężenia rosły, osiągając wartości z przedziału 0,6- 1 $\mu\text{gS}/\text{m}^3$, a nawet ponad 1 $\mu\text{gS}/\text{m}^3$ na stacjach w Polsce (Śnieżka) oraz w Czechach i Grecji (Rys. 9.12).



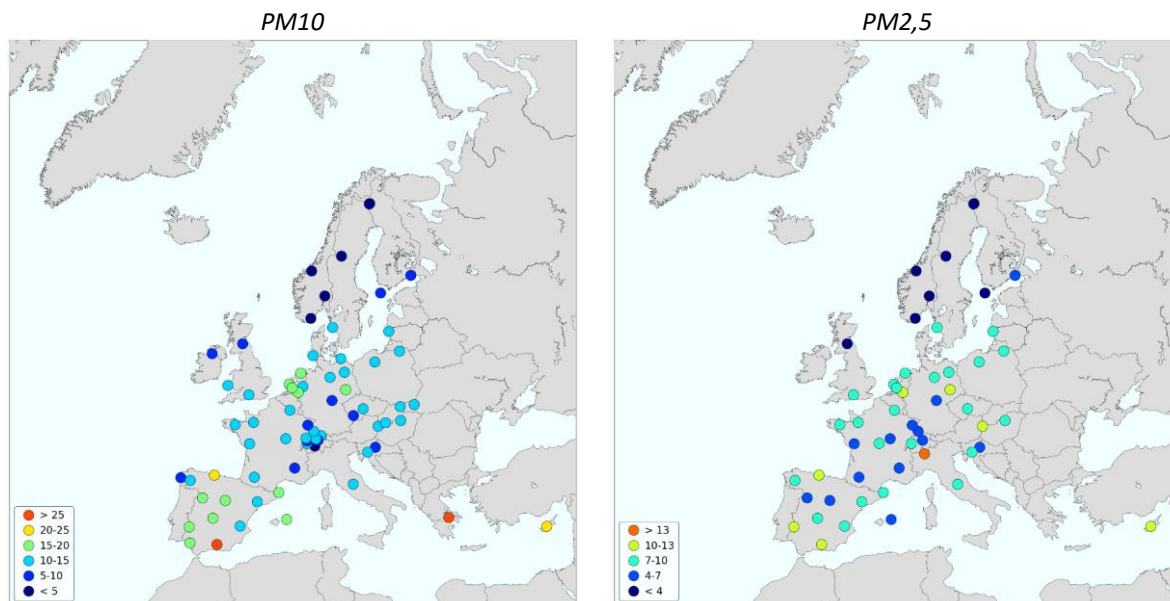
Rys. 9.12. Wyniki pomiarów stężenia dwutlenku siarki w powietrzu [$\mu\text{g S}/\text{m}^3$] na stacjach EMEP w 2022 roku Źródło: EMEP [Hjellbrekke A., 2024]

W zachodniej części Półwyspu Skandynawskiego odnotowano najmniejsze stężenie dwutlenku azotu - w roku 2022 wartości średniego rocznego stężenia w przedziale 0,2-0,5 $\mu\text{gN}/\text{m}^3$ i mniejsze. Wartości te rosły w kierunku wschodnim i południowym. W centralnej Europie (w tym na stacjach polskich) plasowały się w przedziale 1- 3 $\mu\text{gN}/\text{m}^3$, w Niemczech, krajach BeNeLuxu, w północnych Włoszech oraz Grecji osiągały wartości powyżej 3 $\mu\text{gN}/\text{m}^3$ (Rys. 9.13).

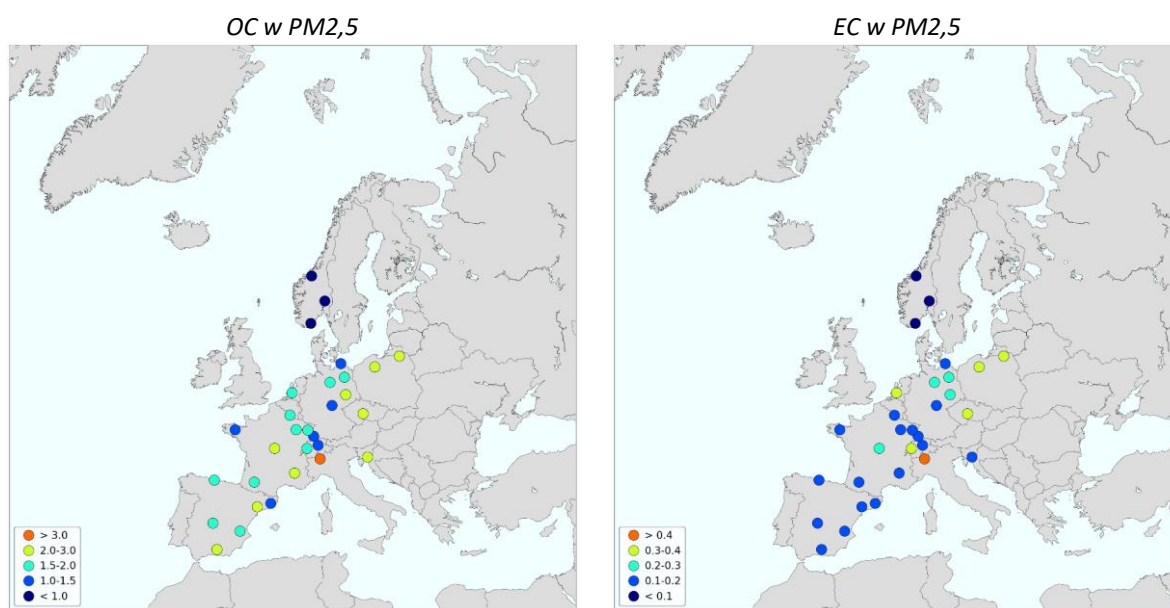


Rys. 9.13. Wyniki pomiarów stężenia dwutlenku azotu w powietrzu [$\mu\text{gN}/\text{m}^3$] na stacjach EMEP w 2022 roku
Źródło: EMEP [Hjellbrekke A., 2024]

Największe stężenia pyłu zawieszonego PM₁₀ na obszarach pozamiejskich zmierzono w 2022 roku na stacjach EMEP w południowej Hiszpanii i Grecji (średnie roczne $>25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), a nieco mniejsze (z przedziału $20-25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) w północnej Hiszpanii i na Cyprze. W środkowej Hiszpanii, w krajach BeNeLuxu i na wschodzie Niemiec notowano wartości stężenia pyłu zawieszonego PM₁₀ z przedziału $15-20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Na pozostałym obszarze, w tym na polskich stacjach Puszcza Borecka i Zielonka, dominowały wartości z przedziałów $10-15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Rys. 9.14). Mniejsze poziomy stężenia PM₁₀ odnotowano na stacjach wysokogórskich. Stacje na północy Wysp Brytyjskich i w Irlandii, a także w Szwajcarii wskazały stężenia średnie roczne pyłu PM₁₀ w przedziale $5-10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a na Półwyspie Skandynawskim poniżej $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wyniki pomiarów stężenia pyłu PM_{2,5} uzyskano z nieco mniejszej liczby stacji. Rozkład przestrzenny stężeń był podobny, jak dla PM₁₀ – większe wartości w środkowej części Europy, a mniejsze na jej krańcach, zwłaszcza północnych. Stężenie pyłu PM_{2,5} na stacjach Puszcza Borecka i Zielonka było na poziomie obserwowanym na kilku stacjach w krajach sąsiednich ($7-10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Najwyższą wartość odnotowano na stacji w północnych Włoszech ($>13 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Rys. 9.14).



Rys. 9.14 Wyniki pomiarów stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] na stacjach EMEP w 2022 roku
Źródło: EMEP [Hjellbrekke A., 2024]

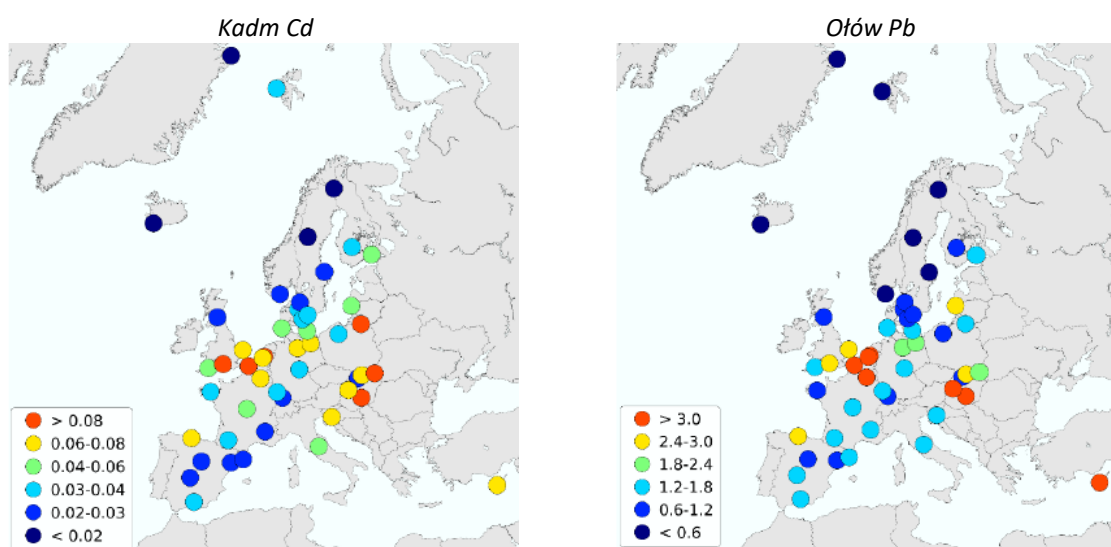


Rys. 9.15. Wyniki pomiarów stężenia węgla organicznego i elementarnego w pyłe zawieszonym PM_{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] na stacjach EMEP w 2022 roku
Źródło: EMEP [Hjellbrekke, 2024]

Na niektórych stacjach mierzących stężenie pyłu zawieszonego PM_{2,5} oznaczana była również zawartość węgla organicznego i elementarnego w pyłe (Rys. 9.15). Jego zawartość koresponduje ze stężeniami pyłu zawieszonego PM_{2,5} – na stacjach, gdzie odnotowano największe stężenia pyłu zawieszonego PM_{2,5} również stężenia węgla były na ogół wysokie. W Skandynawii i w zachodniej części Europy obserwowano mniejsze stężenia obu postaci węgla (a szczególnie EC) niż w środkowej części kontynentu. Stężenie węgla organicznego na najwyższym poziomie – powyżej 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – zmierzono na stacji w północnych Włoszech, mniejsze wartości obserwowano na stacjach w Polsce (Puszcza Borecka i Zielonka),

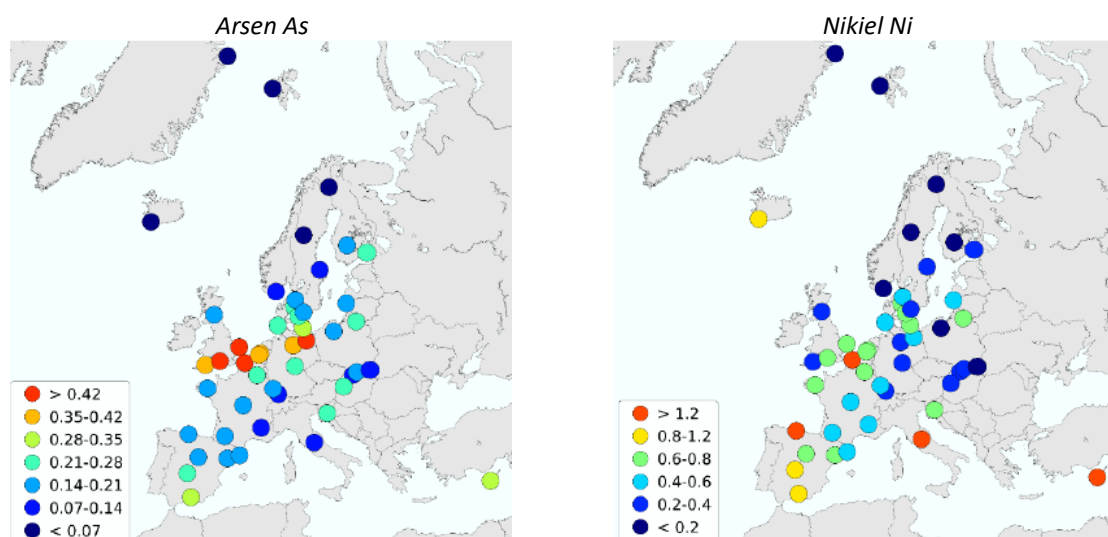
we wschodnich Niemczech, w Czechach, Chorwacji, na południu Francji i Hiszpanii, a węgla elementarnego – powyżej $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – w północnych Włoszech.

Na północy Europy – na Islandii, Grenlandii i w Skandynawii stężenie kadmu w powietrzu w 2022 roku nie przekroczyło $0,02 \text{ ng}/\text{m}^3$ (Rys. 9.20). Niskie wartości ($0,03$ - $0,04 \text{ ng}/\text{m}^3$) obserwowano także na południu Półwyspu Skandynawskiego i Iberyjskiego oraz na stacjach górskich (a także w Zielonce). Wartości z przedziału $0,04$ - $0,08 \text{ ng}/\text{m}^3$ zmierzyły stacje w północnych Niemczech, na południu Wielkiej Brytanii, w Holandii, Belgii i w Chorwacji. Największe wartości - powyżej $0,08 \text{ ng}/\text{m}^3$ - wystąpiły w krajach BeNeLuxu, Wielkiej Brytanii, w Słowenii, Słowacji i Węgrzech oraz w Polsce (Puszcza Borecka). Stężenia ołowiu w powietrzu były największe na Węgrzech, w krajach BeNeLuxu i na Cyprze (powyżej $3 \text{ ng}/\text{m}^3$), a najmniejsze na północy i zachodzie Skandynawii, na Islandii, Grenlandii (poniżej $1 \text{ ng}/\text{m}^3$). Na większości stacji w Hiszpanii, Francji, Włoszech, Finlandii stężenia średnie roczne Pb w 2020 roku miały wartości $1,2$ - $1,8 \text{ ng}/\text{m}^3$ (Rys. 9.16). Na pozostałych stacjach wartości stężenia ołowiu znajdowały się w przedziałach $1,8$ - $3 \text{ ng}/\text{m}^3$. Polskie wyniki były w klasie średnich wartości na obszarze Europy i niższe od wartości obserwowanych na stacjach sąsiednich.



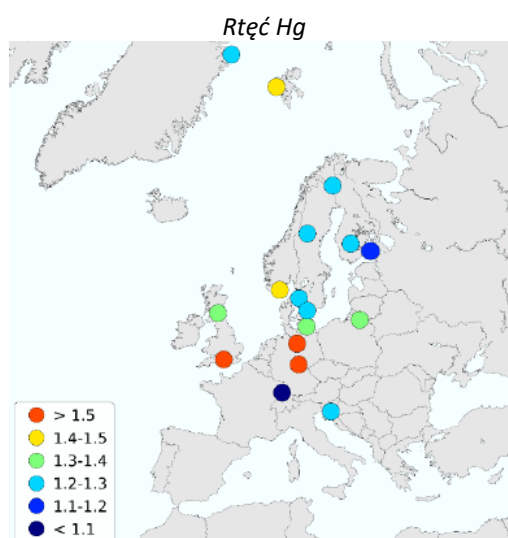
Rys. 9.16. Wyniki pomiarów stężenia wybranych kadmu i ołowiu w pyłe zawieszonym PM_{10} [ng/m^3] na stacjach EMEP w 2022 roku Źródło: EMEP [Aas W. 2024]

Najwyższe stężenia arsenu w pyłe zawieszonym PM_{10} – powyżej $0,42 \text{ ng}/\text{m}^3$ - zaobserwowano na stacjach w krajach BeNeLuxu, na południu Wielkiej Brytanii i na północnym wschodzie Niemiec (Rys. 9.21). Najniższe wartości – poniżej $0,07 \text{ ng}/\text{m}^3$ - były typowe dla północnych krańców Europy. Wyniki z polskich stacji – Puszczy Boreckiej i Zielonki – są zbliżone do uzyskiwanych na innych stacjach w regionie. Najwyższe wartości stężenia niklu w pyłe zawieszonym PM_{10} ($>1,2 \text{ ng}/\text{m}^3$) występowały na pojedynczych stacjach w różnych rejonach Europy – w północnej Hiszpanii, we Włoszech, w Holandii i na Cyprze. Podobnie, jak dla innych metali ciężkich najniższe wartości obserwowano w północnej Europie, ale także na Słowacji i na polskiej stacji – w Zielonce (Rys. 9.17).



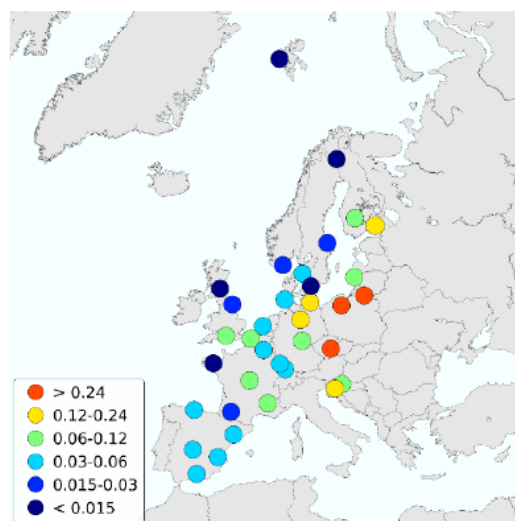
Rys. 9.17. Wyniki pomiarów stężenia arsenu i niklu w pyłe zawieszonym PM10 [ng/m³] na stacjach EMEP w 2022 roku Źródło: EMEP [Aas W. 2024]

Badania stężenia rtęci gazowej w powietrzu wykonywane były na nielicznych stacjach EMEP, głównie zlokalizowanych w transekcie północ-południe, od Grenlandii i Norwegii po Szwajcarię i Chorwację (Rys. 9.18). Na tych stacjach stężenie rtęci gazowej mieściło się na ogół w przedziale 1,1-1,5 ng/m³ (w Polsce 1,3-1,4 ng/m³); jedynie na 2 stacjach w Niemczech i 1 w Wielkiej Brytanii osiągnęło wartości >1,5 ng/m³. Tylko dla tego zanieczyszczenia wartości stężenia notowane w Norwegii nie były najniższe w Europie (możliwa emisja Hg z wody morskiej i globalny obieg rtęci w atmosferze). Najniższą wartość odnotowano na stacji w Szwajcarii (poniżej 1,1 ng/m³).



Rys. 9.18. Wyniki pomiarów stężenia rtęci w powietrzu [ng/m³] na stacjach EMEP w 2022 roku Źródło: EMEP [Aas W., 2024]

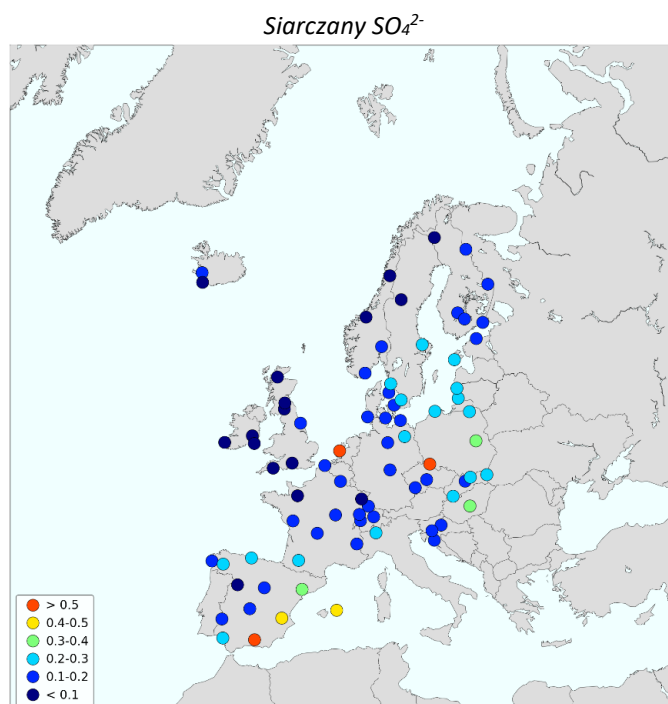
Badania stężenia benzo(a)pirenu w pyłe zawieszonym PM10 pokazują najniższe wartości na północy Europy – w Skandynawii, Wielkiej Brytanii, na północy Francji (<0,015 ng/m³) i na zachodzie kontynentu – w Hiszpanii. Stężenia rosły w miarę przesuwania się na wschód i najwyższe wartości osiągały w Polsce i Czechach (Rys. 9.19).



Rys. 9.19. Wyniki pomiarów stężenia benzo(a)pirenu w pyłe zawieszonym PM10 [ng/m³] na stacjach EMEP w 2022 roku Źródło: EMEP [Aas W., 2024]

9.3.2. Zanieczyszczenia opadów

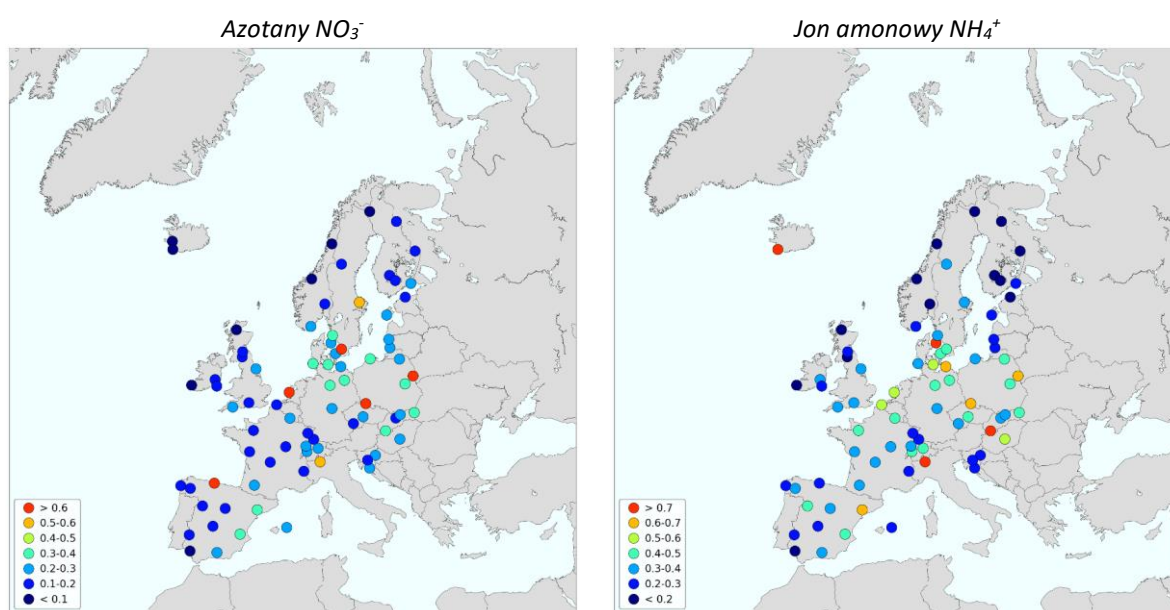
Najmniejsze stężenia siarczanów (po redukcji aerozolu morskiego) notowano w 2022 roku na stacjach w Europie zachodniej i północnej (0,1-0,2 mg/dm³ i mniej), szczególnie we Francji, Wielkiej Brytanii, Norwegii i Finlandii; wartości te rosły w miarę przesuwania się na wschód, ale większe stężenia były także notowane w Hiszpanii, szczególnie na wybrzeżu Morza Śródziemnego (Rys. 9.20).



Rys. 9.20. Wyniki pomiarów stężenia siarczanów w opadach [mgS/dm³] (po korekcji aerozolu morskiego) na stacjach EMEP w 2022 roku Źródło: EMEP [Hjellbrekke A., 2024]

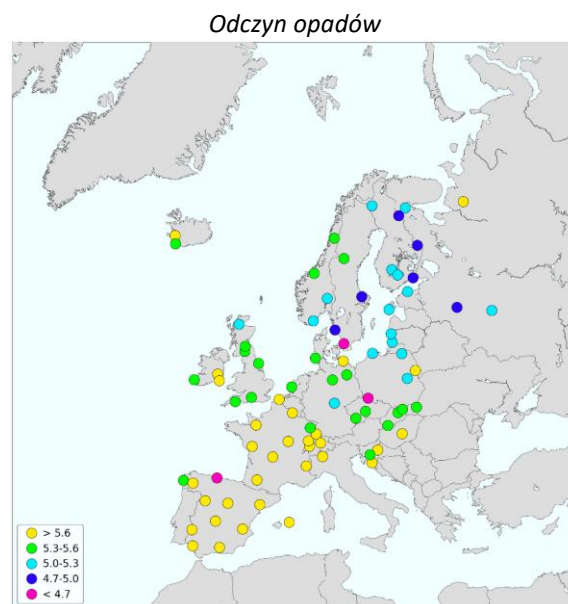
Najwięcej siarczanów w opadach było na pojedynczych stacjach w Hiszpanii, Holandii i w Polsce – na Śnieżce (powyżej $0,5 \text{ mgS/dm}^3$). Na pozostałych polskich stacjach notowano poziom siarczanów zbliżony do obserwowanego na stacjach w basenie Morza Bałtyckiego – w Niemczech, Danii, Litwie i Łotwie ($0,2\text{-}0,3 \text{ mgS/dm}^3$) w przypadku stacji położonych na północy kraju i wyższy – jak na Węgrzech i w południowej Hiszpanii – w przypadku Jarczewa ($0,3\text{-}0,4 \text{ mgS/dm}^3$).

Rozkład stężeń związków azotu - jonów azotanowych i amonowych - w opadach na obszarze Europy był podobny (Rys. 9.21). Najmniejsze wartości stężenia azotanów ($0,1\text{-}0,2 \text{ mgN/dm}^3$ i poniżej $0,1 \text{ mgN/dm}^3$) były charakterystyczne dla stacji położonych na północnych, zachodnich i południowych (poza częścią stacji hiszpańskich) krańcach Europy i wzrastały ku centrum. Stężenie jonów amonowych odzwierciedla lokalizację obszarów rolniczych, będących głównym źródłem emisji amoniaku – większe wartości notowały stacje położone w takich rejonach i w ich sąsiedztwie. Największe stężenia azotanów (powyżej $0,6 \text{ mgN/dm}^3$) w 2022 roku wystąpiły w Polsce – na Śnieżce i w Jarczewie, ale także w Hiszpanii, Holandii i Szwecji (po jednej stacji), a jonów amonowych (powyżej $0,7 \text{ mgN/dm}^3$) – w północnych Włoszech, na Węgrzech, w Szwecji i na Islandii. Były to pojedyncze przypadki.



Rys. 9.21. Wyniki pomiarów stężenia związków azotu w opadach [mg N/dm^3] na stacjach EMEP w 2022 roku
Źródło: EMEP [Hjellbrekke, 2024]

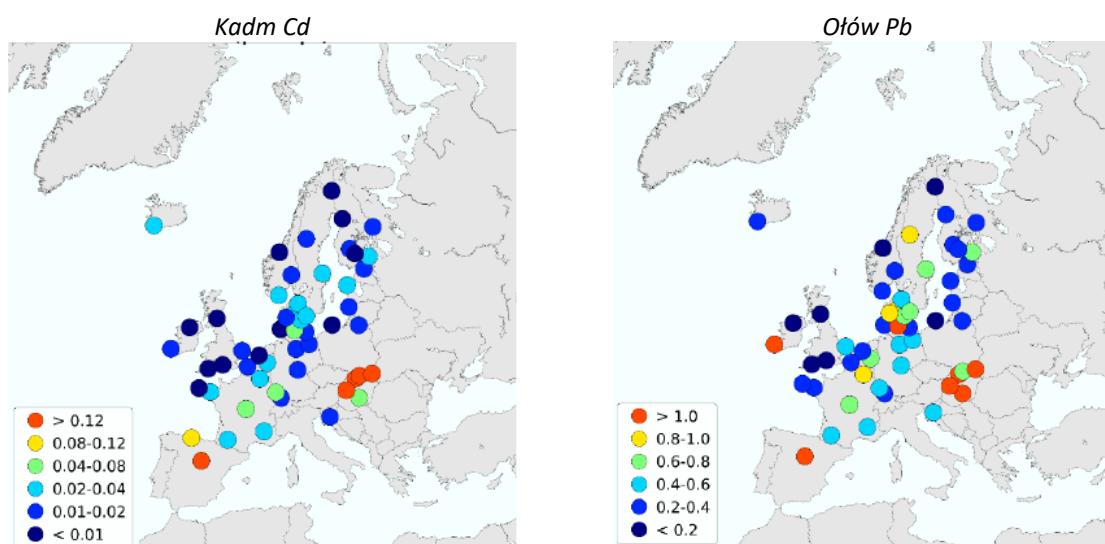
W 2022 roku najbardziej kwaśne opady (średnia roczna wartość pH poniżej 4,7) wystąpiły na stacji w Polsce - na Śnieżce oraz w Szwecji i Hiszpanii. Na pozostałych polskich stacjach odczyn opadów był zbliżony do notowanego na stacjach w regionie – taki, jak na innych stacjach w basenie Morza Bałtyckiego, niższy od obserwowanego na stacjach w zachodniej części kontynentu. Najwyższe wartości pH opadów (powyżej 5,6) obserwowane były na większości stacji w Hiszpanii, we Francji i w Szwajcarii (Rys. 9.22).



Rys. 9.22. Wyniki pomiarów pH opadów na stacjach EMEP w 2022 roku Źródło: EMEP [Hjellbrekke A., 2024]

Najniższe wartości stężenia kadmu w opadach w roku 2022 wskazały stacje zlokalizowane w zachodniej Skandynawii, na Wyspach Brytyjskich, w Danii. Największe wartości odnotowano na Słowacji i Węgrzech oraz w środkowej Hiszpanii (Rys. 9.23). Stężenia kadmu na polskich stacjach były na takim poziomie, jak na sąsiednich stacjach.

Najwyższe stężenia ołowiu w opadach ($>1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) stwierdzono na stacjach w Danii, Hiszpanii, na Węgrzech i Słowacji. Najmniejsze wartości odnotowały stacje na Wyspach Brytyjskich i w Skandynawii. Stężenia ołowiu w opadach na polskich stacjach były zbliżone do odnotowanych na stacjach sąsiednich.

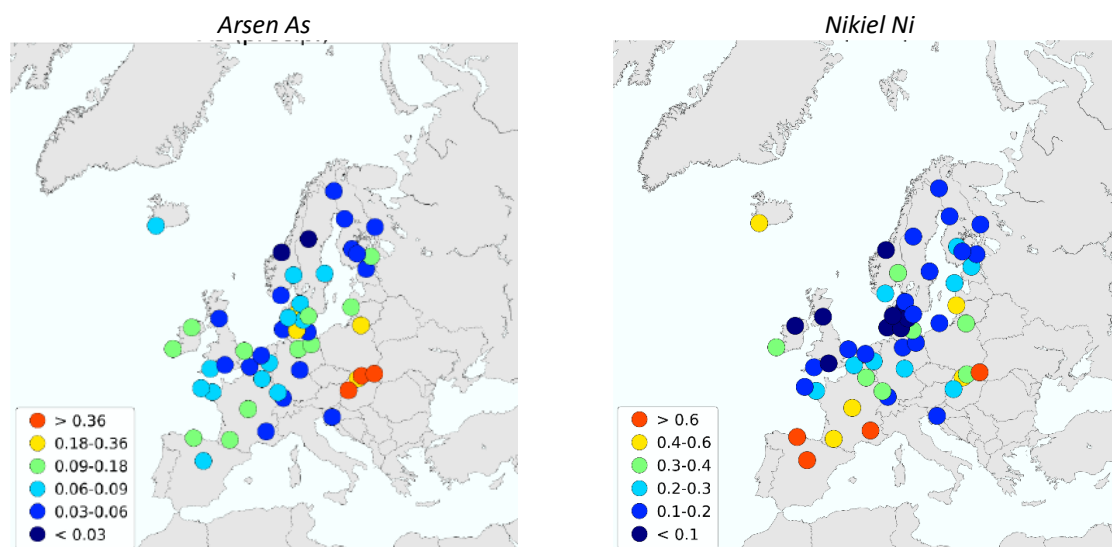


Rys. 9.23. Wyniki pomiarów stężenia kadmu i ołowiu w opadach [$\mu\text{g}/\text{dm}^3$] na stacjach EMEP w 2022 roku Źródło: EMEP [Aas W., 2024]

Najniższe wartości stężenia arsenu w opadach w roku 2022 wskazały stacje zlokalizowane w zachodniej Skandynawii. Najwyższe wartości odnotowano na Słowacji i Węgrzech

(Rys. 9.28). Stężenie arsenu na stacji Puszcza Borecka było na takim poziomie, jak na stacji w Danii i osiągnęło jedną z wyższych wartości.

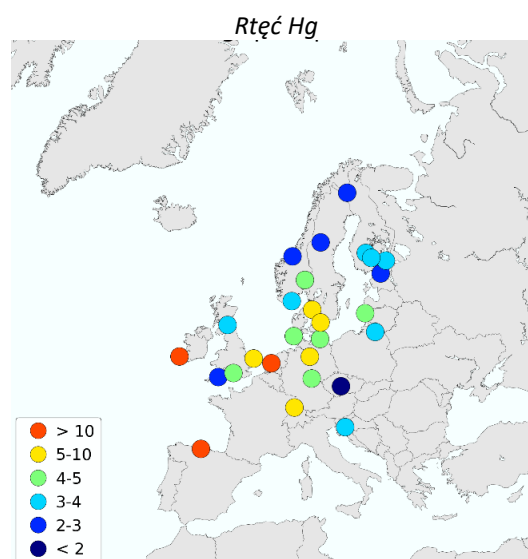
Najwyższe stężenia niklu w opadach ($>0,6 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) stwierdzono na stacjach w Hiszpanii, na południu Francji i na Słowacji. Najniższe wartości odnotowały stacje w Norwegii, na Wyspach Brytyjskich i w Danii. Stężenia niklu w opadach na polskich stacjach były zbliżone do odnotowywanych na stacjach sąsiednich (Rys. 9.24).



Rys. 9.24. Wyniki pomiarów stężenia arsenu i niklu w opadach [$\mu\text{g}/\text{dm}^3$] na stacjach EMEP w 2022 roku

Źródło: EMEP [Aas W., 2024]

Najwyższe stężenia rtęci w opadach – powyżej $10 \text{ ng}/\text{dm}^3$ – zmierzyły stacje w północnej Hiszpanii, Holandii i Wielkiej Brytanii (lokalizowane na wybrzeżach). Najniższą wartość podała stacja w Czechach ($<2 \text{ ng}/\text{dm}^3$). Na stacjach skandynawskich stężenia rtęci znajdowały się w przedziale $2\text{-}3 \text{ ng}/\text{dm}^3$. Na stacji Puszcza Borecka stężenie było zbliżone do uzyskanych przez stacje fińskie, litewską, chorwacką, irlandzką i jedną ze stacji w południowej Norwegii (Rys. 9.25).



Rys. 9.25. Wyniki pomiarów stężenia rtęci w opadach [ng/dm^3] na stacjach EMEP w 2022 roku

Źródło: EMEP [Aas W., 2024]

10. Podsumowanie wyników

Porównując wyniki badań zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego i opadów można dla roku 2023 ocenianego na tle wielolecia 1994-2022 sformułować następujące wnioski:

- w odniesieniu do zapisów *Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu* (Dz. U. z 2021 r., poz. 845) do *Ustawy Prawo ochrony środowiska* (Dz. U. z 2024 r. poz. 54, z późn. zm.) przekroczony został poziom celu długoterminowego dla ozonu – dla ochrony zdrowia i dla ochrony roślin – na wszystkich stacjach;
- średnie roczne stężenia SO_2 utrzymały na wszystkich stacjach nizinnych tendencję malejącą, osiągając wartości minimalne lub zbliżone do minimalnych w wieloleciu; na Śnieżce obserwuje się nieznaczny wzrost w ostatnich 10 latach;
- średnie roczne stężenia dwutlenku azotu NO_2 utrzymywały się w ostatnich latach na zbliżonym poziomie, na większości stacji nieznacznie niższym niż w latach 90. (z niewielką tendencją wzrostową w Puszczy Boreckiej i na Śnieżce, a malejącą w Jarczewie, odwróconą w latach 2019-2021);
- stężenia wszystkich głównych zanieczyszczeń w powietrzu w okresie wielolecia (poza chlorkami i ozonem, a także azotem azotanowym w ostatnich latach) były najwyższe na stacji w Jarczewie;
- stężenia siarczanów wykazywały tendencję malejącą na wszystkich stacjach (poza Śnieżką, gdzie od 1997 roku poziom tego zanieczyszczenia nieznacznie rośnie);
- średnie roczne stężenia azotu azotanowego (oznaczanego w sumie $\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-$) wykazywały tendencję wzrostową w okresie wielolecia, ale w 2015 roku została ona zahamowana na wszystkich stacjach, poza Śnieżką; na stacji Puszcza Borecka odnotowano spektakularny spadek stężenia w 2015 roku w stosunku do wartości z wcześniejszych siedmiu lat i stężenie utrzymuje się na tym niższym poziomie;
- średnie roczne stężenie azotu amonowego oznaczanego w postaci sumy $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ wykazywało do roku 2009 tendencję spadkową (w stosunku do wartości z lat 90.), a następnie lekką tendencję wzrostową na stacji Śnieżka i małą zmienność na stacji Łeba; w Jarczewie stężenie wahało się z roku na rok; na stacji Puszcza Borecka stężenia zaczęły zdecydowanie wzrastać od roku 2007, ale w ostatnich latach uległy stabilizacji i zmniejszeniu;
- wartości średnie roczne stężenia ozonu przyziemnego były zbliżone na stacjach nizinnych, a wyższe na stacji górskiej, wykazując nieznaczne zmiany z roku na rok w ostatnich latach; w roku 2023 średnie roczne stężenie O_3 na wszystkich stacjach było wyższe niż w poprzednim roku;
- stężenie średnie roczne dwutlenku węgla (badanego na stacji Puszcza Borecka) systematycznie rosło od roku 2002, w 2021 roku osiągnęło najwyższą wartość i na zbliżonym poziomie utrzymało się w kolejnych dwóch latach;
- stężenia rtęci gazowej na stacji Puszcza Borecka charakteryzowały się niewielką zmiennością w czasie w okresie 2004-2023 i oscylowały wokół wartości $1,50 \text{ ng/m}^3$; w 2023 roku wartość średnia wyniosła $1,42 \text{ ng/m}^3$ i była równa średniej z okresu 2004-2022 (po zmianie metody pomiarowej);
- średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM_{10} na stacji Puszcza Borecka w roku 2023 osiągnęło wartość niższą od średniej z wcześniejszego okresu objętego badaniami 2005-2022, najniższą od początku pomiarów; stężenie pyłu zawieszonego $\text{PM}_{2,5}$ (wykazując

podobne prawidłowości, jak PM₁₀) również osiągnęło najmniejszą wartość spośród wszystkich uzyskanych w okresie, gdy je badano (2009-2023); w raporcie po raz dziewiąty uwzględniono dane ze stacji Zielonka – stowarzyszonej z EMEP – gdzie średnie roczne stężenia pyłu zawieszonego PM₁₀ i PM_{2,5} były w 2023 roku bardzo zbliżone notowanych w Puszczy Boreckiej;

- wybrane metale ciężkie oznaczane w pyłe PM₁₀ wykazywały niejednakową zmienność z roku na rok, chociaż dla większości obserwowano tendencję malejącą w skali wielolecia; stężenia As, Cd, Ni i Pb zaobserwowane na stacji w Zielonce w 2023 roku były zbliżone do obserwowanych w Puszczy Boreckiej;
- w stosunku do wartości średniej z poprzednich lat badań (2008-2022), stężenie sumy WWA w Puszczy Boreckiej w roku 2023 było niższe; odnotowano zmniejszenie średnich rocznych wartości stężenia wszystkich badanych WWA (poza D(a,h)A); spadek dla sumy WWA odnotowano również w Zielonce (w stosunku do średniej z wielolecia 2015-2022);
- na wszystkich stacjach rok 2023 był przeciętny pod względem ilości opadów – roczne sumy były wyższe od średniej z lat 1994-2022 odpowiednio o 3% w Jarczewie, 4% w Łebie i o 6% na Śnieżce a niższe o 9% w Puszczy Boreckiej;
- w okresie 1994-2023 widoczne jest wyraźne przesunięcie na wszystkich stacjach w kierunku wyższych wartości pH – zwiększała się systematycznie częstość opadów w przedziałach 5,1-6,1 i 6,1-6,5 na stacjach Jarczew, Puszcza Borecka i Łeba i 4,1-4,6 na stacji Śnieżka; w ostatnich latach pH wody opadowej wzrastało w podobnym tempie na stacjach nizinnych (wzrost został zahamowany w latach 2022 i 2023), a na stacji wysokogórskiej utrzymywało się na jednakowym poziomie;
- na wszystkich stacjach nizinnych ładunki jonów wodorowych dostarczane do podłoża z opadami malały w wieloleciu; na Śnieżce malały w początkowym okresie badań, a od roku 2006 wahały się z roku na rok bez wyraźnej tendencji;
- stężenie jonów siarczanowych w opadach malało stopniowo od roku 1994 na stacjach nizinnych; na stacji wysokogórskiej spadek został zahamowany w roku 2000 i w następnych latach notowano wahania stężenia SO₄²⁻ z tendencją wzrostową;
- przebiegi stężeń jonu azotanowego w opadach, w większym niż w przypadku jonu siarczanowego stopniu, uwidoczniają różnice pomiędzy stacją na Śnieżce i pozostałymi; największe wartości notowano na stacji wysokogórskiej, a niższe i zbliżone do siebie na stacjach nizinnych;
- od roku 2000 do 2009 oraz w 2012 i 2014 najwyższe stężenia jonu amonowego w opadach obserwowano na stacji w Jarczewie; w ostatnich latach wartości z Jarczewa zrównały się jednak z wartościami z pozostałych stacji;
- największe stężenia chlorków w opadach obserwowano w całym okresie na stacji w Łebie, a najmniejsze w Jarczewie (zbliżone były też wartości w Puszczy Boreckiej);
- stężenia i ładunki metali ciężkich badanych w opadach na stacjach Łeba i Puszcza Borecka zmalały w roku 2023 w stosunku do wartości średnich z wcześniejszych lat w Łebie, a wzrosły (za wyjątkiem kadmu i niklu) w Puszczy Boreckiej.
- przeprowadzona analiza trendów stężeń zanieczyszczeń w powietrzu, opadach i depozycji wykazała, że wyniki pomiarów na stacjach tła regionalnego w Polsce, pracujących w sieci EMEP, dobrze odzwierciedlają zmiany emisji zakwaszających i eutrofizujących zanieczyszczeń powietrza. Trendy malejące odnotowano przede wszystkim dla związków siarki, dla których redukcja emisji jest najbardziej znacząca. Wyniki są mniej jednoznaczne dla związków azotu, gdyż zmiany emisji są mniej widoczne i większe znaczenie odgrywają lokalne źródła emisji tlenków azotu czy amoniaku.

Bibliografia

Aas W., Lunder Halvorsen H., Aspmo Pfaffhuber K., EMEP/CCC-Report 3/2024: Heavy metals and POP measurements 2022,

Bogucka M., 2024: Monitoring tła zanieczyszczenia atmosfery na stacjach w Łebie, Jarczewie i na Śnieżce. Raport roczny 2023. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy. (praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska),

Bogucka M., 2023: Monitoring tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce dla potrzeb EMEP, GAW/WMO i Komisji Europejskiej, Raport syntetyczny 2022. (praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska), <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/measuringstation/E>

Degórska A., Skotak K., Prządka Z., Syrzycki M., 2024: Monitoring tła zanieczyszczenia atmosfery na stacji „Puszcza Borecka”. Raport roczny 2023. Instytut Ochrony Środowiska Państwowy Instytut Badawczy (praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska),

Degórska A., Skotak K., Syrzycki M., 2022: Monitoring tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce dla potrzeb EMEP, GAW/WMO i Komisji Europejskiej, Raport syntetyczny 2021. (praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska), <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/measuringstation/E>

Dyrektywa 2004/107/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie arsenu, kadmu, rtęci, niklu i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w otaczającym powietrzu. (Dz. U. UE L23/3 z dnia 26.01.2005),

Dyrektywa 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy. (Dz. U. UE L152/1 z dnia 11.06.2008),

Dyrektywa Komisji (UE) 2015/1480 z dnia 28 sierpnia 2015 r. zmieniającej niektóre załączniki do dyrektyw Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/107/WE i 2008/50/WE,

EMEP Status Report 2/2024: Assessment of transboundary pollution with heavy metals and POPs. MSC-E&CEIP&CCC,

Gibbons R.D, Coleman D.E. 2001. “Statistical Methods for Detection and Quantification of Environmental Contamination”,

Gilbert R.O. 1987 “Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring”,

Hjellbrekke A.-G.: Data Report 2022. Particulate matter, carbonaceous and inorganic compounds. EMEP/CCC-Report 1/2024,

Jagusiewicz A. 2004. “Historia rozwoju polityki i strategii ochrony powietrza w regionie EKG ONZ w ramach implementacji Konwencji w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości” w „25 lat implementacji Konwencji EKG ONZ w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości”; Biblioteka Monitoringu Środowiska, 2004,

Jansen W., Block A., Knaack J., 1988: Kwaśne deszcze. Historia, powstawanie, skutki. *Aura* 4:88, 1988, s.18-19,

Kaczorowska Z., 1962, Opady w Polsce w przekroju wieloletnim; tendencje, okresowość oraz prawdopodobieństwo występowania niedoboru i nadmiaru opadów. *Polska Akademia Nauk. Instytut Geografii. Prace Geograficzne*, 33,

Klein H., Gauss M., Tsyro S., Nyiri A.: Transboundary air pollution by Sulphur, nitrogen, ozone and particulate matter in 2022. Poland; MSC-W Data Note 1/2024; Norwegian Meteorological Institute,

Konwencja w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości, sporządzona w Genewie dnia 13 listopada 1979 r. (Dz. U. nr 60 poz. 311 z dnia 28.12.1985 r.),

Lehmhaus J., Saltbones J., Eliassen A., 1986, A Modified Sulphur Budget for Europe for 1990. The Norwegian Meteorological Institute, EMEP/MSC-W Report 3/86,

Lityński J., 1969, Liczbowa klasyfikacja typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski. *Prace PIHM*, z. 91,

Lorenc, H., 2000: Studia nad 220-letnią (1779-1998) serią temperatury powietrza w Warszawie oraz ocena jej wiekowych tendencji. *Materiały Badawcze* 31, Seria: Meteorologia. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa

Lorenc H., Suwalska-Bogucka M., 1995: Tendencje termiczne zim w Polsce jako wskaźnik oceny zmienności klimatu. *Wiad. IMGW*, 18, 1,

Pawłowska J., Jankowska A., Pindor T., 2000: Kalendarz typów cyrkulacji atmosferycznej wg J. Lityńskiego: 1991-1999, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa,

Rozporządzenie Ministra Środowiska dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz. U. z 2021 r. poz. 845),

Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (t. j. Dz. U. 2024 poz. 870),

Salmi T., Maatta A., Antilla P., Ruoho-Airola T., Amnell T. 2002. „Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen’s slope estimates – the Excel template application MAKESENS”. *Publications on air quality* No. 31. Finnish Meteorological Institute, Helsinki 2002,

Sprawozdanie z badań jakości powietrza przeprowadzonych na stacji tła regionalnego Bory Tucholskie, Zielonka w roku 2023, Centralne Laboratorium Badawcze, Oddział w Bydgoszczy,

Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2024 r. poz. 54, z późn. zm.),

Vestreng V., Tarrasón L., Rigler E., Klein H., Benedictow A. 2006. „Emissions: progress towards the emission ceilings in Gothenburg Protocol” w “Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe since 1990 to 2004”. EMEP Status Report 1/2006 to support the Review of Gothenburg Protocol