



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

**Ocena zanieczyszczenia powietrza rtęcią
na stacjach tła regionalnego w Polsce
za 2023 rok**

Warszawa, 2024

Opracowanie wykonano na podstawie wyników Państwowego Monitoringu Środowiska na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym przez zespół w składzie: Anna Degórska, Krzysztof Skotak, Zdzisław Prządka, Marcin Syrzycki.

*Przy cytowaniu danych należy podawać źródło danych:
Państwowy Monitoring Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska*

Spis treści

1. Wprowadzenie	2
2. Przyjęte w opracowaniu założenia, kryteria i oznaczenia	3
3. Rtęć w środowisku	8
4. Monitoring rtęci w atmosferze w Polsce	11
4.1. Opis stacji	11
4.2. Metodyka pomiarów	13
5. Emisja	15
5.1. Źródła emisji rtęci	15
5.2. Produkcja i wykorzystanie rtęci	16
5.3. Emisja rtęci w krajach Unii Europejskiej	17
5.4. Struktura emisji rtęci w Polsce	19
6. Charakterystyka warunków meteorologicznych	21
7. Ocena zanieczyszczenia atmosfery rtęcią Polsce	26
7.1. Zanieczyszczenie powietrza rtęcią	26
7.2. Depozycja rtęci do podłoża	33
8. Ocena zanieczyszczenia atmosfery rtęcią w Europie	37
8.1. Zanieczyszczenie powietrza rtęcią	37
8.2. Depozycja rtęci do podłoża	41
9. Modelowanie	45
9.1. Zanieczyszczenie powietrza rtęcią	45
9.2. Depozycja rtęci do podłoża	47
9.3. Transport transgraniczny rtęci	48
10. Podsumowanie	50
11. Bibliografia	52

1. Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie wykonane zostało w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie, w ramach realizacji umowy GIOŚ/106/2024/DMŚ z dnia 6.08.2024 r. zawartej pomiędzy Instytutem a Głównym Inspektorem Ochrony Środowiska w Warszawie.

Opracowanie jest kontynuacją wcześniejszych opracowań, obejmujących ocenę zanieczyszczenia powietrza rtęcią od roku 2010 (Pyta H., Zajusz R., 2013; Falkowska L., 2014; Skotak K. i in., 2015; Falkowska L. i in., 2016; Skotak K. i in., 2017; Skotak K. i in., 2018; Skotak K. i in., 2019; Skotak K. i in., 2020; Skotak K. i in., 2021; Degórska A. i in., 2022; Degórska A. i in. 2023). Opracowania te, wykonane na podstawie umów z Głównym Inspektorem Ochrony Środowiska, są dostępne na Portalu Jakość Powietrza GIOŚ pod adresem <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/publications/publication>.

Zakres niniejszego opracowania, podobnie jak wcześniejszych, obejmuje ocenę wyników pomiarów rtęci w powietrzu atmosferycznym oraz depozycji rtęci do podłoża. Przeprowadzanie analiz zanieczyszczenia powietrza na poziomie tła regionalnego wynika z zapisów zawartych w Wykonawczym Programie Państwowego Monitoringu Środowiska na rok 2023 (pomiar) i na rok 2024 (raport), dotyczących monitoringu jakości powietrza, koordynowanego przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Przedstawione opracowanie jest elementem realizacji jednego z zadań związanych z badaniem i oceną stanu zanieczyszczenia powietrza, wykonywanych zgodnie z zapisami ustawy Prawo ochrony środowiska (Poś), umieszczonego w Wykonawczym Programie PMŚ pod nazwą „Pomiary składu pyłu zawieszanego PM10 i PM2,5, rtęci w stanie gazowym oraz depozycji metali ciężkich i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych na stacjach monitoringu tła regionalnego” (PMŚ-W, 2015; PMŚ-W, 2021; PMŚ-W, 2022; PMŚ-W, 2023; PMŚ-W, 2024).

Podstawę opracowania stanowią wyniki pomiarów prowadzonych na stacjach tła regionalnego PMŚ. Głównym celem opracowania było przeprowadzenie oceny stopnia zanieczyszczenia powietrza i opadów rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce w ostatnich 14 latach (okres 2010-2023). W opracowaniu zawarto charakterystykę stacji, z których pochodzą analizowane wyniki ze wskazaniem miejsc wykonywania pomiarów stężenia rtęci w powietrzu i poboru próbek opadów oraz metod pomiarów rtęci w powietrzu atmosferycznym i depozycji całkowitej. Ponadto wyniki stężeń i ładunków w Polsce odniesiono (tam, gdzie to było możliwe) do stężeń i ładunków badanych na pozamiejskich stacjach tła w Europie.

Wszystkie wyniki pomiarów z Polski zostały zaczerpnięte z bazy danych JPOAT. Przyjęte kryteria selekcji danych są zgodne z obowiązującymi przepisami prawnymi. Na stacji w Zielonce uzyskano mniejszą kompletność danych (75%), braki wystąpiły w listopadzie i grudniu. Serię wykorzystano w opracowaniu, zaznaczając, że nie jest ona w pełni kompletna. W opracowaniu skupiono się przede wszystkim na ocenie trendów wyników uzyskanych na poszczególnych stacjach w latach 2010-2023, ze szczególnym zwróceniem uwagi na zmiany w ostatnich dwóch latach (2023 w odniesieniu do roku poprzedniego) oraz w roku 2023 na tle wielolecia 2010-2022.

W przypadku oceny wykonanej dla Europy, analizy przeprowadzono dla ostatnich dostępnych danych pochodzących z okresu 2010-2022. Podstawą tej oceny były dane zgromadzone w dwóch bazach danych:

- bazie AirBase (do której, za pośrednictwem GIOŚ, regularnie wprowadzane są również dane z Polski), prowadzonej przez Europejską Agencję Środowiska EAŚ (Baza EEA1, Baza EEA2),
- bazie danych EMEP (baza ebas).

Dla depozycji, w przypadkach rozbieżności wyników zawartych w bazach EAŚ i EMEP dla danej stacji, jako bardziej wiarygodne uwzględniono wyniki pochodzące z bazy EMEP.

Ponadto, w celu dokonania pełniejszej oceny zanieczyszczenia atmosfery rtęcią, w opracowaniu przeanalizowano wyniki obliczeń modelowych przeprowadzonych przez Meteorologiczne Centrum Syntetyzujące – Wschód (MSC-E) EMEP, na podstawie danych dotyczących emisji rtęci przygotowanych przez Centrum Inwentaryzacji i Prognoz Emisji EMEP (Centre on Emission Inventories and Predictions CEIP) oraz danych meteorologicznych opracowanych przez Europejskie Centrum Prognoz Średnioterminowych (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF).

Analizy danych przeprowadzono z uwzględnieniem zmienności parametrów meteorologicznych na wybranych stacjach osłonowych zlokalizowanych najbliżej omawianych w opracowaniu stacji tła regionalnego PMŚ, na których wykonywane są pomiary rtęci. Podstawą oceny zmienności warunków meteorologicznych były informacje i dane pochodzące z bazy danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego pn. „Dane publiczne IMGW-PIB” (Baza IMGW-PIB). Do analizy cyrkulacji atmosferycznej wykorzystano dane udostępnione bezpośrednio z IMGW-PIB.

W opracowaniu, wzorem lat ubiegłych, przedstawiono również analizę emisji rtęci w Polsce na tle danych z Unii Europejskiej i domeny EMEP. Źródłem danych w skali kraju były informacje opracowane przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami Instytutu Ochrony Środowiska – Państwowego Instytutu Badawczego i opublikowane przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska (MKiŚ, 2024) oraz Główny Urząd Statystyczny (GUS, 2023). Dane dotyczące emisji w krajach Unii Europejskiej zaczerpnięto z bazy danych EMEP (Baza CEIP).

2. Przyjęte w opracowaniu założenia, kryteria i oznaczenia

W opracowaniu uwzględniono wymagania określone w aktualnym *Rozporządzeniu Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (RMŚ, 2020) wraz z rozporządzeniem Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 3 października 2022 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (RMS, 2022)*. Wcześniej obowiązywało *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2018 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (RMŚ, 2018)* (które z kolei stanowiło nowelizację *Rozporządzenia z dnia 13 września 2012 r. (RMŚ, 2012)*). Rozporządzenia te transponują zapisy:

- *Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (KE, 2008),*

- *Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/107/WE z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie arsenu, kadmu, niklu, rtęci i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w otaczającym powietrzu (KE, 2004),*
- *Dyrektywy 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 ustanawiających przepisy dotyczące metod referencyjnych, zatwierdzania danych i lokalizacji punktów pomiarowych do oceny jakości powietrza (KE, 2015).*

Podstawą oceny warunków meteorologicznych w Polsce w latach 2010–2023 były wyniki pomiarów temperatury i wysokości opadu atmosferycznego prowadzonych na tzw. stacjach osłonowych (stacjach prowadzonych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy): w Częstochowie, Chojnicach, Kozienicach, Legnicy, Raciborzu i w Suwałkach. Stacje te zlokalizowane są w regionach, w których funkcjonują omawiane w opracowaniu stacje PMŚ.

Analizę wielkości oraz struktury emisji rtęci w Polsce omówiono na podstawie najbardziej aktualnych i dostępnych danych inwentaryzacji emisji wykonanej na poziomie krajowym z roku 2022.

Zmienność stężeń rtęci całkowitej w powietrzu atmosferycznym na poszczególnych stacjach monitoringu wykonujących oznaczenia tego zanieczyszczenia w Polsce przedstawiono na podstawie analiz serii dobowych, zaś depozycji – na podstawie wyników miesięcznych. W celu zestawienia wyników stężeń Hg w powietrzu pochodzących ze wszystkich stacji w jednolity sposób, umożliwiając porównanie wyników w skali wielolecia, wyniki pomiarów pochodzące ze stacji automatycznych (wartości 1 godzinne) uśredniono do wartości dobowych przy zachowaniu zasad kompletności serii i pokrycia czasu w roku, określonych w aktualnym *Rozporządzeniu Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (RMŚ, 2020)*. Od 2021 roku na wszystkich omawianych stacjach tła regionalnego w Polsce pomiary stężeń rtęci gazowej są wykonywane metodą automatyczną; wcześniej na stacji Puszcza Borecka stosowano metodę manualną, a na pozostałych stacjach – automatyczną.

Do oceny poziomów stężeń w powietrzu atmosferycznym i depozycji rtęci w Europie, wybrano wszystkie stacje pozamiejskie tła, na których w latach 2010–2022 prowadzono pomiary rtęci (ostatnie dostępne dane w bazie europejskiej są z roku 2022), spełniające przyjęte kryteria selekcji danych. Podstawą analizy wyników pomiarów stężeń były zasoby bazy AirBase (do której, za pośrednictwem GIOŚ, regularnie wprowadzane są również polskie dane ze stacji PMŚ), prowadzonej przez Europejską Agencję Środowiska (EAŚ). W przypadku depozycji, podstawę stanowiły wyniki zawarte w bazie AirBase oraz w bazie EMEP (raportowe w ramach Konwencji LRTAP). Założono, że wszystkie wyniki w bazach danych są zweryfikowane (z reguły nie korygowano wartości). Wyjątek stanowiły sytuacje, gdy wartości w bazach ewidentnie wskazywały na błąd podania jednostki lub gdy różnice wartości depozycji pomiędzy danymi zgromadzonymi w bazie AirBase i EMEP dla danej stacji były znaczne. Wówczas do dalszych analiz przyjęto wartości z bazy EMEP. Wyniki pomiarów depozycji w bazie EMEP przechowywane są w postaci ładunku a nie wskaźnika depozycji ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{dzień}$). W celu przedstawienia w opracowaniu wielkości wskaźnika depozycji, dla każdej stacji pomiarowej na podstawie ładunku, wykonano obliczenie z uwzględnieniem długości okresu

pomiarowego. Oznacza to, że wyniki badań na niektórych stacjach europejskich mogą być przedstawione jako wynik obliczeń i tym samym mogą być obarczone dodatkową niepewnością.

W analizach uwzględniono obliczone przez EAŚ parametry statystyczne. W przypadku wykonywania pomiarów rtęci na tej samej stacji różnymi metodami (np. dla różnych czasów uśredniania, metodami automatycznymi i manualnymi i/lub różnymi metodami oznaczania w laboratoriach), w pierwszej kolejności wybierano wyniki pomiarów wykonywane metodą referencyjną i/lub z referencyjnym czasem uśredniania. W przypadku metod równorzędnych, wybierano wyniki dla serii pomiarowej przedstawiającej gorszą sytuację (wyższe stężenie). Podawane w opracowaniu wartości dla każdego kraju obliczono jako średnią arytmetyczną z wartości średnich rocznych z pojedynczych stacji funkcjonujących na jego terenie. Wartości minimalne i maksymalne w kraju odnoszą się do pojedynczej stacji.

Wyniki pomiarów z polskich i europejskich stacji poddano analizie trendów. Do poszukiwania i analizy trendów w rocznych seriach danych charakteryzujących stężenie w powietrzu i wskaźniki depozycji rtęci 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. 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. 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 wykorzystuje wielkość Z . Dodatnia wartość Z świadczy o trendzie rosnącym, a ujemna – o malejącym. Test stosowany jest dla serii pomiarowych zawierających więcej niż 10 danych.

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 krótszych niż 10 lat serii nie wskazywano trendu - (oznakowanie NA).

Na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto następujące skróty i oznaczenia (używane najczęściej w tabelach i na rysunkach):

Skróty nazw własnych:

AirBase – baza danych Europejskiej Agencji Środowiska

EAŚ – Europejska Agencja Środowiska

GIOŚ – Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

GUS – Główny Urząd Statystyczny

IOŚ-PIB – Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy

IMGW-PIB – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

KOBIZE – Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami IOŚ-PIB

PMŚ – Państwowy Monitoring Środowiska

EMEP – Międzynarodowy program współpracy w dziedzinie monitoringu i oceny przenoszenia zanieczyszczeń powietrza na duże odległości w Europie (Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants in Europe)

Konwencja LRTAP – Konwencja w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution)

Parametry statystyczne dla zanieczyszczenia powietrza:

Sa – stężenie średnie roczne,

Sa min – minimalne stężenie średnie roczne,

Sa max – maksymalne stężenie średnie roczne,

S lato – stężenie średnie w okresie letnim (IV-IX),

Szima – stężenie średnie w okresie zimowym (I-III, X-XII),

S24 – stężenie średnie dobowe,

S24min – minimalne stężenie średnie dobowe,

S24max – maksymalne stężenie średnie dobowe,

Parametry statystyczne dla depozycji:

Da – sumaryczna roczna depozycja do podłoża,

D lato – sumaryczna depozycja do podłoża w okresie letnim (IV-IX),

Dzima – sumaryczna depozycja do podłoża w okresie zimowym (I-III, X-XII),

Da min – minimalna miesięczna depozycja do podłoża,

Da max – maksymalna miesięczna depozycja do podłoża,

Dwa – średni roczny wskaźnik depozycji do podłoża,

Dwl – średni wskaźnik depozycji do podłoża w lecie,

Dwz – średni wskaźnik depozycji do podłoża w zimie,

Dwa min – minimalny miesięczny wskaźnik depozycji do podłoża,

Dwa max – maksymalny miesięczny wskaźnik depozycji do podłoża.

Kody krajów wg ISO:

AT - Austria

BA - Bośnia i Hercegowina

BE - Belgia

BG - Bułgaria

CH - Szwajcaria

CY - Cypr

CZ - Czechy

DE - Niemcy

DK - Dania

EE - Estonia

ES - Hiszpania

FI - Finlandia

FR - Francja

GB - Wielka Brytania

GR - Grecja

HR - Chorwacja

HU - Węgry

IE - Irlandia

IS - Islandia
IT - Włochy
LT - Litwa
LU - Luksemburg
LV - Łotwa
MK - Macedonia
MT - Malta
NL - Niderlandy (Holandia)
NO - Norwegia
PL - Polska
PT - Portugalia
RO - Rumunia
RS - Serbia
SE - Szwecja
SI - Słowenia
SK - Słowacja (Republika Słowacji)
TR - Turcja
XK - Kosowo

3. Rtęć w środowisku

Rtęć w środowisku występuje na trzech poziomach utlenienia, jako Hg^0 (rtęć pierwiastkowa), Hg^{1+} (związki rtęciawe) i Hg^{2+} (związki rtęciowe). Rtęć tworzy różne związki, pojawiające się w różnych stanach skupienia:

- Hg elementarna występuje w środowisku zarówno w postaci gazowej, jak i w postaci ciekłej;
- Hg nieorganiczna występuje w postaci np. chlorku rtęci $HgCl_2$, chlorku rtęciawego, tzw. kalomelu Hg_2Cl_2 , octanu rtęci $Hg(CH_3COO)_2$, siarczku rtęci HgS , siarczanu rtęci $HgSO_4$, azotanu rtęci $Hg(NO_3)_2$ oraz tlenku rtęci HgO ;
- Hg organiczna występuje w postaci monometylortęci $MeHg$ i dimetylortęci Me_2Hg (Gworek, 2013).

Stężenie rtęci w powietrzu zależy od stopnia lotności jej związków. Ilość odparowanej rtęci podwaja się wraz ze wzrostem temperatury o $10^\circ C$. Lotność związków rtęci kształtuje się w następującej kolejności (szereg malejący): $Hg^0 > Hg_2Cl_2 > HgCl_2 > HgS > HgO$. Rtęć w powietrzu (98% w formie gazowej) występuje w trzech stopniach utlenienia. Dominującą jest rtęć elementarna, stanowiąca około 95% całkowitej masy, rtęć na drugim stopniu utlenienia występuje w niewielkich ilościach, a rtęć na pierwszym stopniu utlenienia występuje w ilościach śladowych. Utlenianie rtęci elementarnej jest najważniejszym procesem usuwania rtęci z powietrza. Głównymi reakcjami utleniania gazowej rtęci elementarnej Hg^0 są:

- reakcja z ozonem O_3 ;
- reakcja z rodnikiem hydroksylowym ($\cdot OH$);
- reakcja z rodnikiem azotanowym ($\cdot NO_3$);
- reakcja ze związkami i rodnikami chloru, bromu i jodu.

Utlenione formy związków rtęci występują w powietrzu w bardzo niskich stężeniach (pg/m^3) i z powodu niskich ciśnień pary szybko ulegają suchej depozycji do podłoża.

Rtęć w powietrzu występuje również w fazie wodnej: w kroplach deszczu, we mgle i chmurach. Rodzaj przemian rtęci zależy od wielu czynników takich jak temperatura, nasłonecznienie i odczyn wody opadowej lub chmurowej. Rozpuszczona w wodzie rtęć elementarna może ulegać utlenianiu, a końcowym produktem tych reakcji jest przeważnie forma jonowa Hg^{2+} .

Czas przebywania rtęci w powietrzu zależy od wielu czynników, poza warunkami meteorologicznymi i różnymi jej formami również od występowania zanieczyszczeń powietrza:

- gazowa rtęć elementarna (Hg^0)- 6 do 18 miesięcy;
- związki chemiczne rtęci w formie utlenionej (Hg^{2+}) i zawarte w cząsteczkach pyłu – szybko usuwane z powietrza w raz z suchą i mokrą depozycją – kilka godzin do kilku dni.

Gazowa rtęć elementarna, ze względu na długi okres usuwania z powietrza, może być transportowana na duże odległości.

O zanieczyszczeniu powietrza rtęcią decyduje:

- bieżąca emisja ze źródeł naturalnych;
- bieżąca emisja ze źródeł antropogenicznych;
- reemisja z historycznego depozytu ze źródeł naturalnych i antropogenicznych;

- szybkość depozycji mokrej i suchej.

Światowe tło zanieczyszczenia powietrza rtęcią określa się na 1,5-2,0 ng/m³. Oceniając zmiany światowego tła zanieczyszczenia na podstawie pomiarów w 6 stacjach w północnej i południowej hemisferze, stwierdza się wzrost zanieczyszczenia od roku 1970, które osiągnęło maksimum w roku 1980. Następnie odnotowano spadek do roku 1996, po czym zanieczyszczenie pozostało na tym samym poziomie – na półkuli północnej na poziomie 1,5- 1,7 ng/m³ całkowitej rtęci gazowej. Zawartość rtęci w powietrzu na Antarktydzie była niższa niż tło światowe i w latach 2007-2011 wynosiła ok. 0,93 ng/m³(Gworek i in. 2013).

Wpływ rtęci na zdrowie ludzi

Jak w przypadku wszystkich toksycznych substancji, efekty działania rtęci są zależne od dawki. Rtęć w różnych formach jest częściowo zatrzymywana w organizmie, a niektóre tkanki mają tendencję do jej akumulowania. Najdłużej w organizmie człowieka pozostaje metylortęć (Miklavčič i in., 2013). Rtęć wpływa głównie na system nerwowy, nerki, a po inhalacji, na płuca. Co ważne, metylortęć przekracza barierę krew-łożysko 10 razy wydajniej niż inne formy rtęci, a co za tym idzie, przedstawia znaczne zagrożenie dla rozwoju zarodków (Young-Seoub i in., 2012). Ekspozycja w okresie niemowlęcym wpływa na rozwój mózgu i układu nerwowego. Może to skutkować uszkodzeniami wzroku i słuchu, upośledzać zdolności motoryczne, powodować opóźnienia w rozwoju mowy i pamięci (Bose-O'Reilly i in., 2010, Grandjean and Herz, 2011).

Ostatnie badania wykazały również, że u osób starszych ekspozycja na rtęć może zwiększać ryzyko wystąpienia chorób sercowo-naczyniowych (Karagas i in., 2012) i powodować problemy z ciśnieniem krwi (Genchi i in., 2017).

Działania międzynarodowe

Problem zanieczyszczenia rtęcią jest rozpatrywany na arenie międzynarodowej od wielu dziesięcioleci.

W 1998 r. 33 europejskie i północnoamerykańskie kraje podpisały Protokół z Aarhus w sprawie metali ciężkich (UNECE, 1998), jako część w Konwencji w sprawie transgranicznego zanieczyszczenia powietrza na dalekie odległości (CLRTAP). Postawiono wymagania w celu zmniejszenia wykorzystania rtęci w produktach, a także zmniejszenia emisji rtęci, kadmu i ołowiu do powietrza z przemysłu, procesów spalania i przetwarzania odpadów. Protokół z Aarhus wszedł w życie w 2001 roku, w konsekwencji czego UE wdrożyła kilka polityk mających na celu zmniejszenie emisji rtęci.

W 2002 r. Organizacja Narodów Zjednoczonych (ONZ) zleciła badanie w celu określenia globalnego wpływu rtęci na środowisko i zdrowie ludzi (UNEP, 2002). Stwierdzono, że rtęć stwarza znaczące ryzyko dla środowiska i że niezbędne są dalsze działania międzynarodowe. W październiku 2013 r. zostało przyjęte porozumienie międzynarodowe, obecnie znane jako Konwencja z Minamaty (UNEP, 2017). Została ona dotychczas ratyfikowana przez ponad 100 Stron, w tym Polskę (w 2021 r.). Powszechne przyjęcie Konwencji to pierwsze międzynarodowe zobowiązanie w globalnej walce przeciwko zanieczyszczeniu rtęcią. Celem tej Konwencji jest ochrona zdrowia ludzi i środowiska przed antropogenicznymi emisjami i uwolnieniami rtęci i związków rtęci. Konwencja z Minamaty obejmuje następujące zagadnienia: podaż, handel, produkty z dodatkiem rtęci, emisja do powietrza, górnictwo złota

na małą skalę, uwolnienia do wody i ziemi, odpady, miejsca zanieczyszczone, pomoc techniczna i finansowa, wymiana informacji, świadomość społeczna i edukacja, badania i monitoring, aspekty zdrowotne, plany wdrożeniowe oraz raportowanie.

Działania w Unii Europejskiej

W Europie pierwsze regulacje prawne dotyczące rtęci zostały przyjęte prawie cztery dekady temu. Początkowe regulacje zakazały używania substancji zawierających rtęć jako pestycydów (EU, 1978). Jednak eksport tych związków do krajów spoza Europy pozostawał legalny przez ponad 20 lat, do momentu gdy zostały one zakazane - do 2003 r. (EU, 2003). Wprowadzane są też regulacje dotyczące emisji ze źródeł przemysłowych – Dyrektywa IED (EU, 2010). Dzięki powyższemu w krajach Unii Europejskiej większość wymagań zapisanych w Konwencji z Minamaty jest już spełniona przez obowiązujące prawodawstwo. Pomimo tego dla wzmocnienia unijnych przepisów dotyczących rtęci w 2017 roku wprowadzono dalsze regulacje (EU, 2017).

Przepisy wprowadzają zakazy i ograniczenia w następujących dziedzinach:

- przywóz rtęci metalicznej;
- wywóz produktów rtęciowych;
- dotychczasowe zastosowanie rtęci w procesach przemysłowych;
- nowe zastosowania rtęci w produktach i procesach;
- tradycyjne wydobycie i przetwarzanie złota na małą skalę (rzemieślnicze).

W ramach dalszych działań w 2021 r. przyjęto Konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (BAT) w odniesieniu do dużych obiektów energetycznego spalania zgodnie z dyrektywą 2010/75/UE. Odnoszą się one do spalania paliw w instalacjach o całkowitej nominalnej mocy w paliwie wynoszącej 50 MW lub więcej, zgazowania węgla lub innych paliw w instalacjach o całkowitej nominalnej mocy dostarczonej w paliwie wynoszącej 20 MW, unieszkodliwiania lub odzysku odpadów we współspalarniach odpadów (przy wskazanych wydajnościach). Konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (BAT) służą jako odniesienie przy ustalaniu warunków pozwolenia w przypadku wymienionych instalacji zaś właściwe organy powinny określać dopuszczalne wartości emisji, dzięki którym w normalnych warunkach eksploatacji emisje nie przekroczą poziomów powiązanych z najlepszymi dostępnymi technikami określonymi w decyzjach dotyczących konkluzji BAT.

4. Monitoring rtęci w atmosferze w Polsce

4.1. Opis stacji

Zgodnie z wymaganiami określonymi w aktualnym *Rozporządzeniu Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (RMŚ, 2020)*, a tym samym z dyrektywami 2008/50/WE¹, 2004/107/WE² i 2015/1480³ pomiary zanieczyszczenia powietrza rtęcią i depozycji całkowitej (podobnie jak innych metali ciężkich i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA)) prowadzi się w Polsce na wybranych stacjach pomiarowych tła regionalnego. Wynika to z faktu, że rtęć jest substancją bardzo niebezpieczną dla zdrowia ludzkiego (posiada zdolność kumulowania się w organizmach) i występuje w całym środowisku. Obowiązek ten został uwzględniony w obowiązujących w okresie dokonywanej oceny Programach Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2010-2012 (PMŚ, 2009), 2013-2015 (PMŚ, 2012), 2016-2020 (PMŚ, 2015), 2020-2025 (PMŚ, 2020) oraz w Wykonawczych Programach Państwowego Monitoringu Środowiska na kolejne lata. Podstawowe cele wykonywania tych pomiarów to monitorowanie transgranicznego przenoszenia zanieczyszczeń oraz opracowywanie ocen jakości powietrza na stacjach tła regionalnego.

Do realizacji programu określonego dla stacji tła regionalnego zostały wytypowane przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska następujące stacje tła regionalnego:

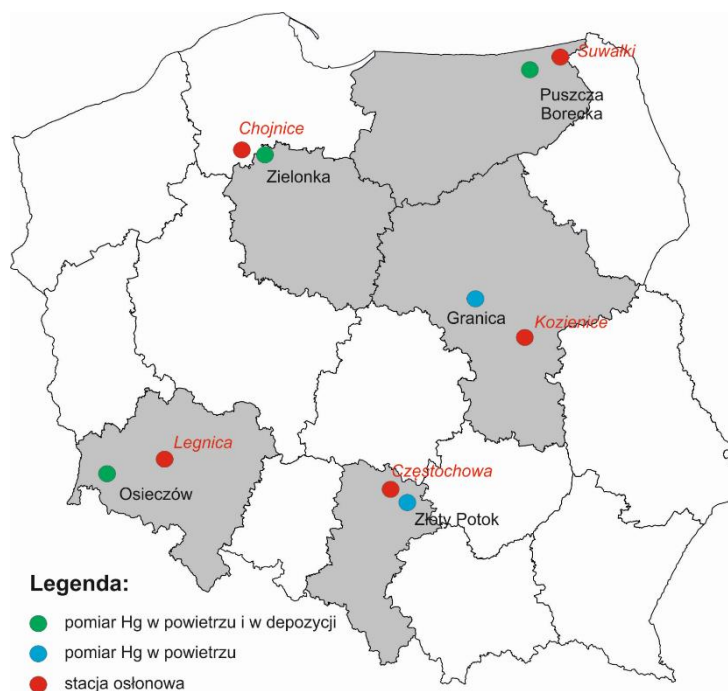
- Granica (województwo mazowieckie),
- Osieczów (województwo dolnośląskie),
- Puszcza Borecka (województwo warmińsko-mazurskie),
- Zielonka (województwo kujawsko-pomorskie),
- Złoty Potok (województwo śląskie).

Lokalizację stacji tła regionalnego w Polsce wraz z osłonowymi stacjami meteorologicznymi pokazano na mapie (Rys. 4.1).

¹Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (KE, 2008)

²Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/107/WE z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie arsenu, kadmu, niklu, rtęci i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w otaczającym powietrzu (KE, 2004)

³Dyrektywa Komisji (UE) 2015/1480 z dnia 28 sierpnia 2015 r. zmieniająca niektóre załączniki do dyrektyw Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/107/WE i 2008/50/WE ustanawiających przepisy dotyczące metod referencyjnych, zatwierdzania danych i lokalizacji punktów pomiarowych do oceny jakości powietrza (KE, 2015)



Rys. 4.1. Lokalizacja stacji tła regionalnego oraz osłonowych stacji meteorologicznych (źródło danych: PMŚ/IOŚ-PIB)

Podstawowe informacje o stacjach zamieszczono w tabeli 4.1, wskazując ich lokalizację, jednostkę nadzorującą (właściciela stacji) oraz kody stacji funkcjonujące od 2017 roku w krajowym Systemie Informatycznym Ekoinfonet (SI Ekoinfonet) i Europejskiej Sieci Informacji i Obserwacji Środowiska (EIONET). Ponadto, dla każdej stacji podano informacje o tym, która stacja meteorologiczna została wytypowana jako stacja osłonowa. Dane z tych stacji wykorzystano do oceny zmienności warunków meteorologicznych w rejonie tych stacji w latach 2010-2023 (rozdział 5). W tabeli zaznaczono również elementy programu pomiarowego realizowanego w roku 2023.

Tab.4.1. Podstawowe informacje o stacjach tła regionalnego w Polsce (źródło danych: PMŚ/IMGW-PIB)

Informacja	Granica	Osieczów	Puszcza Borecka	Zielonka	Złoty Potok
Województwo	mazowieckie	dolnośląskie	warmińsko-mazurskie	kujawsko-pomorskie	śląskie
Współrzędne	20°27'20" E	15°25'54" E	22°02'17" E	17°56'00" E	19°27'29" E
	52°17'09" N	51°09'04" N	54°07'30" N	53°39'00" N	50°42'38" N
Właściciel stacji	GIOŚ	GIOŚ	IOŚ-PIB	GIOŚ	GIOŚ
Kod w SI Ekoinfonet	MzGranicaKPN	DsOsieczow21	WmPuszczaBor	KpZielBoryTu	SlZlotPotLes
Kod w EIONET	PL0128A	PL0505A	PL0005R	PL0077A	PL0243A
Stacja osłonowa	Kozienice	Legnica	Suwałki	Chojnice	Częstochowa
Rtęć w powietrzu	+	+	+	+	+
Depozycja rtęci		+	+	+	

4.2. Metodyka pomiarów

Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (RMŚ, 2020) oraz obowiązujące w okresie objętym analizami niniejszego opracowania Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2018 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (RMŚ, 2018) i Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. (RMŚ, 2012), zgodnie z postanowieniami Dyrektywy 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 wskazują metodyki referencyjne poboru próbek i analiz:

- dla rtęci gazowej zgodnie z normą PN-EN 15852: Jakość powietrza atmosferycznego. Standardowa metoda oznaczania rtęci gazowej całkowitej;
- dla depozycji rtęci zgodnie z normą PN-EN 15853: Jakość powietrza atmosferycznego. Standardowa metoda oznaczania depozycji rtęci.

Pomiary stężenia całkowitej rtęci gazowej (TGM) na stacjach tła regionalnego w Osieczowie, Zielonce, Żłotym Potoku oraz na stacji w Granicy prowadzone były w sposób ciągły. Od początku pomiarów stosowano tam automatyczne spektrometry fluorescencyjne (CVAFS), rejestrujące godzinne wartości stężeń rtęci gazowej firmy Tekran. W połowie roku 2019 stacje te zostały wyposażone w nowe analizatory rtęci wykorzystujące metodę absorpcyjnej spektrometrii atomowej Zeemana (Zeeman AAS) firmy Lumex. Na stacjach w Granicy i Żłotym Potoku nowe analizatory zastąpiły stare w czerwcu 2019 roku, w Osieczowie i Zielonce prowadzono pomiary równoległe obiema metodami, a serie z roku 2019 w całości pochodzą ze starych analizatorów. Prezentowane w raporcie wyniki z lat 2020 i 2021 zostały uzyskane przy wykorzystaniu nowych analizatorów Lumex. Pomiary w stacji Puszcza Borecka w latach 2010-2020 wykonywano aspiracyjną metodą manualną wg wytycznych EMEP, z częstością raz na tydzień. Próbkę pobierano przez 24 godziny z zateżaniem rtęci na tzw. złotej pułapce (szklana rurka do poboru próbek powietrza o długości 10-12 cm, wypełniona sorbentem, którego skład stanowiły drobne elementy (1-2 mm) kwarcowe powleczone złotem), a następnie poddawano ją termodesorpcji i oznaczeniu metodą spektrometrii absorpcyjnej z użyciem analizatora AMA-254. W roku 2020 stację Puszcza Borecka wyposażono również w analizator Lumex i przeprowadzono wstępną serię pomiarową (równoległe z pomiarami manualnymi). Seria pomiarowa z 2021 roku, ze względu na problemy techniczne i wykorzystywanie dwóch różnych analizatorów (zastępczego w czasie naprawy pracującego rutynowo), nie była prezentowana w raporcie za 2021 rok.

W tabeli 4.2 zestawiono informacje o metodach pomiarów stężeń całkowitej rtęci gazowej stosowane przez stacje tła regionalnego w 2023 roku.

Tab. 4.2. Informacje o metodach pomiaru stężenia całkowitej rtęci gazowej na stacjach tła regionalnego w Polsce w 2022 (źródło danych: GIOŚ, IOŚ-PIB)

Informacja	Granica	Osieczów	Zielonka	Żłoty Potok	Puszcza Borecka
Metoda oznaczania	Zeeman AAS - absorpcyjna spektrometria atomowa Zeemana				
Nazwa urządzenia	Lumex				
Typ urządzenia	RA-915AM				
Rok produkcji	2019			2020	

Na stacjach tła regionalnego: Osieczów, Puszcza Borecka i Zielonka badano zawartość rtęci w opadach całkowitych. Wartości depozycji obliczano na podstawie stężenia rtęci i wysokości opadu (obliczanej na podstawie masy/objętości zebranych opadów). Do pobierania próbek opadu do określenia wielkości depozycji rtęci wykorzystywano kolektory opadu całkowitego (o konstrukcji otwartej) – Eigenbrodt na stacjach GIOŚ, kolektor wg wzoru IVL na stacji IOŚ- PIB. W tabeli 4.3 przedstawiono podstawowe informacje o metodach pobierania próbek opadu całkowitego do pomiaru wielkości depozycji rtęci.

Zebrane na stacjach GIOŚ próbki opadów poddawano mineralizacji i oznaczano metodą CV-AFS z użyciem analizatora Millennium Merlin. W przypadku stacji Puszcza Borecka oznaczenia wykonywano metodą CV-AFS z użyciem analizatora Tekran 2600 w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie (Tab. 4.4).

Tab. 4.3. Informacje o metodach pobierania próbek depozycji rtęci na stacjach tła regionalnego w Polsce (źródło danych: GIOŚ, IOŚ-PIB)

Informacja	Osieczów	Puszcza Borecka	Zielonka
Typ urządzenia	kolektor opadu całkowitego	kolektor opadu całkowitego	kolektor opadu całkowitego
Nazwa urządzenia	NSA 181/KD	IVL	NSA 181/KE
Producent urządzenia	Eigenbrodt	IVL	Eigenbrodt
Rok produkcji	2019	2002	2019
Objętość butli	5 dm ³	0,5 dm ³	5 dm ³
Materiał, z którego wykonane są butle i lej	szkło kwarcowe	szkło borokrzemowe	szkło kwarcowe
Temperatura próbek w aparacie	+4 do +6 °C	otoczenia (zimną ok. +5°C)	+4 do +6 °C
Opcja podgrzewania leja	tak	tak	tak
Częstotliwość zmiany butli	co 4-5 tygodni	co 1 tydzień	2 razy w miesiącu
Metoda określania wysokości opadu	obliczeniowa na podstawie masy próbki	obliczeniowa na podstawie masy próbki + deszczomierz Hellmanna	obliczeniowa na podstawie masy próbki
Sposób zabezpieczania próbek	utrwalanie HNO ₃	utrwalanie HNO ₃	utrwalanie HCl+bromek-bromian potasu

Tab. 4.4. Informacje o metodach pomiaru depozycji rtęci na stacjach tła regionalnego w Polsce (źródło danych: GIOŚ, IOŚ-PIB)

Informacja	Osieczów	Puszcza Borecka	Zielonka
Metoda oznaczania	system fluorescencji atomowej	system fluorescencji atomowej	system fluorescencji atomowej
Nazwa urządzenia	Millennium Merlin	Tekran	Millennium Merlin
Typ urządzenia	PSA 10.025	Model 2600	PSA 10.025
Rok produkcji	2009		2010

5. Emisja

5.1. Źródła emisji rtęci

Emisja rtęci może być podzielona na emisję pierwotną i re-emisję (albo re-mobilizację), czyli emisję wtórną. Pierwotna emisja dotyczy rtęci, która jest po raz pierwszy uwalniana do środowiska, bezpośrednio ze źródeł naturalnych (np. wulkanów) lub antropogenicznych. Re-emisja odnosi się do rtęci ponownie wprowadzanej do powietrza lub wody po jej wcześniejszym uwolnieniu ze źródła. Na przykład rtęć z powietrza jest deponowana do oceanu a po pewnym czasie z oceanu re-emitowana do atmosfery i wtedy nie pochodzi z pierwotnego źródła, jak np. działalność przemysłowa.

Szacuje się, że ok. 10% światowej emisji rtęci do atmosfery pochodzi ze źródeł naturalnych, a 30% ze źródeł antropogenicznych. Pozostałe 60% to re-emisja rtęci pierwotnie wyemitowanej, głównie w wyniku działalności człowieka.

Działalność człowieka, w wyniku której rtęć dostaje się do środowiska można podzielić na:

- taką, w której rtęć jest używana w prowadzonych procesach (np. wytwarzanie chlorku winylu),
- taką, w której rtęć trafia do środowiska w sposób nie zamierzony, głównie w wyniku używania surowców zanieczyszczonych rtęcią; głównym przykładem jest spalanie węgla kamiennego, brunatnego i drewna, podczas którego uwalniana jest rtęć zawarta w paliwie.

Źródła naturalne:

- wybuchy wulkanów,
- erozja gleb,
- pożary.

Źródła antropogeniczne:

- użytkowanie rtęci: procesy chemiczne (np. wytwarzanie chlorku winylu), kopalnie złota, baterie, żarówki, stomatologia;
- emisja związana z różnymi procesami, jako efekt uboczny: spalanie paliw stałych, przetwórstwo metali, produkcja cementu, rafinerie ropy, zagospodarowanie odpadów (składowiska i spalarnie).

W skali światowej w 2010 roku 37% emisji rtęci pochodziło z małych kopalń złota, 24% ze spalania węgla, 13% z przetwórstwa metali, 9% z produkcji cementu, po 5% z produkcji złota na dużą skalę i z odpadów zawierających rtęć, a 9% z innych źródeł.

Szacuje się, że rocznie na świecie emituje się 2000-2500 ton rtęci, przy czym w ostatnich latach emisja w Europie i Ameryce Północnej maleje, a w Azji (w wyniku działalności przemysłowej i spalania paliw), Afryce i Ameryce Południowej (z powodu wydobycia złota) rośnie (EEA, 2018). Większość globalnej emisji rtęci ma miejsce w Azji (49%, z czego 27% przypada na Wschodnią Azję), następnie w Afryce (17%) i Ameryce Południowej (13%) (EMEP, 2021).

5.2. Produkcja i wykorzystanie rtęci

Poniżej przedstawiono informacje zaczerpnięte z Raportu Europejskiej Agencji Środowiska *Mercury in Europe's environment. A priority for European and global action* (EEA, 2018).

Rudy rtęci przez tysiące lat były wydobywane na niewielką skalę. Wydobycie znacząco wzrosło w XVI wieku, gdy zaczęto je wykorzystywać w procesie pozyskiwania rud srebra. W połowie XIX wieku wykorzystanie rtęci wzrosło wraz z uruchomieniem kopalni złota i rewolucją przemysłową w Europie. Kolejne wzrosty miały miejsce w latach 40-tych i 70-tych XX wieku, gdy znalazła zastosowanie militarne (materiały wybuchowe). Potem wydobycie zmniejszyło się znacząco, chociaż w ostatnich latach niektóre kopalnie znowu zostały otwarte. Obecnie rtęć jest wydobywana tylko w 4 krajach: Chinach, Indonezji, Kirgistanie i Meksyku. Produkcja rtęci została przeniesiona do regionów o największym zapotrzebowaniu (w małych kopalniach złota i do produkcji chlorku winylu), podczas gdy Europa i Ameryka Północna wprowadziły ograniczenia dotyczące produkcji, handlu i użytkowania rtęci.

Rtęć jest wykorzystywana jako surowiec w różnych procesach przemysłowych. Szacuje się, że w roku 2015 zużyto na świecie 4716 ton rtęci. Zaobserwowano tendencję wzrostową w stosunku do 2005 roku, głównie za sprawą użytkowania rtęci w małych kopalniach złota i przy produkcji chlorku winylu. Do danych tych należy podchodzić ostrożnie ze względu na zmiany w metodyce szacowania zużycia.

37% światowego zużycia rtęci przypada na małe kopalnie złota a 26% na produkcję chlorku winylu (służącego do wytwarzania PCV). Używa się jej także przy produkcji chemikaliów, żarówek, baterii oraz w stomatologii (plomby dentystyczne).

Wzrost zużycia rtęci w produkcji chlorku winylu jest związany ze wzrostem zapotrzebowania w krajach rozwijających się na takie produkty, jak np. plastikowe ramy okienne. W takich krajach, jak Chiny stosowane są procesy oparte na wykorzystaniu rtęci, podczas gdy w krajach rozwiniętych (np. w Europie) stosowane są technologie wolne od rtęci.

Rzemieślnicze wydobycie złota w małej skali w kopalniach w Azji, Afryce, Ameryce Środkowej i Południowej polega na oczyszczaniu i ekstrakcji złota z wydobywanej rudy. Rtęć jest używana do oddzielenia złota od innych materiałów w wydobytej rudzie. Powstaje amalgamat, który następnie jest poddawany obróbce termicznej, w której rtęć odparowuje i pozostaje złoto. Praktycznie cała rtęć jest wprowadzana do środowiska. Prowadzone są badania nad możliwością zastąpienia rtęci boraksem.

W Europie podjęto działania zmierzające do zakończenia używania rtęci w procesach przemysłowych i produktach. Nie używa się jej w małych kopalniach złota (poza Gujaną Francuską, stanowiącą terytorium Francji) a przy produkcji chlorku winylu stosowano ją tylko w jednej fabryce na Słowacji.

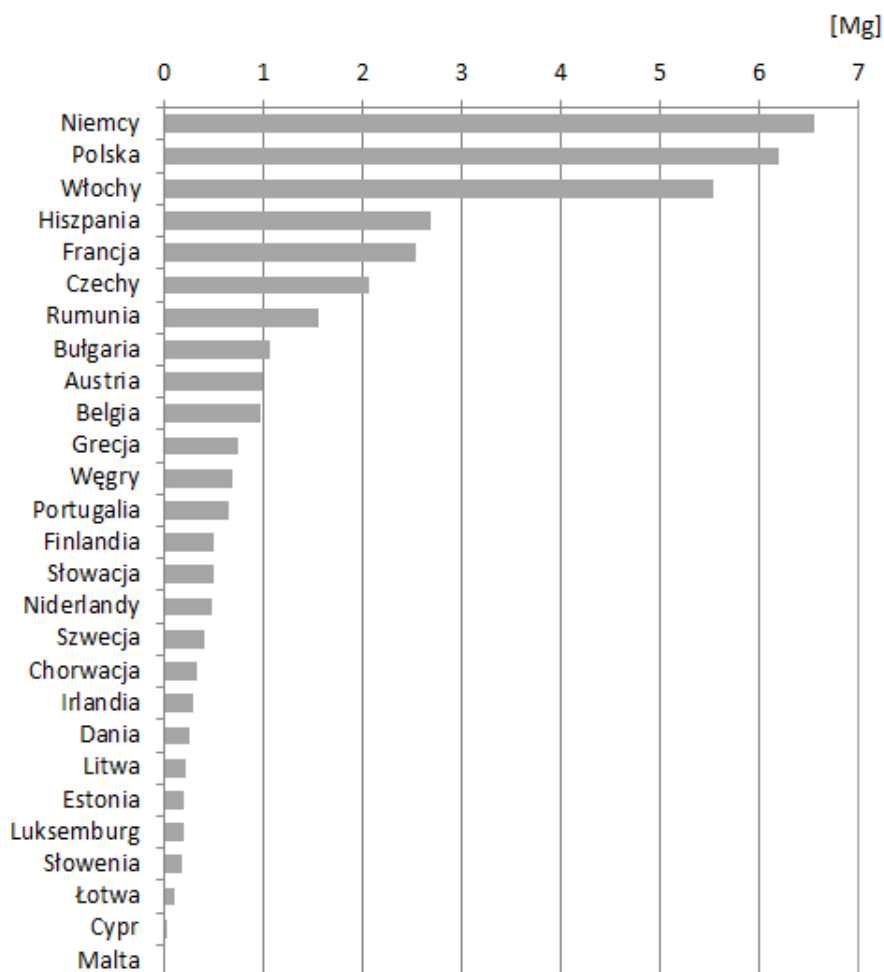
W krajach Unii Europejskiej w 2015 roku 85 ton rtęci zużyto w przemyśle chloro-alkalicznym a 56 ton w stomatologii. Ponieważ w 2017 roku zakazano używania rtęci w przemyśle przy produkcji związków chloru, to główne zużycie przypada na stomatologię.

W 2015 roku w Europie zużyto 249 ton rtęci, co stanowi 5% jej światowego zużycia. W tym samym roku we Wschodniej i Południowo-wschodniej Azji zużyto 2407 ton rtęci.

Wypełnienia (plomby) zawierające w swoim składzie ok. 50% rtęci są używane w stomatologii od XIX wieku ze względu na niski koszt i dużą trwałość. Przyjmując, że ok. 75% spośród 500 mln mieszkańców Unii Europejskiej ma plomby zawierające rtęć zgromadzone jest w ich organizmach ok. 1500 ton rtęci. Może ona być uwolniona do środowiska na przykład w procesie kremacji. Alternatywą dla plomb zawierających rtęć są wypełnienia kompozytowe, które są coraz częściej stosowane w Europie, ale ze względu na koszty są mniej popularne w krajach o niższych dochodach. Obecne prawodawstwo Unii Europejskiej zabrania stosowania plomb zawierających rtęć w zębach mlecznych, u dzieci poniżej 15 roku życia oraz u kobiet ciężarnych i karmiących. Kraje członkowskie Unii Europejskiej są zobowiązane do opracowania planów zmniejszania zużycia rtęci w stomatologii.

5.3. Emisja rtęci w krajach Unii Europejskiej

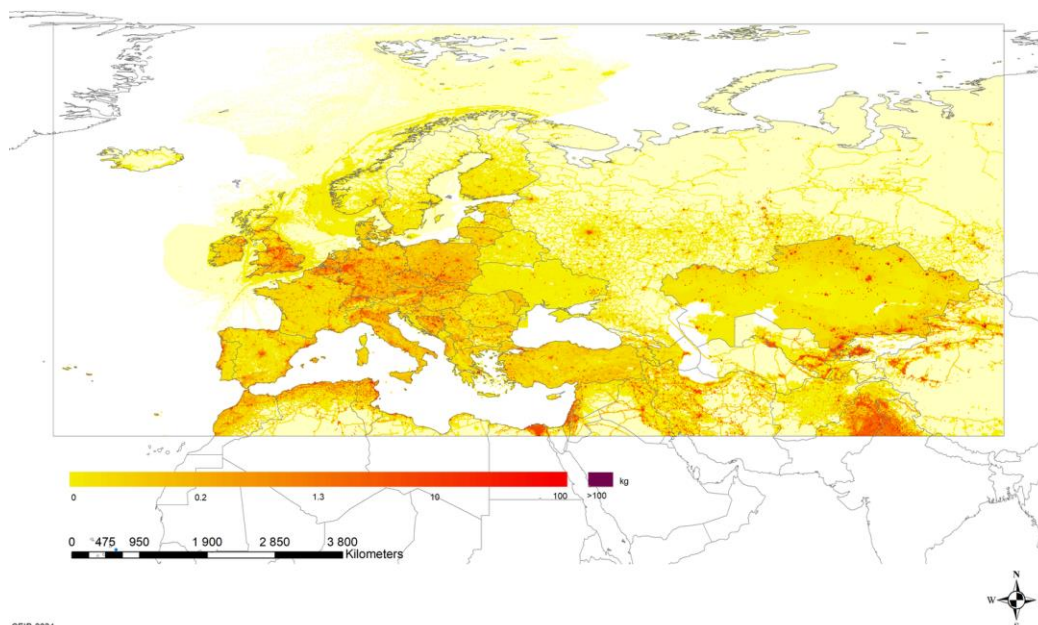
Według danych gromadzonych w ramach *Konwencji w sprawie transgranicznego zanieczyszczenia powietrza na dalekie odległości (Konwencja LRTAP)*, w 27 krajach Unii Europejskiej w 2022 roku wyemitowano ze źródeł antropogenicznych 35,96 Mg rtęci (ostatnie dostępne dane raportowane przez kraje-strony Konwencji, wykorzystywane do obliczeń modelowych). Wśród krajów o największej emisji rtęci znajdują się: Niemcy, Polska, Włochy, Hiszpania, Francja, Czechy, Rumunia i Bułgaria (Rys. 5.2). Z krajów tych pochodziło w sumie 75% rtęci wyemitowanej w roku 2022 na obszarze UE27. Warto zaznaczyć, że blisko połowę rtęci pochodzącej z Unii Europejskiej wyemitowały pierwsze 3 kraje w tym rankingu, a wśród nich na drugim miejscu znajduje się Polska. Znacząca emisja pochodzi z Wielkiej Brytanii, która już nie jest uwzględniana w zestawieniu dla krajów Unii Europejskiej (gdyby uwzględnić ten kraj w rankingu, to zajęłaby 3 miejsce). Najmniejszą emisję rtęci odnotowano w najmniejszych krajach: na Łotwie, w Luksemburgu, na Cyprze i na Malcie (Rys. 5.1). W stosunku do roku 2010 we wszystkich krajach, poza Łotwą, Bułgarią i Austrią odnotowano spadek emisji, co spowodowało, że sumaryczna emisja rtęci na obszarze Unii Europejskiej (przy uwzględnieniu 27 krajów) była w 2022 roku o blisko 52% mniejsza.



Rys. 5.1. Wielkości emisji rtęci w 27 krajach Unii Europejskiej w roku 2022 [Mg]
 (źródło danych: <http://webdab01.umweltbundesamt.at>)

Emisja z 27 krajów Unii Europejskiej w 2022 roku stanowiła 28,4% emisji całkowitej z domeny EMEP, czyli obszaru objętego *Konwencją LRTAP* – Europy, Centralnej Azji i Kaukazu. Udział ten był mniejszy niż w roku 2010, gdy wyniósł 34,2%. Udział Polski w emisji z Unii Europejskiej w 2022 roku wynosił 17,3% (wzrost w stosunku do roku 2010 o 2,6 punktu procentowego), a w emisji z domeny EMEP 4,9% (spadek o 1,9 punktu procentowego w stosunku do roku 2010).

Rozkład przestrzenny emisji rtęci w siatce EMEP wskazuje na lokalizację obszarów o największej emisji rtęci spośród krajów Unii Europejskiej w Niemczech, w Polsce, w północnych Włoszech, a spośród innych krajów – w Wielkiej Brytanii, Serbii, Bośni i Hercegowinie oraz w Turcji (Rys. 5.2).



CEIP-2024

Rys. 5.2. Rozkład przestrzenny emisji rtęci w domenie EMEP w roku 2022 [kg] (siatka $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$)
(źródło: www.ceip.at/the-emep-grid/gridded-emissions/hg)

5.4. Struktura emisji rtęci w Polsce

Prezentowane dane dotyczące wielkości emisji rtęci z poszczególnych sektorów zaczerpnięto z opracowania przygotowanego przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (MKiŚ, KOBIZE, 2024). Dane zostały przygotowane w oparciu o obowiązującą obecnie strukturę źródeł emisji w układzie klasyfikacji NFR (*Nomenclature for Reporting*). Jest ona wykorzystywana przy raportowaniu do *Konwencji EKG ONZ w sprawie transgranicznego zanieczyszczenia powietrza na dalekie odległości (CLRTAP)* oraz do Unii Europejskiej w ramach *Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/2284 z dnia 14 grudnia 2016 r. w sprawie redukcji krajowych emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych* (tzw. dyrektywie pułapowej), a także na potrzeby statystyki krajowej. We wcześniejszych opracowaniach dotyczących zanieczyszczenia powietrza rtęcią (do 2019 r.) prezentowano dane dotyczące emisji w układzie sektorów SNAP.

W roku 2022 krajowa emisja rtęci wyniosła 6,21 Mg; w stosunku do emisji z poprzedniego roku była ona o 26,9% mniejsza.

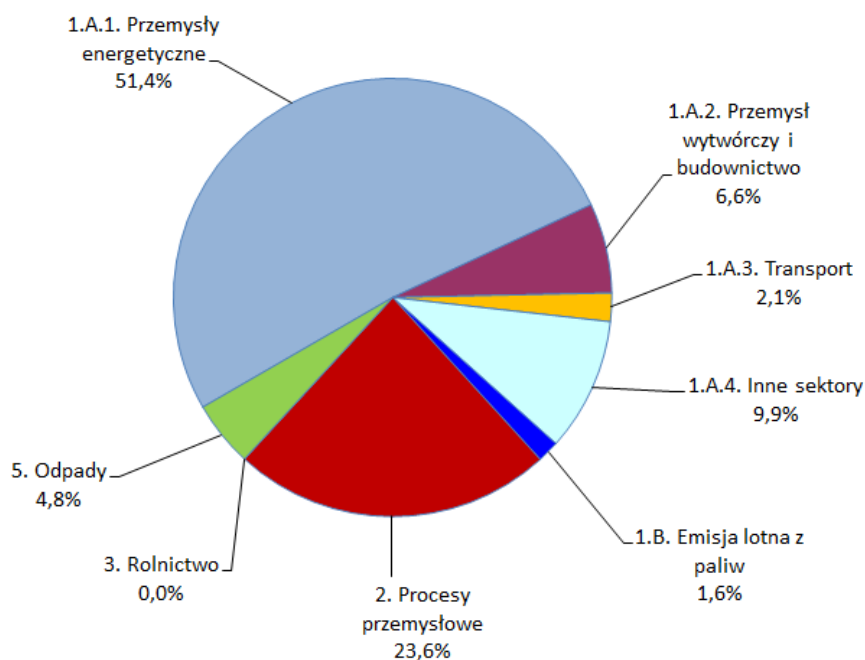
W tabeli 5.1. zestawiono wielkości emisji rtęci z głównych sektorów NFR w roku 2022.

Tab. 5.1. Emisja rtęci w Polsce z głównych sektorów (NFR) w roku 2022 (źródło danych: MKiŚ, KOBiZE, 2024)

Źródła emisji	Emisja Hg
	[Mg]
1. Energia	4,45
A. Spalanie paliw	4,33
1. Przemysły energetyczne	3,18
2. Przemysł wytwórczy i budownictwo	0,41
3. Transport	0,13
4. Inne sektory	0,61
B. Emisja lotna z paliw	0,12
2. Procesy przemysłowe	1,46
A. Produkty mineralne	0,30
B. Przemysł chemiczny	0,00
C. Produkcja metali	0,95
D. Stosowanie rozpuszczalników i innych produktów	0,21
G. – L. Inne	0,00
3. Rolnictwo	0,00
B. Nawozy naturalne	0,00
D. Gleby rolne	0,00
F. Spalanie resztek roślinnych	0,00
5. Odpady	0,30
A. Składowiska odpadów stałych	0,00
C. Spopielanie i otwarte spalanie odpadów	0,30
D. Gospodarka ściekami	0,00
E. Inne	0,00
Suma	6,21

Udział emisji z poszczególnych sektorów w emisji krajowej rtęci w 2022 roku zaprezentowano na rysunku 5.3.

Dominującym źródłem emisji rtęci jest spalanie paliw w sektorze 1A1. *Przemysły energetyczne*. W roku 2022 z tego sektora pochodziło 51,4% rtęci. Na kolejnych miejscach – ze znacznie mniejszym udziałem w całkowitej emisji Hg – znalazły się: *Procesy przemysłowe* – 23,6%, następnie *Inne sektory* (gdzie mieszczą się instytucje, handel, usługi, gospodarstwa domowe, spalanie paliw w rolnictwie, leśnictwie i rybołówstwie) – 9,9%, *Przemysł wytwórczy i budownictwo* – 6,6% oraz *Odpady* – 4,8%. W dalszej kolejności znalazły się kategorie: *Transport* – 2,1% i *Emisja lotna z paliw* – 1,6%. Emisja z pozostałych sektorów była pomijalnie mała.



Rys. 5.3. Główne sektory emisji rtęci w Polsce w 2022 roku (źródło danych: MKiŚ, KOBiZE, 2024)

Biorąc pod uwagę emisję rtęci w roku 2022 z zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza można stwierdzić, że 46,9% emisji krajowej z tego typu zakładów miało źródło w województwie łódzkim (główne źródło - elektrownia w Bełchatowie). Na kolejnych miejscach znalazły się województwa: dolnośląskie (12,9% emisji), wielkopolskie (7,3%), śląskie (7,2%) i świętokrzyskie (7,2%). Listę zamykają województwa podlaskie i warmińsko-mazurskie (odpowiednio 0,5% i 0,1% emisji rtęci z zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza w Polsce); brak danych dla województwa lubuskiego (GUS, 2023).

6. Charakterystyka warunków meteorologicznych

W niniejszym rozdziale przedstawiono podstawowe informacje dotyczące zmienności wybranych wielkości meteorologicznych w roku 2023 na tle roku poprzedniego i okresu 2010-2022. W ocenie uwzględniono zmiany temperatury i wysokości opadu oraz kierunku napływu mas powietrza, wynikającego z cyrkulacji atmosferycznej. Analizy warunków meteorologicznych w rejonach stacji tła przeprowadzono na podstawie danych IMGW-PIB, pochodzących z wybranych stacji - reprezentatywnych, jeśli chodzi o warunki meteorologiczne w rejonach analizowanych stacji tła (patrz rozdział 4). W analizach uwzględniono wyniki pomiarów z najbliższych stacji meteorologicznych zwanych osłonowymi. Dane o opadach z meteorologicznych stacji osłonowych posłużyły tylko do oceny skali i tendencji zmian warunków opadowych w rejonach stacji tła regionalnego. Dlatego też, wielkość depozycji rtęci do podłoża obliczono na podstawie wyników pochodzących z kolektorów zlokalizowanych na poszczególnych stacjach tła regionalnego.

Temperatura powietrza

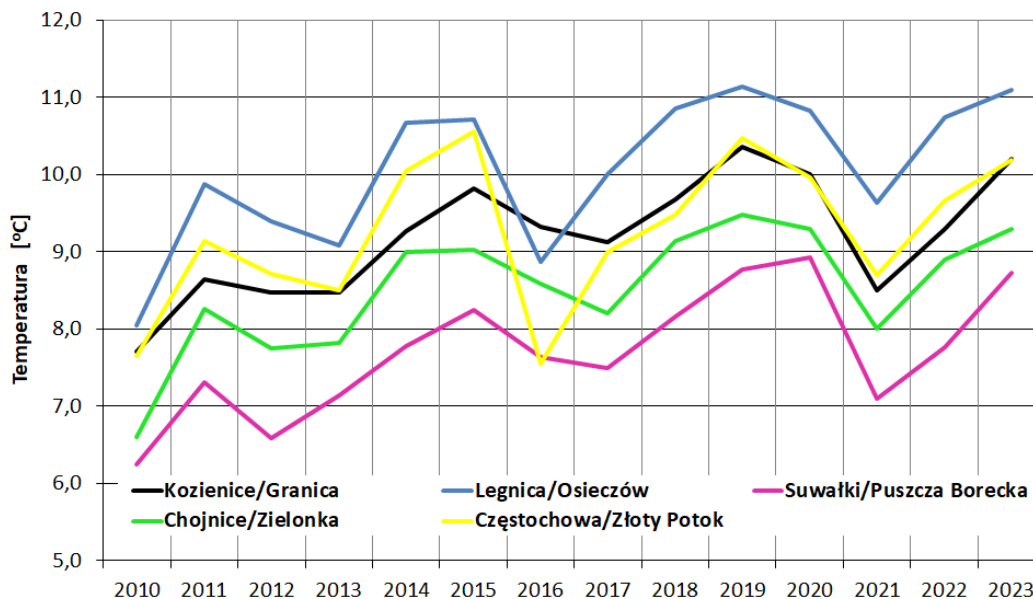
Temperatura powietrza jest głównym parametrem meteorologicznym mającym bezpośredni i pośredni wpływ na obserwowane stężenia rtęci w powietrzu. W sezonie chłodnym, przy niskich temperaturach powietrza zwiększa się zapotrzebowanie na ciepło i tym samym wzrasta emisja rtęci w wyniku produkcji energii pochodzącej ze spalania paliw kopalnych (w tym przede wszystkim węgla). W sezonie ciepłym, wysoka temperatura sprzyja reakcjom zachodzącym w atmosferze i tworzeniu się wtórnego aerozolu z rtęcią, natomiast przy bardzo wysokich temperaturach zwiększa się produkcja energii (i tym samym zwiększa się emisja zanieczyszczeń do atmosfery) w wyniku jej zapotrzebowania dla urządzeń chłodzących. Obie sytuacje przy niekorzystnych warunkach rozpraszania zanieczyszczeń mogą sprzyjać powstawaniu sytuacji epizodycznych.

W roku 2023 średnie roczne temperatury powietrza na wszystkich uwzględnionych w opracowaniu stacjach były zdecydowanie wyższe w stosunku do wartości z roku poprzedniego i w stosunku do średniej z wielolecia 2010- 2022 (Tab. 6.1). Na wszystkich stacjach temperatura była zróżnicowana, ale wyższa średnio o około 7% w stosunku do roku poprzedniego, natomiast względem średniej z okresu wcześniejszego – wyższa o 12%. W północno-wschodniej Polsce (Suwałki/Puszcza Borecka) wartości temperatury były, jak zwykle, najniższe, a w południowo-zachodniej Polsce (Legnica/Osieczów) - najwyższe.

Tab. 6.1. Średnie roczne temperatury w latach 2010-2023 i ich względne zmiany; wyniki ze stacji ośłonowych dla wymienionych stacji tła regionalnego (źródło danych: IMGW-PIB)

Parametr	Okres	Stacja				
		Granica	Osieczów	Puszcza Borecka	Zielonka	Złoty Potok
Temperatura [°C]	2022	9,3	10,7	7,8	8,9	9,7
	2023	10,2	11,1	8,7	9,3	10,2
	2010-2022	9,1	10,0	7,6	8,5	9,2
Różnica względna [%]	2023/2022	9,8%	3,3%	12,4%	4,5%	5,4%
	2023/(2010-2022)	11,7%	11,0%	14,5%	9,9%	10,9%

W stosunku do wcześniejszego okresu (2010-2022) największy wzrost temperatury zanotowano dla rejonu stacji Puszcza Borecka, Granica i Osieczów (o 1,1°C), a najmniejszy wzrost (o 0,8°C) – w rejonie stacji Zielonka. Rok 2023 pod względem termicznym był kolejnym, najcieplejszym okresem w Polsce w rozważanym 14-leciu, cieplejszym od roku poprzedniego o około 0,6°C. Niewątpliwie najchłodniejszym okresem w rejonach omawianych stacji był rok 2010, po którym temperatury były generalnie wyższe (Rys.6.1). Można stwierdzić, że w latach 2010-2023 tendencja zmian temperatury na wszystkich 5 stacjach jest dodatnia, o średnim wzroście 1,3°C/10 lat (przy współczynniku korelacji $R^2=0,42$).



Rys. 6.1. Średnie roczne wartości temperatury powietrza w latach 2010-2023 w rejonach stacji tła regionalnego (źródło danych: IMGW-PIB)

Podsumowując można stwierdzić, że rok 2023 należał do najcieplejszych okresów w wieloleciu. Na takie warunki miały wpływ względnie ciepłe miesiące zimowe i upalne miesiące letnie.

Opad atmosferyczny

Drugim istotnym elementem meteorologicznym, poza temperaturą powietrza, mającym wpływ na jakość powietrza atmosferycznego oraz wielkość deponowanych ładunków do podłoża jest opad atmosferyczny, który wymywa z atmosfery zanieczyszczenia, w tym związki rtęci.

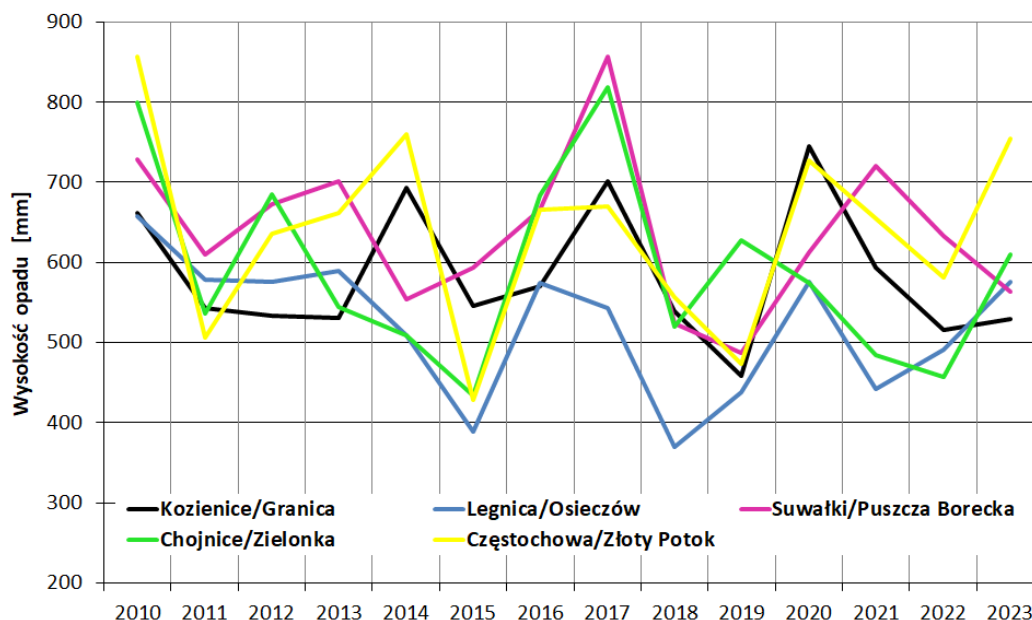
W 2023 roku sumaryczna wysokość opadu w rejonach większości stacji była wyższa w stosunku do wartości z roku poprzedniego (różnice względne wyniosły od ok. 3% w okolicach Granicy do ok. 33% w Zielonce) z wyjątkiem rejonu Puszczy Boreckiej, gdzie odnotowano spadek o około 11% (Tab. 6.2). W stosunku do wartości średniej dla wielolecia (2010-2022) opady w roku 2023 były generalnie wyższe (o 2,5%), przy czym wzrosty wyniosły od ok. 3% na stacji osłonowej dla Zielonki do 20% dla stacji w Złotym Potoku. Na stacjach osłonowych dla Granicy i Puszczy Boreckiej odnotowano spadki, odpowiednio o ok. 10% i 12%.

Tab. 6.2. Roczne sumy wysokości opadu w latach 2010-2023 i ich względne zmiany (źródło danych: IMGW-PIB)

Parametr	Okres	Stacja				
		Granica	Osieczów	Puszcza Borecka	Zielonka	Złoty Potok
Wysokość opadu [mm]	2022	515,2	490,8	632,6	457,4	581,2
	2023	529,2	576,2	563,4	609,9	754,6
	2010-2022	587,0	518,0	643,0	590,3	629,1
Różnica względna [%]	2023/2022	2,7%	17,4%	-10,9%	33,3%	29,8%
	2023/(2010-2022)	-9,9%	11,2%	-12,4%	3,3%	20,0%

W roku 2023 na większości stacji przeważały, jak zwykle, opady w ciepłej połowie roku. Jednak w rejonie stacji Puszcza Borecka zauważono rzadko spotykaną przewagę opadów w chłodnej połowie roku nad opadami w ciepłej połowie roku.

Cechą charakterystyczną warunków opadowych obserwowanych na stacjach w roku 2023 był wzrost opadów na większości stacji osłonowych względem poprzedniego roku.



Rys. 6.2. Sumy roczne wysokości opadu w latach 2010-2023 w rejonach stacji tła regionalnego (źródło danych: IMGW-PIB)

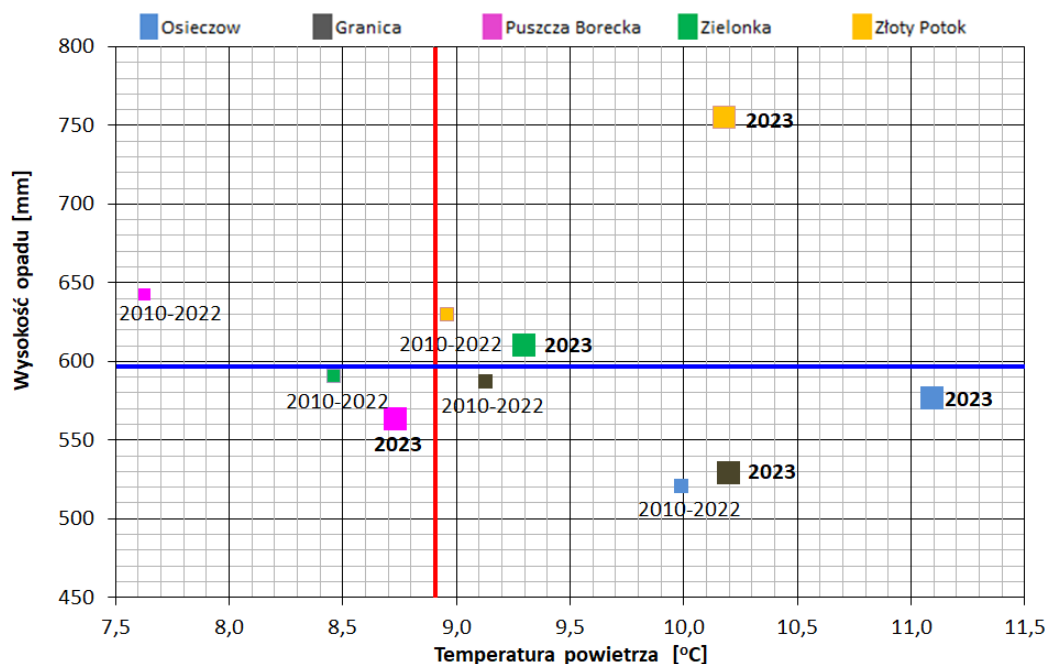
Warunki termiczno-opadowe

Charakterystykę warunków termiczno-opadowych dla rejonów każdej stacji w okresie 2010-2022 przedstawiono na rysunku 6.3. Linie pionową i poziomą wyznaczono na podstawie wartości średnich obliczonych dla wszystkich stacji osłonowych z okresu analizowanych 14 lat, odpowiednio dla temperatury powietrza (kolor czerwony) i sumarycznej wysokości opadów (kolor niebieski). Punkt przecięcia się tych linii wyznacza przeciętne wartości rocznej temperatury powietrza i rocznej sumy wysokości opadu w latach 2010-2023.

Należy zauważyć, że o ile reprezentatywność przestrzenna wybranych stacji osłonowych pod względem temperatury powietrza jest bardzo dobra (różnice w stosunku do wyników pomiarów prowadzonych na wybranych stacjach tła regionalnego z reguły nie przekraczały poziomu błędów pomiarów), o tyle reprezentatywność pod względem wysokości opadów jest dużo gorsza, ponieważ opady należą do najbardziej zmiennych w czasie i przestrzeni elementów meteorologicznych. Stąd też wysokości opadów na stacjach osłonowych i na stacjach tła mogą się między sobą różnić. Różnice te mogą być pogłębione także z powodu stosowania innej metody pomiaru. Na osłonowych stacjach meteorologicznych IMGW-PIB stosowane są deszczomierze umieszczone na wysokości 1 m n.p.g., natomiast na stacjach tła - kolektory opadu o większej powierzchni wlotu opadu, umieszczone na wysokości 1,5 m n.p.g.

Najcieplejszym w roku 2023 spośród omawianych obszarów Polski był rejon stacji Osieczów, zaś najchłodniejszym - rejon stacji Puszcza Borecka, podobnie jak w poprzednich latach.

Opady w 2023 roku w stosunku do poprzedniego roku i wielolecia 2010-2022 były dość zróżnicowane pod względem sumarycznej wysokości. Można zauważyć (Rys.6.3), że w rejonie stacji Złoty Potok opady były nie tylko najwyższe, ale i najbardziej odbiegające od opadów przeciętnych. Najniższe opady i niższe niż w wieloleciu wystąpiły w rejonie Granicy.



Rys. 6.3. Charakterystyka warunków termiczno-opadowych w latach 2010-2023 dla uśrednionych wartości temperatury i wysokości opadu dla stacji osłonowych 5 stacji tła regionalnego (źródło danych: IMGW-PIB)

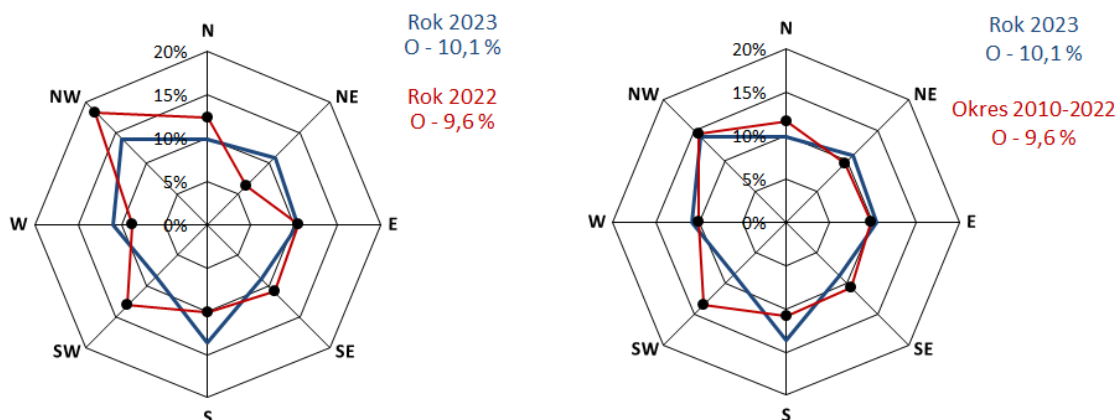
Można zauważyć, że w roku 2023 najbardziej zbliżonymi do przeciętnych warunków meteorologicznych dotychczas analizowanych pod względem temperatury powietrza i wysokości opadów były rejon stacji Puszcza Borecka i Granica.

Kierunek napływu mas powietrza – cyrkulacje

Przedstawione kierunki cyrkulacji powietrza charakteryzują przeciętne kierunki napływu mas powietrza nad obszar Polski (obliczone na podstawie wartości dobowych - danych IMGW- PIB). Warunki o nieokreślonym kierunku napływu mas powietrza i ze słabszymi na ogół wiatrami oznaczane są poprzez cyrkulację typu „0”. Cyrkulacja atmosferyczna, jako element wielkoskalowy, lepiej odzwierciedla ruchy mas powietrza niosącego zanieczyszczenia niż kierunki wiatru mierzone na stacjach na wysokości 10 m n.p.g., uwarunkowane często orografią terenu i zalesieniem.

W roku 2023 nad Polskę najczęściej napływały masy powietrza z kierunku północno-zachodniego (14,0% czasu w roku) i południowego (13,7% czasu). Najrzadziej obserwowano napływy mas powietrza z kierunku wschodniego i północno-wschodniego, obserwowane

przez niecałe 10% czasu. W stosunku do roku poprzedniego przeważały kierunki północno-wschodni i południowy, kosztem kierunków północno- i południowo-zachodniego.



Rys. 6.4. Częstość występowania poszczególnych kierunków cyrkulacji atmosferycznej w 2023 roku na tle wartości z roku 2022 i okresu 2010-2022 (źródło danych: IMGW-PIB)

W roku 2023 cechą charakterystyczną napływu mas powietrza nad stację tła w stosunku do lat wcześniejszych była ponadprzeciętna częstość występowania wiatrów z kierunków południowego i północno-wschodniego i niższa częstość wiatrów z kierunków południowo-zachodniego, południowo-wschodniego i północnego. Nieco wyższa niż przeciętna w minionych latach była częstość występowania cyrkulacji typu 0.

7. Ocena zanieczyszczenia atmosfery rtęcią Polsce

W rozdziale przedstawiono ocenę stopnia zanieczyszczenia atmosfery rtęcią (stężenia w powietrzu i depozycję) na stacjach tła regionalnego w latach 2010-2023.

7.1. Zanieczyszczenie powietrza rtęcią

Ocenę zanieczyszczenia powietrza rtęcią w postaci gazowej w latach 2010-2023 wykonano na podstawie wyników pomiarów z pięciu stacji tła regionalnego: Granica, Osieczów, Zielonka (Bory Tucholskie), Puszcza Borecka i Żłoty Potok. Seria pomiarowa uzyskana na stacji Zielonka w 2023 r. ma obniżoną kompletność (75%), jednak została wykorzystana w opracowaniu. Wartości średnich rocznych stężeń Hg pokazano w tabeli 7.1. Przedstawione statystyki uzyskano na podstawie obliczeń z dobowych serii (wyniki 1-godzinne z pomiarów automatycznych zostały uśrednione do wartości dobowych przy zastosowaniu kryterium 75% kompletności, tj. dla co najmniej 18 wyników w dobie). Umożliwiło to zestawienie wyników pomiarów manualnych (z Puszczy Boreckiej z lat 2010-2020) i automatycznych (pozostałe stacje w całym analizowanym okresie i Puszcza Borecka w latach 2022-2023) ze wszystkich stacji i porównanie tych wyników ze sobą z uwzględnieniem jednolitych kryteriów. W tabeli 7.1 przedstawiono także statystyki dla stacji, które nie spełniają kryterium kompletności serii, ale wyniki były równomiernie rozłożone w roku.

Analiza wartości stężeń średnich dobowych na stacjach tła regionalnego w roku 2023 wskazuje na stosunkowo niskie poziomy rtęci gazowej, zawierające się w granicach od 1,03 do 2,42 ng/m³ (Rys. 7.1, Tab. 7.1). Rozpiętość stężeń dobowych Hg w powietrzu

atmosferycznym w całym rozważanym okresie ostatnich 14 lat (2010-2023) wyniosła 0,20 - 7,09 ng/m³. Uzyskane wyniki świadczą o relatywnie niewielkich zmianach w latach i tym samym o stosunkowo niewielkim zanieczyszczeniu powietrza rtęcią w Polsce (Tab. 7.2).

Tab. 7.1. Średnie roczne i sezonowe oraz maksymalne i minimalne stężenia rtęci w powietrzu atmosferycznym na stacjach tła regionalnego w latach 2010-2023 (źródło danych: PMS)

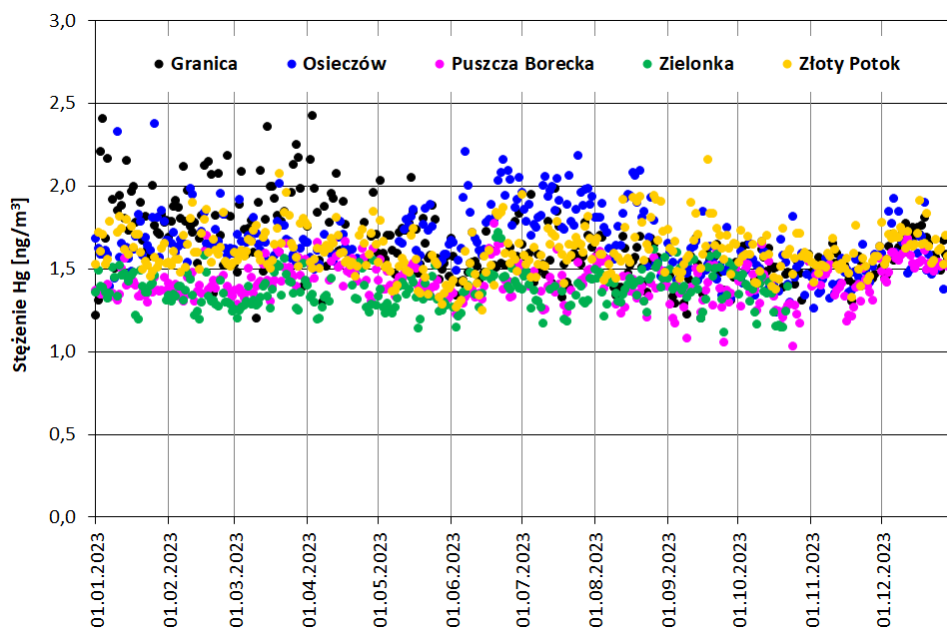
Rok	Stacja	Liczba wyników		Stosunek lato/zima	Stężenie [ng/m ³]				
		Rok	Kompletność		Sa	Slato	Szima	S24min	S24max
2010	Granica	298	81,6%	1,19	1,51	1,37	1,67	0,99	2,55
	Osieczów	320	87,7%	0,77	2,39	1,96	2,71	1,22	6,28
	Puszcza Borecka ^{*)}	53	14,5%	1,04	1,27	0,99	1,56	0,50	4,20
	Zielonka	290	79,5%	0,87	1,67	1,66	1,69	1,12	3,64
	Złoty Potok	284	77,8%	1,49	1,96	1,84	2,16	1,19	4,41
2011	Granica	352	96,4%	1,00	1,52	1,42	1,63	0,93	3,22
	Osieczów	320	87,7%	1,25	2,17	2,10	2,25	1,26	5,34
	Puszcza Borecka ^{*)}	52	14,2%	1,00	1,43	1,52	1,33	0,58	3,03
	Zielonka	332	91,0%	1,05	1,55	1,49	1,61	0,99	2,70
	Złoty Potok	191	52,3%	0,35	1,80	1,75	1,81	1,26	2,53
2012	Granica	340	93,2%	0,98	1,76	1,78	1,74	1,25	3,41
	Osieczów	344	94,2%	1,05	1,66	1,61	1,71	1,04	3,93
	Puszcza Borecka ^{*)}	52	14,2%	1,00	1,59	1,67	1,52	0,89	3,44
	Zielonka	340	93,2%	1,01	1,37	1,27	1,47	0,91	3,10
	Złoty Potok	320	87,7%	1,00	1,83	1,88	1,77	1,22	4,98
2013	Granica	352	96,4%	1,03	1,43	1,35	1,50	0,84	2,83
	Osieczów	288	78,9%	0,87	1,89	1,84	1,95	1,20	4,69
	Puszcza Borecka ^{*)}	52	14,2%	1,00	1,60	1,67	1,52	0,50	2,75
	Zielonka	325	89,0%	0,93	1,85	1,78	1,92	0,88	6,27
	Złoty Potok	301	82,5%	0,81	1,77	1,72	1,81	1,11	3,03
2014	Granica	347	95,1%	1,01	1,20	1,08	1,31	0,81	1,86
	Osieczów	296	81,1%	1,28	1,70	1,68	1,72	0,90	4,29
	Puszcza Borecka ^{*)}	54	14,8%	1,00	1,13	1,14	1,12	0,30	3,00
	Zielonka	290	79,5%	0,85	1,97	1,90	2,03	1,03	7,09
	Złoty Potok	329	90,1%	1,11	1,66	1,57	1,76	1,07	3,18
2015	Granica	335	91,8%	0,95	1,32	1,23	1,41	0,63	2,86
	Osieczów	271	74,2%	1,26	1,75	1,82	1,66	1,08	4,92
	Puszcza Borecka ^{*)}	50	13,7%	1,08	1,44	1,24	1,66	0,60	3,80
	Zielonka ^{**)}	202	55,3%	0,82	-	-	-	0,88	3,07
	Złoty Potok	319	87,4%	1,18	1,80	1,72	1,90	1,18	3,86
2016	Granica	335	91,5%	1,03	1,26	1,19	1,34	0,72	1,98
	Osieczów	334	91,3%	1,15	1,55	1,60	1,50	0,98	4,35
	Puszcza Borecka ^{*)}	51	13,9%	1,04	1,79	1,62	1,97	0,75	3,79
	Zielonka ^{**)}	264	72,1%	1,67	-	-	-	1,03	4,58
	Złoty Potok	361	98,9%	1,01	1,65	1,55	1,76	1,11	3,08
2017	Granica	351	96,2%	0,97	1,40	1,28	1,51	0,90	2,73
	Osieczów	312	85,5%	1,05	1,75	1,85	1,64	1,12	5,26
	Puszcza Borecka ^{*)}	50	13,7%	1,00	1,07	1,08	1,07	0,50	2,40
	Zielonka	268	73,4%	0,56	1,44	1,42	1,44	0,90	3,00
	Złoty Potok	355	97,3%	1,03	1,88	1,79	1,97	1,33	4,26
2018	Granica	318	87,1%	1,13	1,28	1,23	1,34	0,82	2,05
	Osieczów	350	95,9%	1,05	1,48	1,47	1,50	1,10	3,60
	Puszcza Borecka ^{*)}	53	14,5%	0,96	1,41	1,65	1,17	0,20	4,40
	Zielonka	319	87,4%	1,17	1,48	1,41	1,57	1,08	3,28
	Złoty Potok	342	93,7%	0,95	1,64	1,53	1,74	1,10	3,04
2019	Granica	328	89,9%	0,92	1,37	1,31	1,42	0,95	2,03

Rok	Stacja	Liczba wyników		Stosunek lato/zima	Stężenie [ng/m ³]				
		Rok	Kompletność		Sa	Slato	Szima	S24min	S24max
	Osieczów	335	91,8%	1,19	1,49	1,47	1,52	1,00	3,74
	Puszcza Borecka ^{*)}	47	12,9%	1,14	1,76	1,54	2,00	0,80	5,00
	Zielonka	257	70,4%	1,11	1,42	1,40	1,43	0,90	2,14
	Złoty Potok	354	97,0%	1,02	1,68	1,64	1,71	1,12	2,77
2020	Granica	326	89,1%	0,96	1,60	1,51	1,68	1,10	2,15
	Osieczów	364	99,5%	0,99	1,72	1,70	1,74	1,24	3,67
	Puszcza Borecka ^{*)}	53	14,5%	0,89	1,61	1,46	1,75	1,00	3,40
	Zielonka	308	84,2%	1,23	1,60	1,45	1,80	1,16	3,30
	Złoty Potok	358	97,8%	0,98	1,71	1,59	1,82	1,17	2,64
2021	Granica	315	86,3%	1,19	1,58	1,54	1,62	1,23	2,24
	Osieczów	359	98,4%	0,99	1,69	1,65	1,72	1,20	3,40
	Puszcza Borecka ^{***)}	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zielonka	264	72,3%	0,90	1,62	1,50	1,72	1,11	2,79
	Złoty Potok	359	98,4%	1,01	1,74	1,71	1,77	1,33	2,63
2022	Granica	278	76,2%	0,68	1,58	1,50	1,64	1,10	2,35
	Osieczów	364	99,7%	1,01	1,72	1,69	1,75	1,31	2,85
	Puszcza Borecka	342	93,7%	1,00	1,31	1,27	1,36	0,80	2,06
	Zielonka	347	95,1%	1,01	1,38	1,33	1,43	1,04	1,76
	Złoty Potok	362	99,2%	1,00	1,66	1,62	1,70	1,15	2,19
2023	Granica	331	90,7%	1,02	1,64	1,59	1,69	1,19	2,42
	Osieczów	339	92,9%	0,94	1,66	1,72	1,60	1,23	2,38
	Puszcza Borecka	347	95,1%	0,98	1,42	1,41	1,42	1,03	1,77
	Zielonka	274	75,1%	1,54	1,37	1,37	1,35	1,11	1,72
	Złoty Potok	362	99,2%	1,01	1,60	1,59	1,61	1,25	2,16

^{*)} cykliczne pomiary okresowe

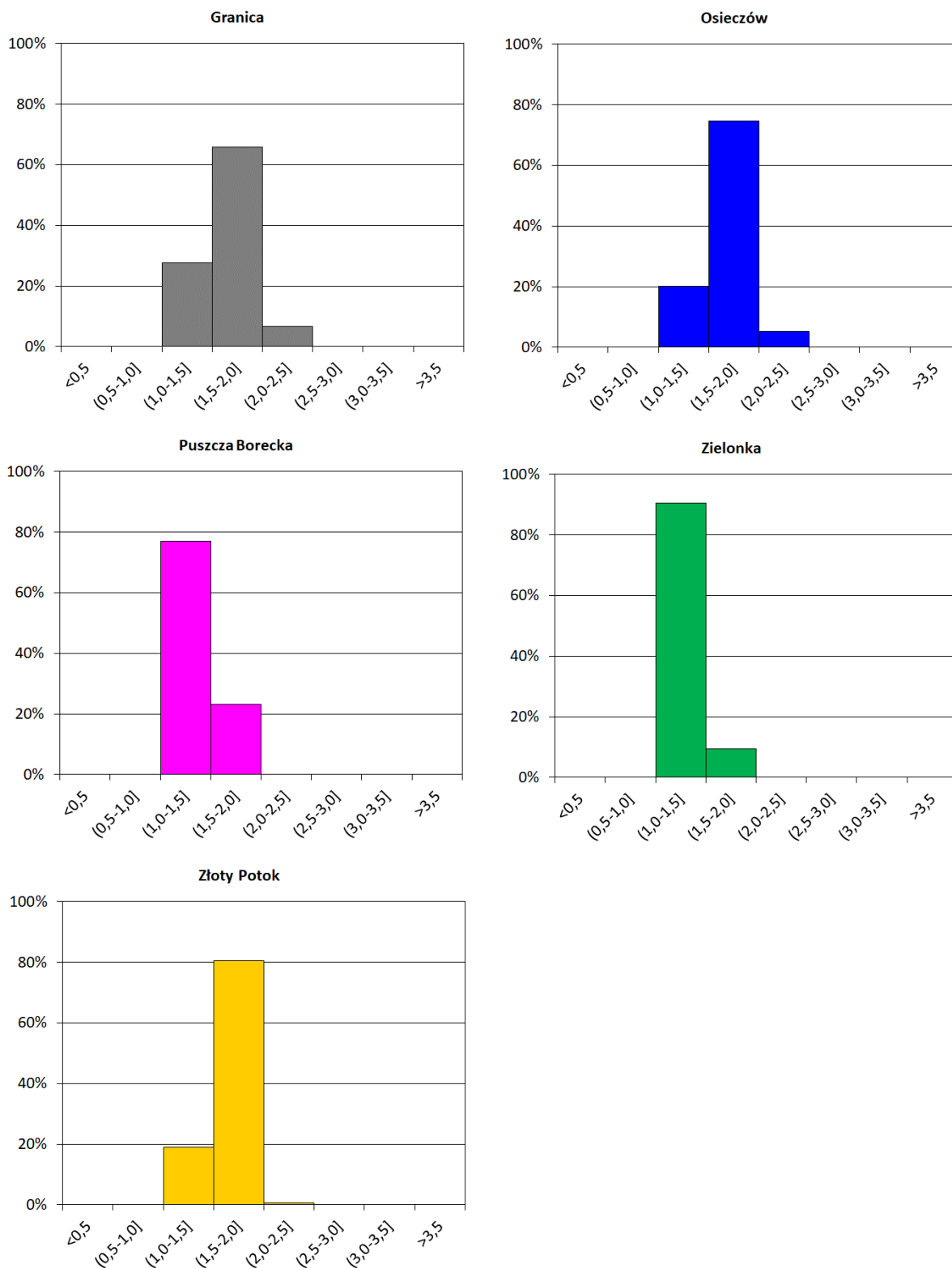
^{**)} seria niespełniająca kryterium wystarczającej kompletności serii oraz równomiernego rozłożenia wyników w ciągu roku, by można było obliczyć parametry statystyczne (seria nieuwzględniona w analizach)

^{***)} seria unieważniona



Rys. 7.1. Przebieg średnich dobowych stężeń Hg w powietrzu na stacjach tła regionalnego w roku 2023 (źródło danych: PMS)

Analiza częstości występowania wartości stężeń średnich dobowych rtęci w powietrzu atmosferycznym potwierdza prawidłowości zależne od lokalizacji stacji (Rys. 7.2).

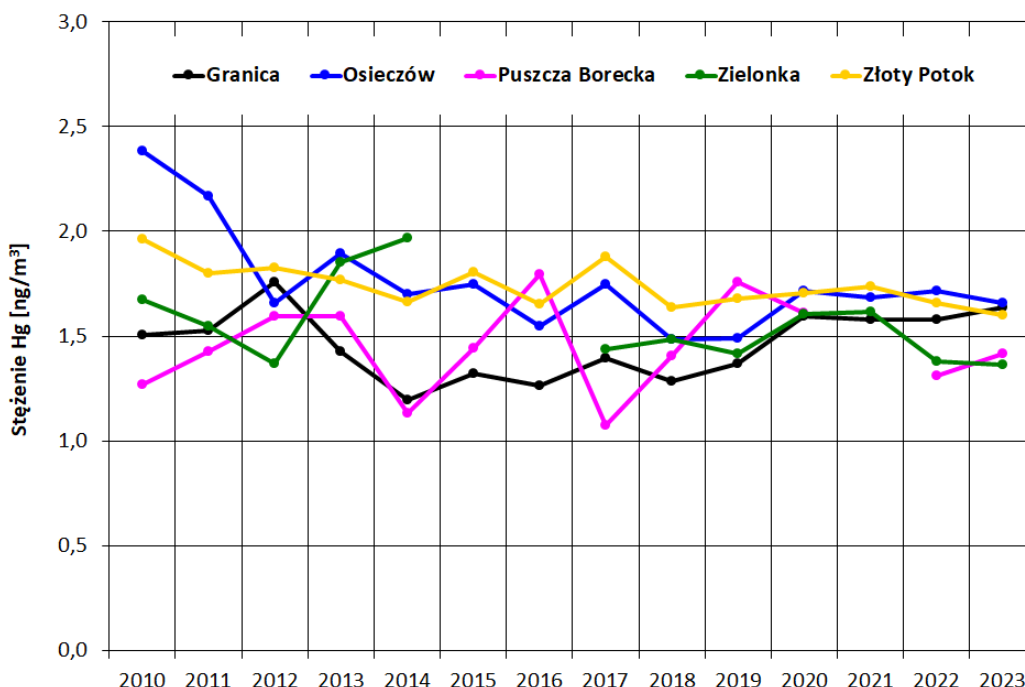


Rys. 7.2. Histogramy rozkładu średnich dobowych stężeń całkowitej rtęci w powietrzu na stacjach tła regionalnego w roku 2023 (źródło danych: PMS)

W 2023 roku podobne rozkłady stężeń uzyskano na stacjach Osieczów i Złoty Potok, gdzie zdecydowana większość wartości stężeń (ok. 80%) zawierała się w granicach 1,5-2,0 ng/m³. Nieco inaczej stężenia układały się na stacjach Zielonka i Puszcza Borecka, gdzie największy

udział w przebiegu stężeń miały wartości w granicach 1,0-1,5 ng/m³ (77% w Puszczy Boreckiej i aż 90% w Zielonce, przy braku danych z listopada i grudnia), a następnie, ze znacznie mniejszym udziałem, plasowały się wartości z przedziału 1,5-2,0 ng/m³ (Rys. 7.2). Obraz dla stacji Granica był pośredni – dominowały wyniki z przedziału 1,5-2,0 ng/m³ (66%), ale udział wartości z przedziału 1,0-1,5 ng/m³ był również znaczący (ponad 27%). Podobne zależności obserwowano w latach wcześniejszych.

Analiza wyników średnich rocznych obliczonych na podstawie stężeń średnich dobowych pokazuje, że najwyższe stężenia rtęci w powietrzu w 2023 roku uzyskano na stacjach Osieczów (1,66 ng/m³), Granica (1,64 ng/m³) i Złoty Potok (blisko 1,60 ng/m³). Na stacjach Puszcza Borecka i Zielonka uzyskano średnie roczne wartości na poziomie bliskim 1,4 ng/m³ (odpowiednio 1,42 ng/m³ w Puszczy Boreckiej i 1,37 ng/m³ w Zielonce (przy obniżonej kompletności i braku danych w listopadzie i grudniu). Największą rozpiętość pomiędzy maksymalną a minimalną wartością dobową stężenia w roku 2023 zaobserwowano na stacji w Granicy (1,23 ng/m³), nieco mniejsze w Osieczowie (1,14 ng/m³) i Złotym Potoku (0,91 ng/m³), zaś najniższe w Puszczy Boreckiej (0,75 ng/m³) i w Zielonce (0,60 ng/m³). We wcześniejszych latach na ogół notowano wyższe stężenia rtęci zimą niż latem (poza Osieczowem w okresie 2015-2017 i Puszcza Borecką w okresie 2011-2014). W roku 2023 taka sytuacja miała miejsce tylko w Granicy (stężenie zimą było wyższe o 0,10 ng/m³), a odwrotna w Osieczowie (stężenie latem było wyższe o 0,12 ng/m³ od notowanego zimą). Na pozostałych stacjach średnie sezonowe stężenia były w ostatnim roku niemal identyczne (różnice na poziomie 0,01-0,02 ng/m³). Przeciętne różnice stężeń obserwowane w sezonach ciepłym i chłodnym w poszczególnych latach nie były wysokie i na ogół nie przekraczały 0,10 ng/m³.



Rys. 7.3. Stężenie średnie roczne Hg na stacjach tła regionalnego w latach 2010-2023 (źródło danych: PMŚ)

W roku 2023 wzrost średniego rocznego stężenia Hg w powietrzu w stosunku do wartości z roku poprzedniego zaobserwowano na stacjach Granica i Puszcza Borecka, a spadek

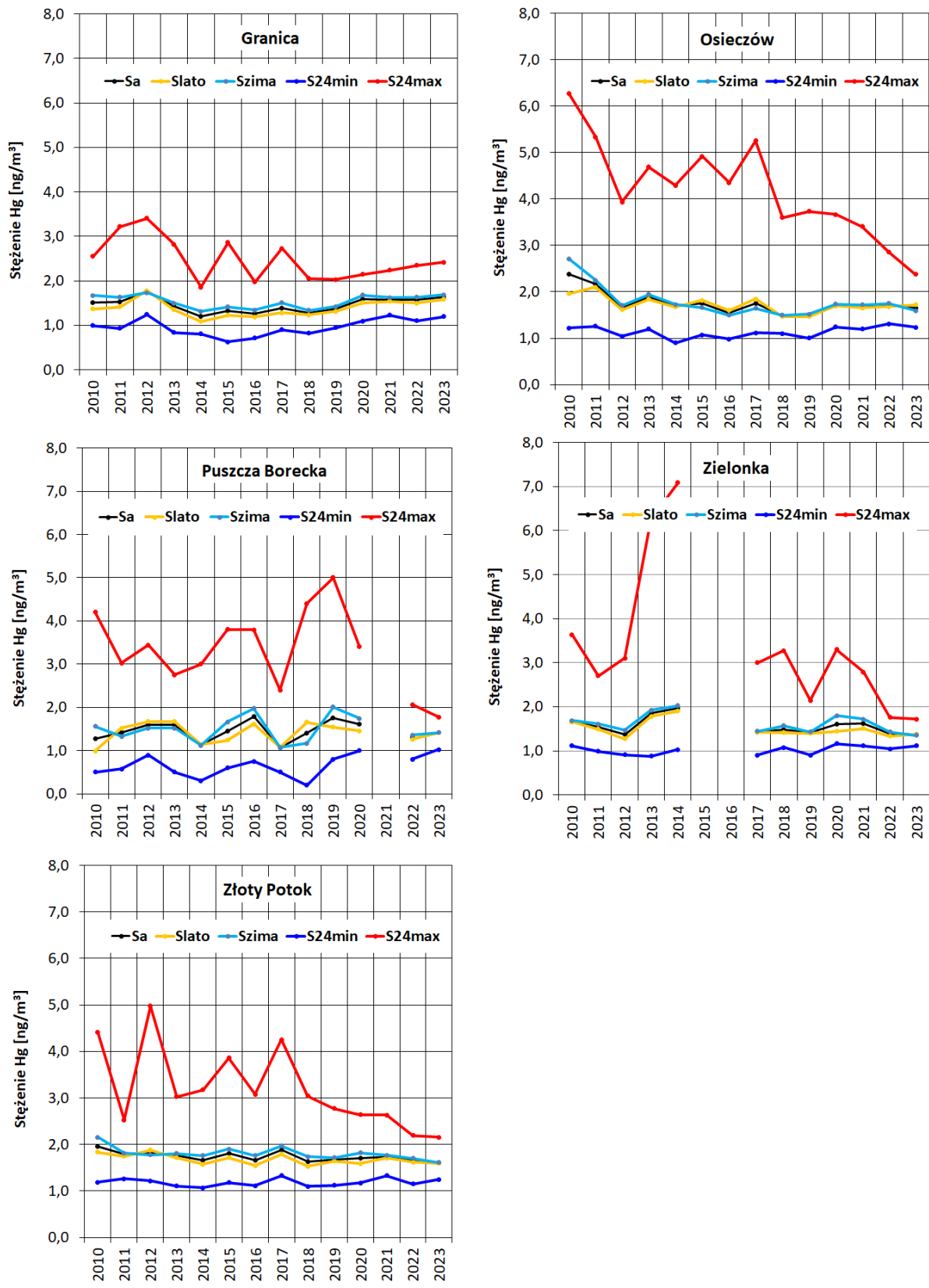
na pozostałych stacjach, przy czym zmiany te były niewielkie i osiągnęły po kilka procent (od -3,6% w Osieczowie do 7,7% w Puszczy Boreckiej). W przypadku analizy wartości średnich rocznych z 2023 roku w zestawieniu ze średnimi z wielolecia (2010-2022), niższe wartości uzyskano na wszystkich stacjach, poza Granicą. Zmiany względne wyniosły po kilka do kilkunastu procent, mieszcząc się od -13% w Zielonce do 13% w Granicy (Tab. 7.2, Rys. 7.3).

Tab. 7.2. Zmiany względne stężeń średnich rocznych Hg w roku 2023 względem roku 2022 oraz wartości średnich z lat 2010-2022 (źródło danych: PMŚ)

Parametr	Okres	Stacja				
		Granica	Osieczów	Puszcza Borecka	Zielonka	Złoty Potok
Stężenie [ng/m ³]	2023	1,64	1,66	1,42	1,37	1,60
	2022	1,58	1,72	1,31	1,38	1,66
	2010-2022	1,45	1,76	1,45	1,58	1,75
Różnica względna [%]	2023/2022	3,5%	-3,6%	7,7%	-1,1%	-3,3%
	2023/2010-2022	13,1%	-6,2%	-2,5%	-13,4%	-8,5%

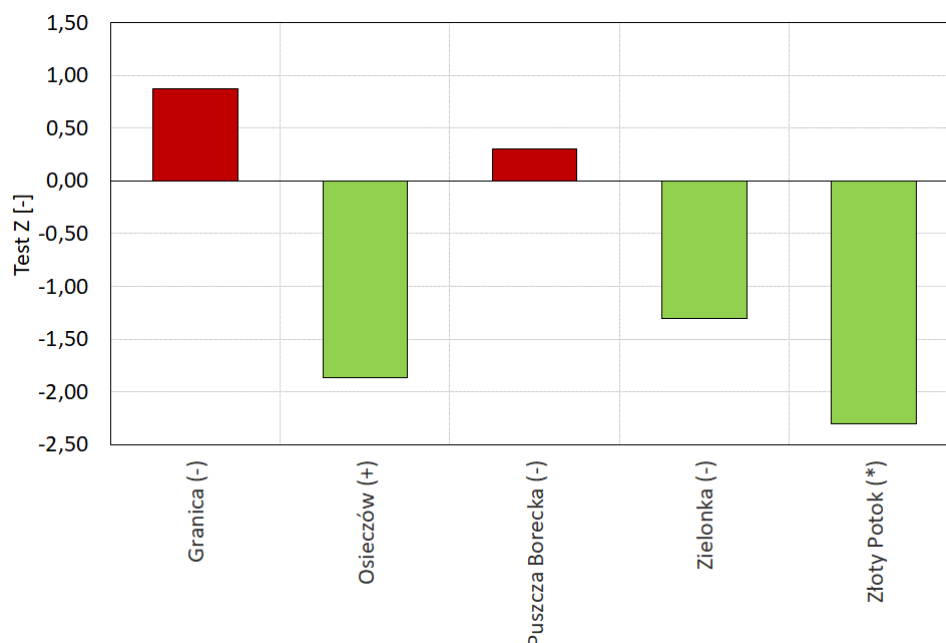
Zmienność najwyższych i najniższych wartości średnich dobowych stężeń rtęci w powietrzu, wartości sezonowych oraz średnich rocznych w latach 2010-2023 przedstawiono na rysunku 7.4.

Na większości stacji, w roku 2023 w stosunku do roku 2022, zaobserwowano wzrost stężeń w sezonie ciepłym (z wyjątkiem stacji Złoty Potok), a spadek w sezonie chłodnym (z wyjątkiem stacji Granica i Puszcza Borecka). Analiza wartości dobowych pokazała, że na większości stacji w roku 2023 w stosunku do roku 2022 zaobserwowano spadek stężeń maksymalnych dobowych (oprócz Granicy) i wzrost stężeń minimalnych (poza Osieczowem). Warto wskazać na utrzymujące się przez cały analizowany okres 2010-2023 niewielkie różnice pomiędzy stężeniami średnimi sezonowymi na wszystkich stacjach, przy na ogół nieznacznie wyższych wartościach zimą. Dzieje się tak pomimo, iż największy udział w emisji rtęci do powietrza mają procesy spalania w sektorze *Przemysły energetyczne*, a więc największa emisja występuje w sezonie chłodnym i można by się spodziewać wzrostu stężenia rtęci w powietrzu w tym okresie. W przypadku stacji tła regionalnego, oddalonych od źródeł tzw. niskiej emisji, uzyskane wyniki w całym analizowanym okresie świadczą o znacznym wymieszaniu powietrza i tym samym o braku bezpośredniego wpływu emisji pochodzącej z indywidualnego ogrzewania domów (z wykorzystaniem jako paliwa węgla zawierającego rtęć). Uzyskane wyniki wskazywać również mogą, że pomimo długiego czasu przebywania rtęci w atmosferze, emisja pochodząca ze spalania węgla w gospodarstwach domowych (przy udziale tego sektora w emisji całkowitej na poziomie ok. 9%) nie wpływa znacząco na kształtowanie jakości powietrza w okresie zimy poza najbliższym otoczeniem tych źródeł.



Rys. 7.4. Stężenie średnie roczne, sezonowe oraz minimalne i maksymalne stężenia dobowe Hg na stacjach tła regionalnego w latach 2010-2023 (źródło danych: PMŚ)

Dane uzyskane w latach 2010-2023 poddano analizie statystycznej w celu wykrycia trendów. Jedynie na stacjach w Osieczowie i Złotym Potoku odnotowano trend malejący stężenia rtęci w powietrzu o najmniejszej istotności statystycznej ((+) w Osieczowie i (*) w Złotym Potoku). Na stacji Zielonka wystąpiła nieznaczna tendencja malejąca (o czym świadczy ujemna wartość Z), a w Puszczy Boreckiej i Granicy – nieznaczna, nieistotna statystycznie tendencja rosnąca (dodatnia wartość Z) (Rys. 7.5).



Rys. 7.5. Trendy i tendencje zmian stężeń średnich rocznych rtęci gazowej na stacjach tła regionalnego w latach 2010-2023 (źródło danych: PMŚ)

7.2. Depozycja rtęci do podłoża

Ocenę depozycji całkowitej Hg do podłoża w Polsce na obszarach pozamiejskich przeprowadzono na podstawie danych pochodzących z trzech stacji tła regionalnego: Osieczów, Puszcza Borecka i Zielonka. Wielkości depozycji na poszczególnych stacjach dla lat 2010-2023 przedstawiono w tabeli 7.3. Najwyższy wskaźnik depozycji w roku 2023 zanotowano w Osieczowie, zaś najniższy w Zielonce.

Tab. 7.3. Roczne wartości depozycji Hg na stacjach tła regionalnego w latach 2010-2023 (źródło danych: PMŚ)

Rok	Stacja	Pokrycie		Ładunek [$\mu\text{g}/\text{m}^2$]			Wskaźnik [$\mu\text{g}/\text{m}^2$ dzień]		
		Liczba dni	Stosunek lato/zima	rok	lato	zima	rok	lato	zima
2010	Osieczów	301	0,95	2,369	1,561	0,808	0,005	0,006	0,004
	Puszcza Borecka	288	1,23	7,488	6,654	0,834	0,025	0,039	0,006
	Zielonka*	35	0,00	-	-	12,170	-	-	0,348
2011	Osieczów	336	1,29	11,497	8,283	3,214	0,032	0,036	0,028
	Puszcza Borecka	364	1,08	19,220	16,031	3,189	0,040	0,070	0,015
	Zielonka	364	1,08	16,474	4,669	11,805	0,043	0,023	0,059
2012	Osieczów	365	0,99	4,684	3,227	1,457	0,010	0,014	0,007
	Puszcza Borecka	364	1,00	33,155	26,879	6,276	0,085	0,135	0,035
	Zielonka	365	0,98	10,951	7,582	3,369	0,027	0,038	0,019
2013	Osieczów	364	1,00	4,090	3,024	1,065	0,010	0,015	0,006

Rok	Stacja	Pokrycie		Ładunek [$\mu\text{g}/\text{m}^2$]			Wskaźnik [$\mu\text{g}/\text{m}^2$ dzień]		
		Liczba dni	Stosunek lato/zima	rok	lato	zima	rok	lato	zima
	Puszcza Borecka	364	1,00	31,684	27,426	4,258	0,074	0,136	0,024
	Zielonka	370	0,97	7,850	5,583	2,267	0,020	0,030	0,011
2014	Osieczów	343	1,13	4,164	3,090	1,074	0,011	0,017	0,007
	Puszcza Borecka**	273	2,00	2,540	1,870	0,670	0,009	0,010	0,007
	Zielonka	370	0,97	6,018	3,509	2,509	0,015	0,020	0,012
2015	Osieczów	364	1,00	2,712	1,622	1,090	0,007	0,009	0,005
	Puszcza Borecka	308	1,44	3,937	1,731	2,207	0,013	0,008	0,020
	Zielonka***	217	0,94	3,601	1,273	2,328	0,017	0,010	0,026
2016	Osieczów	365	1,06	0,984	0,748	0,236	0,003	0,004	0,001
	Puszcza Borecka	338	1,17	2,491	1,020	1,471	0,006	0,005	0,007
	Zielonka***	187	1,10	4,844	2,504	2,341	0,024	0,024	0,025
2017	Osieczów	369	0,72	2,652	2,002	0,650	0,007	0,011	0,003
	Puszcza Borecka	371	0,96	4,354	2,793	1,561	0,013	0,015	0,010
	Zielonka***	155	0,60	7,802	2,948	4,854	0,051	0,064	0,045
2018	Osieczów	365	0,98	2,328	1,755	0,573	0,007	0,010	0,003
	Puszcza Borecka	364	1,00	1,216	0,854	0,362	0,003	0,004	0,002
	Zielonka***	186	1,30	5,262	3,386	1,876	0,031	0,035	0,026
2019	Osieczów	359	1,41	1,760	1,417	0,343	0,005	0,007	0,003
	Puszcza Borecka	363	1,01	1,042	0,773	0,270	0,003	0,004	0,002
	Zielonka***	210	0,87	7,441	2,888	4,553	0,042	0,033	0,048
2020	Osieczów	364	1,00	1,558	0,865	0,693	0,004	0,005	0,004
	Puszcza Borecka	366	0,99	6,436	3,641	2,794	0,017	0,019	0,016
	Zielonka	336	0,86	6,057	4,513	1,544	0,019	0,030	0,008
2021	Osieczów	365	1,04	8,505	6,283	2,222	0,019	0,026	0,010
	Puszcza Borecka	365	1,07	2,867	1,844	1,022	0,007	0,008	0,006
	Zielonka	365	0,98	3,477	1,577	1,900	0,011	0,009	0,011
2022	Osieczów	363	0,96	7,757	6,368	1,389	0,021	0,034	0,007
	Puszcza Borecka****	332	1,24	1,983	1,250	0,733	0,005	0,006	0,005
	Zielonka****	335	0,84	3,620	2,268	1,352	0,011	0,015	0,007
2023	Osieczów	364	0,989	4,067	1,515	2,552	0,011	0,009	0,014
	Puszcza Borecka	364	1,000	3,332	1,284	2,049	0,009	0,006	0,012
	Zielonka	363	1,028	1,961	0,721	1,240	0,006	0,004	0,007

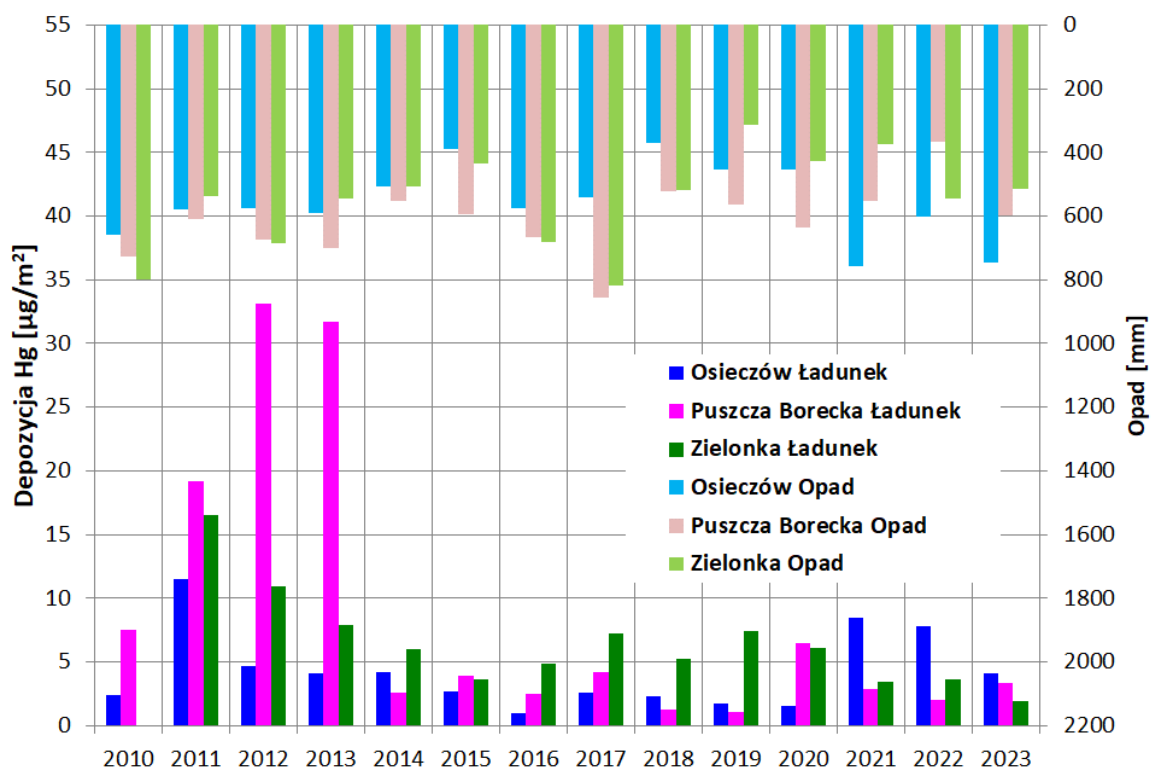
*) wynik z jednego miesiąca (nie uwzględniono w dalszych analizach)

***) brak wyników z okresu X-XII

****) próbki pobierane przez 2 tygodnie w miesiącu

*****) 1 miesiąc bez opadów

Ocena zmian depozycji Hg w 2023 roku w stosunku do uzyskanej wartości dla wielolecia 2010-2022 wskazuje na spadek zarówno ładunku jak i wskaźnika depozycji dla wszystkich analizowanych stacji. Najbardziej znaczące spadki zaobserwowano dla Zielonki (o ponad 70%) i Puszczy Boreckiej (o ponad 60%).



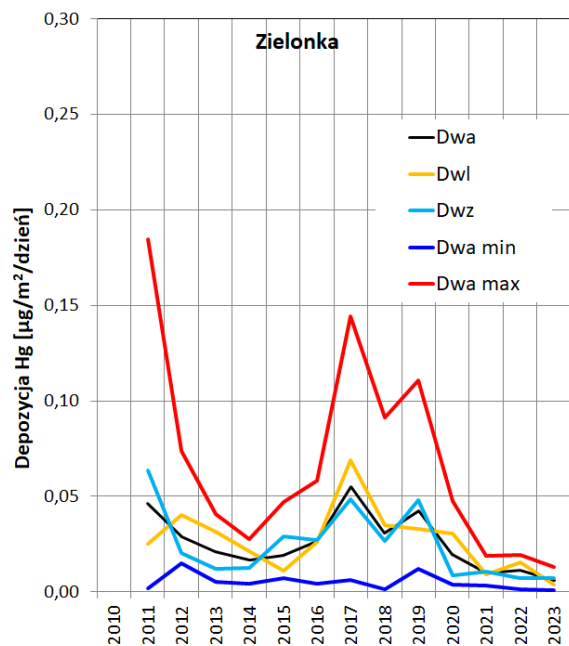
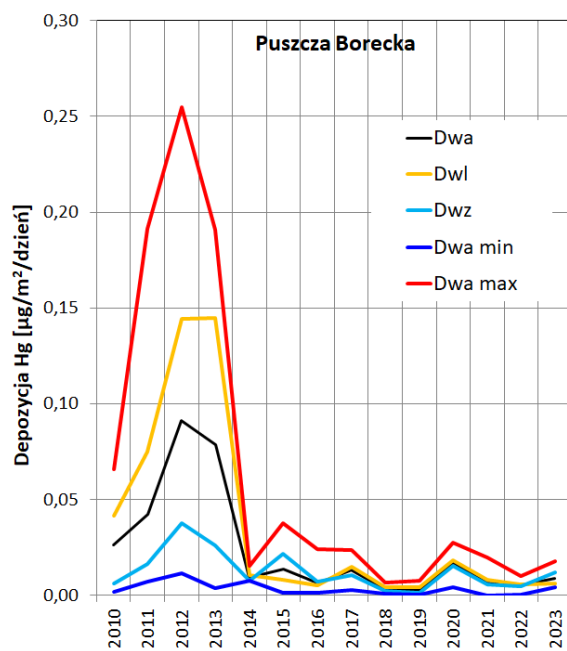
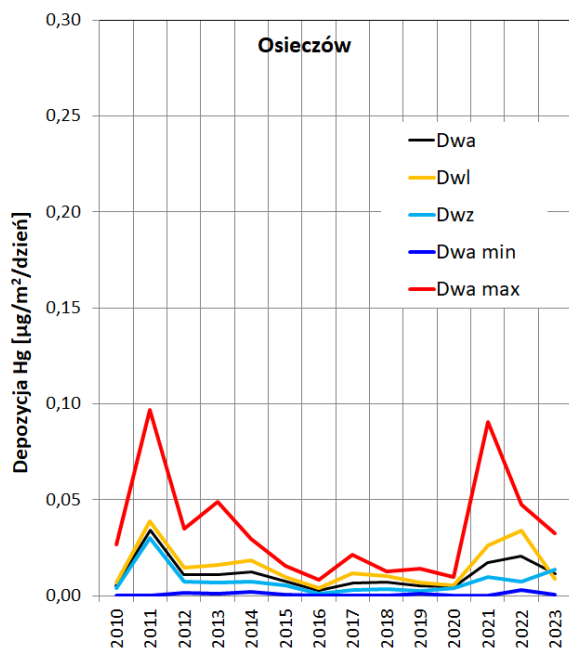
Rys. 7.6. Roczne wartości depozycji Hg na stacjach tła regionalnego na tle wysokości sumy opadów w latach 2010-2023 (źródło danych: PMS)

W 2023 roku, w porównaniu do 2022 r., zaobserwowano spadek ładunku i wskaźnika depozycji w Osieczęwie i Zielonce (o ponad 45%), a wzrost w Puszczy Boreckiej (o ponad 68%) (Tab. 7.4, Rys. 7.6).

Tab. 7.4. Zmiany względne ładunku i wskaźnika depozycji Hg w roku 2023 względem roku 2022 oraz wartości średnich z lat 2010-2022 (źródło danych: PMS)

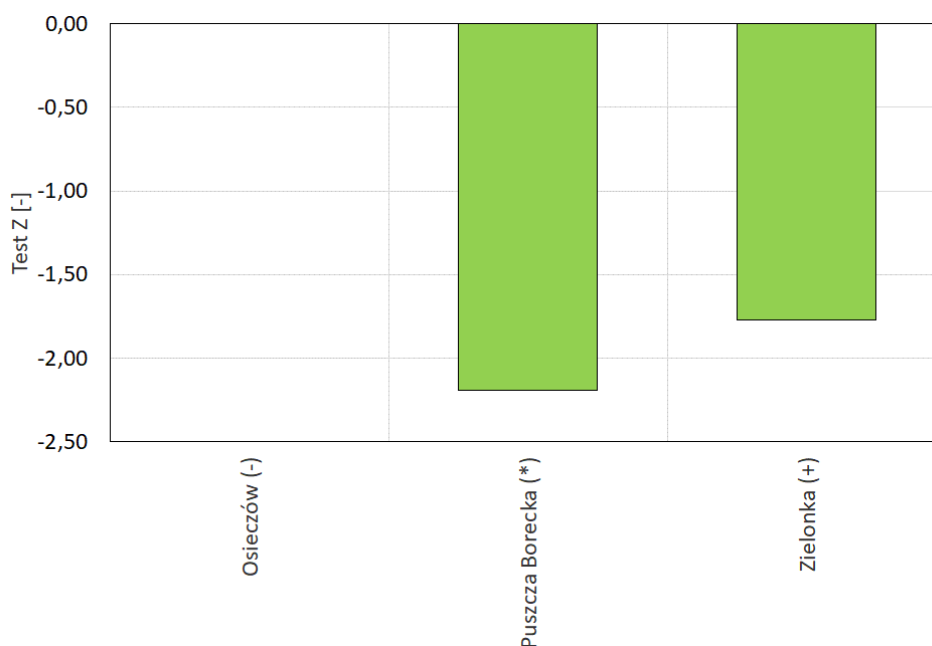
Parametr	Okres	Stacja		
		Osieczęw	Puszcza Borecka	Zielonka
Ładunek [$\mu\text{g}/\text{m}^2$]	2022	7,757	1,983	3,620
	2023	4,067	3,332	1,961
	2010-2022	4,235	9,109	6,950
Różnica względna dla ładunku [%]	2023/2022	-47,6%	68,0%	-45,8%
	2023/(2010-2022)	-4,0%	-63,4%	-71,8%
Wskaźnik [$\mu\text{g}/\text{m}^2$ dzień]	2022	0,021	0,005	0,011
	2023	0,011	0,009	0,006
	2010-2022	0,011	0,023	0,026
Różnica względna dla wskaźnika [%]	2023/2022	-44,8%	69,5%	-48,4%
	2023/(2010-2022)	5,3%	-60,6%	-77,9%

Dobowe wskaźniki depozycji rtęci w analizowanym okresie 2010-2023 osiągały na ogół wyższe wartości w okresie ciepłym niż w chłodnym. Jednak w ostatnim roku na wszystkich stacjach wskaźniki depozycji Hg były wyższe w chłodnej połowie roku. W przeszłości takie sytuacje zdarzały się na stacji w Zielonce. Różnice pomiędzy sezonami są jednak bardzo niewielkie (Rys. 7.7).



Rys. 7.7. Wskaźnik depozycji rocznej, sezonowej oraz miesięczne wartości minimalne i maksymalne depozycji Hg na stacjach tła regionalnego w latach 2010-2023 (źródło danych: PMŚ)

Analiza trendów wykazała, że wskaźniki depozycji w okresie 2010-2023 charakteryzują się trendem malejącym o niewielkiej istotności statystycznej na stacjach Puszcza Borecka (*) i Zielonka (+). Wskaźniki z Osieczowa nie wykazują trendu (wartość Z=0) (Rys. 7.8).



Rys. 7.8. Trendy i tendencje zmian stężeń średnich rocznych wskaźników depozycji rtęci na stacjach tła regionalnego w latach 2010-2023 (źródło danych: PMŚ)

8. Ocena zanieczyszczenia atmosfery rtęcią w Europie

Ocenę zanieczyszczenia atmosfery rtęcią w zakresie zmienności stężeń w powietrzu i depozycji na stacjach tła regionalnego w Polsce na tle stacji pozamiejskich tła w Europie wykonano dla okresu 2010-2022. Podobnie jak w poprzednich raportach, w ocenie wykorzystano wyniki pomiarów stężeń i depozycji zgromadzonych w dwóch bazach danych, tj. bazie Europejskiej Agencji Środowiska (e-Reporting) oraz w bazie EMEP (ebas).

8.1. Zanieczyszczenie powietrza rtęcią

W poniższym rozdziale zmienność stężeń rtęci w powietrzu atmosferycznym w Europie przedstawiono na podstawie średnich rocznych wartości, obliczonych dla poszczególnych krajów oraz dla pojedynczych stanowisk pomiarowych, które spełniały kryteria kompletności danych. Szczególną uwagę poświęcono wynikom z polskich stacji na tle wyników europejskich.

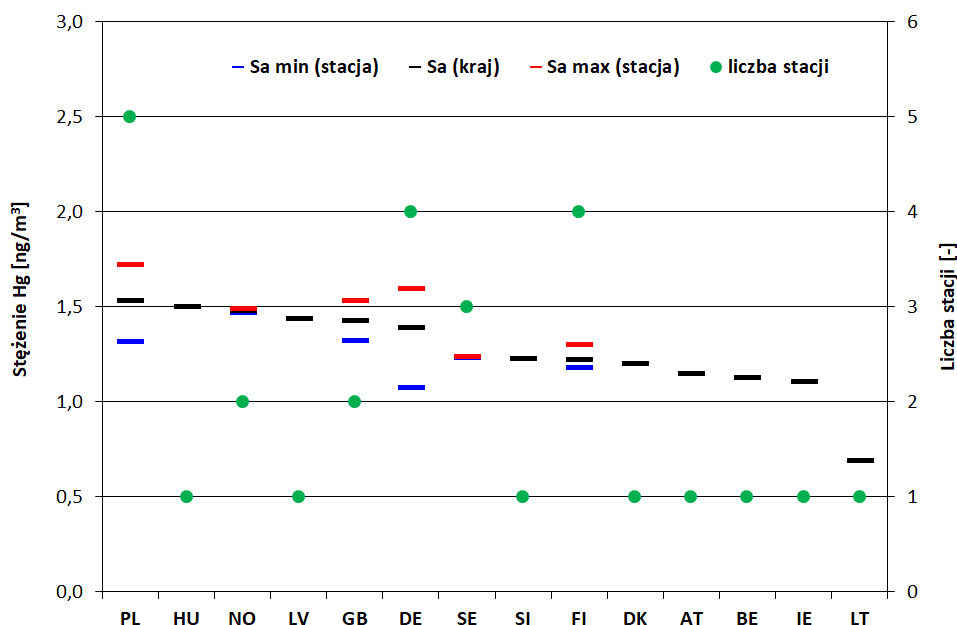
Ocenę zanieczyszczenia powietrza rtęcią dla roku 2022 wykonano na podstawie wyników pomiarów pochodzących z 28 stacji pozamiejskich tła funkcjonujących w 14 krajach europejskich (Tab. 8.1 i Rys. 8.1). W 8 krajach prowadzących pomiary rtęci ocenę wykonano w oparciu o wyniki pomiarów pochodzące z pojedynczych stacji. Tylko w 6 krajach europejskich zlokalizowanych było więcej niż jedna stacja: 5 w Polsce (najwięcej w Europie), po 4 w Finlandii i Niemczech, 3 w Szwecji oraz po 2 stacje w Norwegii i Wielkiej Brytanii (Tab. 8.1).

Tab. 8.1. Stężenia średnie roczne Hg (wartości minimalne, średnie i maksymalne) uzyskane w roku 2022 w poszczególnych krajach Europy (źródło danych: EAS, EMEP)

Kod kraju wg ISO	Liczba stacji [-]	Stężenie średnie roczne		
		Sa min [ng/m ³]	Sa [ng/m ³]	Sa max [ng/m ³]
AT	1	1,15	1,15	1,15
BE	1	1,12	1,12	1,12
DE	4	1,07	1,39	1,59
DK	1	1,20	1,20	1,20
FI	4	1,18	1,22	1,30
GB	2	1,32	1,43	1,53
HU	1	1,50	1,50	1,50
IE	1	1,10	1,10	1,10
LT	1	0,69	0,69	0,69
LV	1	1,44	1,44	1,44
NO	2	1,47	1,48	1,49
PL ^{*)}	5	1,31	1,53	1,72
SE	3	1,23	1,23	1,24
SI	1	1,22	1,22	1,22
Europa	28	0,69	1,26	1,72

^{*)} Stacje: Granica, Osieczów, Puszcza Borecka, Zielonka, Żłoty Potok

Uzyskane w 2022 roku uśrednione wyniki dla poszczególnych krajów na obszarach pozamiejskich pokazują, że przeciętne roczne stężenie Hg w powietrzu w Polsce było najwyższe w Europie. Nieznacznie niższe wartości uzyskano dla Węgier i Norwegii. Najniższe stężenie Hg w powietrzu, znacznie odbiegające od pozostałych zanotowano dla Litwy (Tab. 8.1, Rys. 8.1).



Rys. 8.1. Wartości stężeń średnich rocznych Hg (minimalne, średnie i maksymalne) w poszczególnych krajach Europy na tle liczby stacji uwzględnionych w analizie w roku 2022 (źródło danych: EAS, EMEP)

Tab. 8.2. Stężenia średnie roczne Hg dla krajów europejskich w roku 2022, 2021 i z lat 2010-2021 oraz zmiany względne w roku 2022 w stosunku do roku wcześniejszego oraz wielolecia (źródło danych: EAS, EMEP)

Kod kraju wg ISO	Stężenie średnie [ng/m ³]			Różnica względna [%] w roku 2022 w stosunku do	
	2022	2021	2010-2021	roku 2021	okresu 2010-2021
AT	1,15	1,20	1,44	-4,2%	-20,4%
BE	1,12		1,13	**)	-0,6%
CY			0,07	*, **)	*, **)
CZ			1,28	*, **)	*, **)
DE	1,39	1,33	1,55	4,2%	-10,4%
DK	1,20	1,19	1,32	0,8%	-9,3%
EE		1,29	1,28	*)	*)
ES		0,39	1,05	*)	*)
FI	1,22	1,20	1,29	1,7%	-5,5%
GB	1,43	1,32	1,22	8,0%	16,7%
HU	1,50	1,50	1,50	-0,1%	-0,1%
IE	1,10	1,18	1,35	-6,6%	-18,6%
IS			1,87	*, **)	*, **)
LT	0,69		1,07	**)	-35,5%
LV	1,44			**)	***)
NO	1,48	1,46	1,50	1,0%	-1,6%
PL	1,53	1,66	1,56	-7,6%	-2,0%
SE	1,23	1,18	1,33	4,7%	-7,5%
SI	1,22	1,54	1,03	-20,4%	19,3%

*) brak danych z 2022 roku

***) brak danych z 2021 roku

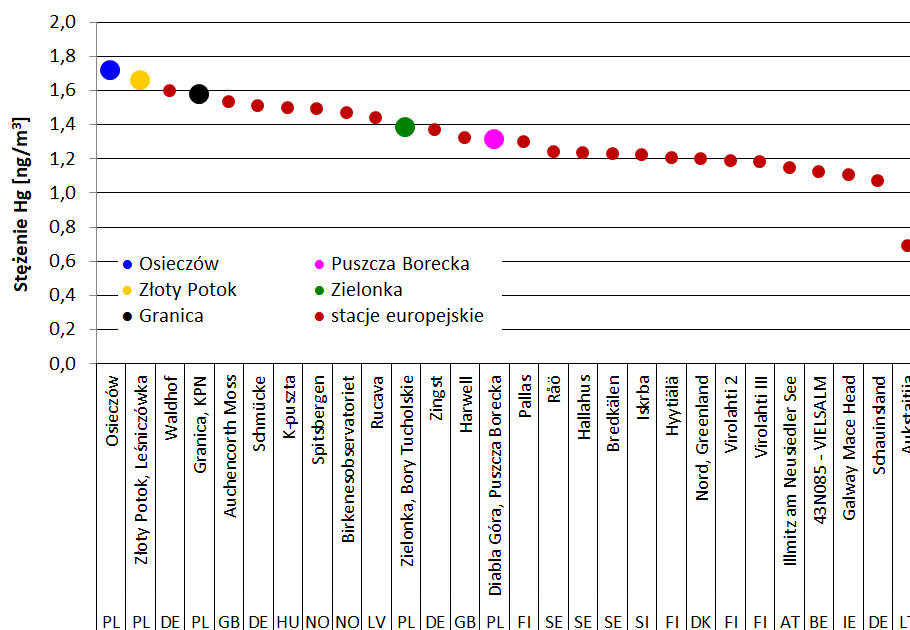
****) brak danych z lat 2010-2021

Analiza zmian względnych stężeń średnich rocznych obliczonych dla każdego z krajów europejskich w ostatnich 2 latach (2022-2021) pokazuje wzrost poziomu Hg w powietrzu atmosferycznym z roku na rok w 6 z 11 analizowanych krajów, dla których wyniki były dostępne z obu lat. Najwyższe wzrosty zaobserwowano dla Wielkiej Brytanii (8%) oraz Szwecji i Niemiec (ponad 4%) oraz Finlandii (blisko 3%). Znacznie niższe (ok. 1%) wzrosty dotyczyły jeszcze Norwegii i Danii. Spośród pozostałych 5 krajów, największy spadek stężeń Hg w powietrzu dotyczył Słowenii (ponad 20%). Podobne spadki, w granicach kilku procent, odnotowano dla Polski, Irlandii i Austrii. W przypadku Węgier można mówić o braku zmian (spadek o 0,1%).

Nieco inaczej układały się zmiany pomiędzy stężeniami średnimi z roku 2022 i wielolecia 2010-2021. Spośród 13 krajów, dla których możliwe było porównanie wartości stężenia Hg w powietrza w 2022 roku ze średnią z wielolecia, widoczne jest znaczne zróżnicowanie. Wzrosty stężeń w roku 2022 na tle średniej z wielolecia zanotowano tylko dla 2 krajów: Słowenii (ponad 19%) i Wielkiej Brytanii (blisko 17%). Dla pozostałych 11 krajów zanotowano spadek stężeń w roku 2022 w stosunku do wartości średnich z wielolecia, największy dla Łotwy (ponad 35%) i Austrii (ponad 20%). W Polsce spadek średniego rocznego stężenia Hg na tle wielolecia był na podobnym poziomie, jak w obliczony dla Norwegii (blisko 2%). Najmniejsze spadki wystąpiły dla Węgier i Danii (Tab. 8.2)

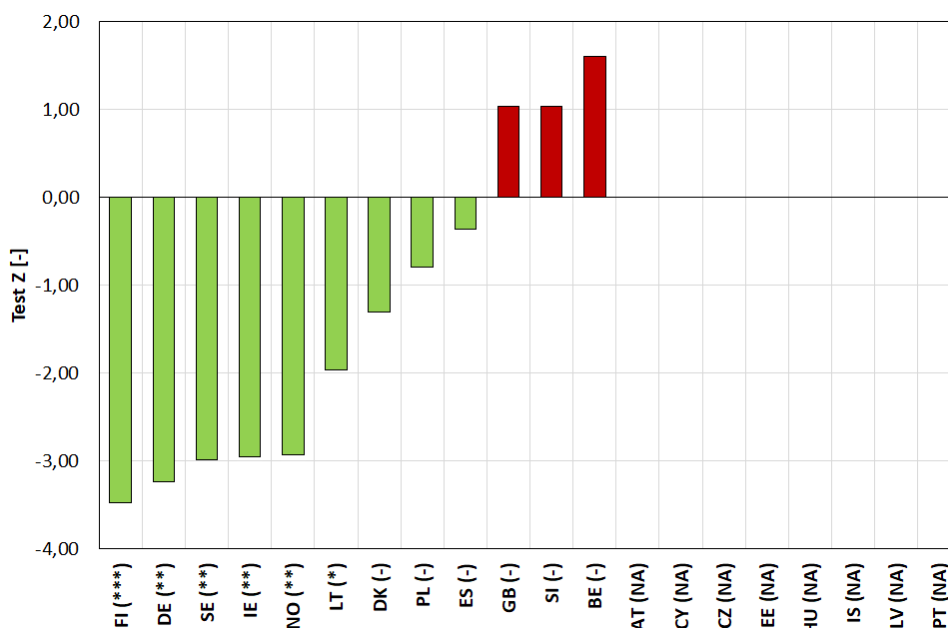
Wartości średnie roczne stężenia rtęci w powietrzu na poszczególnych stacjach w Europie w roku 2022 zawierały się w granicach 0,69-1,72 ng/m³. Najwyższe wartości zaobserwowano na 2 stacjach polskich w Osieczowie i Żłotym Potoku, jednej ze stacji niemieckich oraz na polskiej stacji w Granicy. Najniższą wartość średnią roczną stężenia Hg w powietrzu w 2022 roku uzyskano na stacji litewskiej (Rys. 8.2). Stężenia średnie roczne na pozostałych

dwóch stacjach z Polski (Zielonka i Puszcza Borecka) charakteryzowały się wartościami na poziomie nieco powyżej średniej europejskiej.



Rys. 8.2. Wartości stężeń średnich rocznych Hg na poszczególnych stacjach w Europie w roku 2022 (źródło danych: EAŚ, EMEP)

Przeprowadzona analiza statystyczna trendów zmian stężeń w powietrzu atmosferycznym w okresie 2010-2021 w poszczególnych krajach Europy w praktyce wskazuje na zauważalne spadki. Taka sytuacja dotyczy 9 spośród 12 krajów, dla których serie pomiarowe były dłuższe niż 10 lat (spośród 20 analizowanych w raporcie). Spadki istotne statystycznie obserwuje się dla w przypadku 6 krajów, najwyraźniej zaznaczone kolejno dla Finlandii (istotność na poziomie ***), Niemiec, Szwecji, Irlandii i Norwegii (**) oraz Litwy (*). W przypadku Danii, Polski i Hiszpanii obserwowana jest nieistotna statystycznie tendencja malejąca. Nieistotne statystycznie tendencje rosnące stężeń średnich rocznych rtęci gazowej dotyczą pozostałych 3 krajów, tj. Wielkiej Brytanii, Słowenii i Belgii (Rys. 8.3).



Rys. 8.3. Trendy i tendencje zmian stężeń średnich rocznych rtęci w powietrzu atmosferycznym w poszczególnych krajach Europy w latach 2010-2022 (źródło danych: EAS i EMEP)

8.2. Depozycja rtęci do podłoża

W poniższym rozdziale omówiono wyniki oceny depozycji Hg w Europie na podstawie obliczonych wartości dobowego wskaźnika depozycji. Analizę przeprowadzono dla stacji pozamiejskich tła funkcjonujących w Europie w okresie 2010-2022. Wyniki przedstawiono jako wartości uśrednione zarówno dla poszczególnych krajów, jak i dla pojedynczych stanowisk, ze szczególnym wskazaniem wyników pomiarów uzyskanych na stacjach tła regionalnego w Polsce.

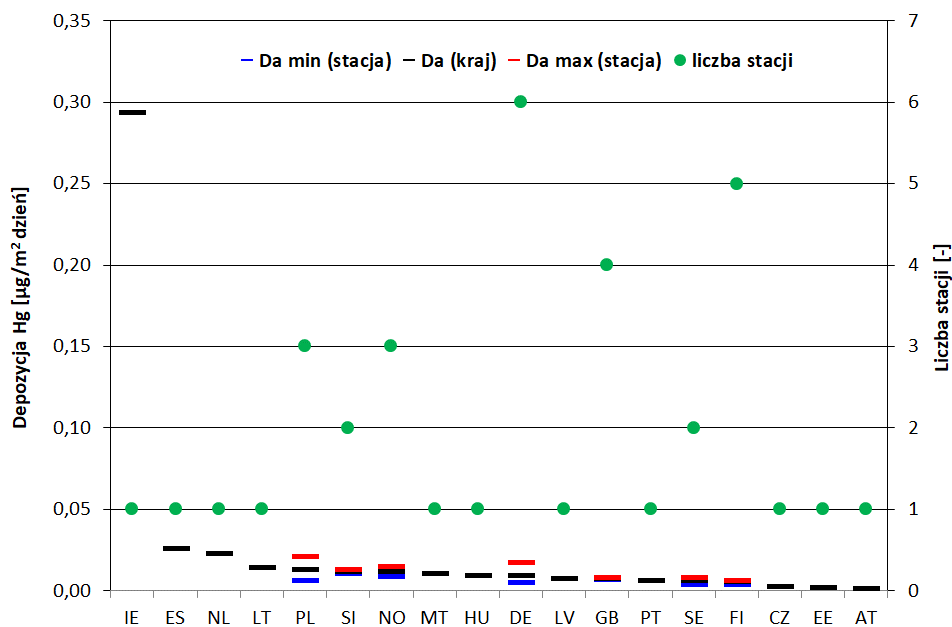
Ocenę depozycji rtęci przeprowadzono dla roku 2022 na podstawie wyników pomiarów pochodzących z 36 stacji pozamiejskich tła spełniających kryteria selekcji danych, funkcjonujących na terenie 18 krajów europejskich (Tab. 8.3 i Rys. 8.3). Najwięcej stacji spośród uwzględnionych w analizie zlokalizowanych było w Niemczech (6 stacji), Finlandii (5), Wielkiej Brytanii (4). Ponadto jeszcze tylko w 4 krajach zlokalizowanych było więcej niż po jednej stacji tj. w Polsce i Norwegii (3) oraz w Słowenii i Szwecji (2). W pozostałych 11 krajach ocenę wykonano w oparciu o wyniki pomiarów pochodzące z pojedynczych stacji (Tab. 8.3).

Uśrednione wartości wskaźnika depozycji Hg dla obszarów pozamiejskich tła w poszczególnych krajach europejskich pokazują, że w 2022 roku w Polsce wskaźnik średniej dobowej depozycji rtęci znajdował się na poziomie wyższych wartości w Europie, ale znacznie poniżej średniej obliczonej dla Europy (zawyżonej przez wysoką wartość depozycji uzyskaną dla Irlandii). Wyższe niż w Polsce wartości zanotowano dla 4 krajów, poza Irlandią również dla Hiszpanii, Holandii i Litwy. Najniższe wartości depozycji odnotowano w przypadku Austrii, Estonii i Czech. Prowadzony w Europie monitoring depozycji Hg pokazuje znaczną rozpiętość wartości wskaźnika na poszczególnych stacjach, zauważalny choćby w przypadku Polski czy Niemiec, co prowadzi do wniosku, iż pomiar na pojedynczej stacji może nie być miarodajny dla danego kraju (Tab. 8.3 i Rys. 8.4).

Tab. 8.3. Wskaźnik depozycji Hg (wartości minimalne i maksymalne na stacjach oraz średnie dla kraju) uzyskane w roku 2022 w poszczególnych krajach Europy (źródło danych: EAS, EMEP)

Kod kraju wg ISO	Liczba stacji	Dobowy wskaźnik depozycji		
		Dwa min	Dwa	Dwa max
		[$\mu\text{g}/\text{m}^2$ dzień]	[$\mu\text{g}/\text{m}^2$ dzień]	[$\mu\text{g}/\text{m}^2$ dzień]
AT	1	0,001	0,001	0,001
CZ	1	0,002	0,002	0,002
DE	6	0,005	0,009	0,017
EE	1	0,002	0,002	0,002
ES	1	0,026	0,026	0,026
FI	5	0,003	0,005	0,006
GB	4	0,007	0,007	0,008
HU	1	0,009	0,009	0,009
IE	1	0,293	0,293	0,293
LT	1	0,014	0,014	0,014
LV	1	0,007	0,007	0,007
MT	1	0,010	0,010	0,010
NL	1	0,023	0,023	0,023
NO	3	0,009	0,011	0,014
PL ^{*)}	3	0,006	0,013	0,021
PT	1	0,006	0,006	0,006
SE	2	0,004	0,006	0,008
SI	2	0,010	0,012	0,013
Europa	36	0,024	0,025	0,027

^{*)} Stacje: Osieczów, Puszcza Borecka, Zielonka



Rys. 8.4. Wskaźnik depozycji Hg (wartości minimalne, maksymalne oraz średnie) w poszczególnych krajach Europy na tle liczby stacji uwzględnionych w analizie w roku 2022 (źródło danych: EAS, EMEP)

Tab. 8.4. Wskaźnik depozycji Hg dla krajów europejskich w roku 2022, 2021 i z lat 2010-2021 oraz zmiany względne w roku 2022 w stosunku do roku wcześniejszego oraz wielolecia (źródło danych: EAS, EMEP)

Kod kraju wg ISO	Dwa [$\mu\text{g}/\text{m}^2$ dzień]			Różnica względna w roku 2022 w stosunku do [%]	
	2022	2021	2010-2021	roku 2021	okresu 2010-2021
AT	0,001	0,001	0,004	0,0%	-72,9%
BE			0,015	*) , **)	*)
CZ	0,002	0,025	0,020	-91,2%	-88,8%
DE	0,009	0,012	0,016	-29,3%	-46,2%
EE	0,002		0,011	**)	-83,9%
ES	0,026	0,011	0,020	141,2%	30,2%
FI	0,005	0,006	0,007	-9,1%	-21,2%
GB	0,007	0,007	0,016	9,3%	-55,3%
HU	0,009	0,034	0,096	-73,5%	-90,7%
IE	0,293		0,081	**)	262,6%
LT	0,014	0,011	0,017	27,3%	-16,6%
LV	0,007	0,010	0,033	-27,8%	-77,9%
MT	0,010	0,012	0,012	-16,7%	-16,7%
NL	0,023	0,021	0,019	7,7%	22,3%
NO	0,011	0,019	0,026	-39,8%	-56,2%
PL	0,013	0,014	0,022	-7,3%	-41,9%
PT	0,006	0,021	0,019	-71,4%	-69,0%
SE	0,006	0,008	0,012	-23,9%	-51,8%
SI	0,012	0,013	0,024	-12,6%	-51,3%

*) brak danych z 2022 roku

***) brak danych z 2021 roku

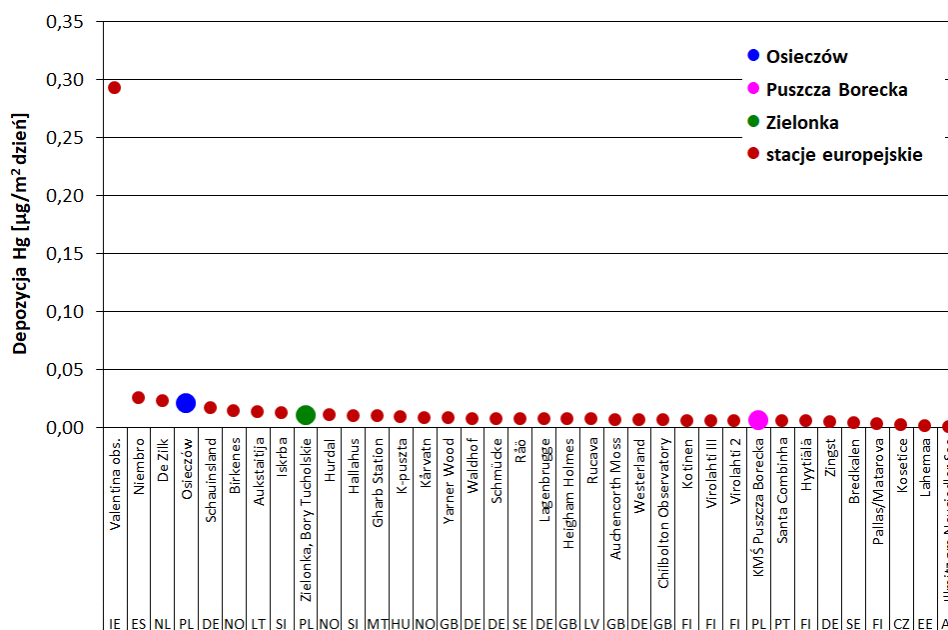
****) brak danych z lat 2010-2021

Analiza zmian uśrednionego wskaźnika depozycji Hg z roku na rok (2022-2021) wskazuje na wzrost depozycji Hg w 4 spośród 16 analizowanych krajów. Zdecydowanie najwyższy wzrost z roku na rok dotyczył Hiszpanii (ponad 141%) i Litwy (ponad 27%). W przypadku pozostałych 2 krajów (Wielka Brytania i Holandia) wzrosty nie przekroczyły 10%. W przypadku Austrii nie odnotowano praktycznie żadnych zmian depozycji z roku na rok. Spośród pozostałych 11 krajów, najwyższe spadki wartości wskaźnika dobowego depozycji rtęci zanotowano w przypadku Czech (ponad 91%) oraz Węgier i Portugalii (ponad 70%). W przypadku Polski odnotowano spadek nie przekraczający 10%, podobny jak w przypadku Finlandii (Tab. 8.4).

Analiza zmian średniego rocznego wskaźnika depozycji Hg w roku 2022 na tle całego rozważanego okresu 2010-2021 wskazała generalne spadki. Wyjątek stanowią Irlandia z ponad 260 procentowym wzrostem, oraz Hiszpania i Holandia (wzrost w ostatnim roku 20-30% w stosunku do średniej z wielolecia). Spośród pozostałych 11 krajów zanotowano wyraźne spadki wskaźnika depozycji Hg w roku 2022 w stosunku do średniej obliczonej z wielolecia, największy dotyczył Węgier (ponad 90%) Czech i Estonii (ponad 80%). W przypadku Polski wartość średniego wskaźnika depozycji Hg w roku 2022 była niższa od obliczonej dla wielolecia o blisko 42% (Tab. 8.3).

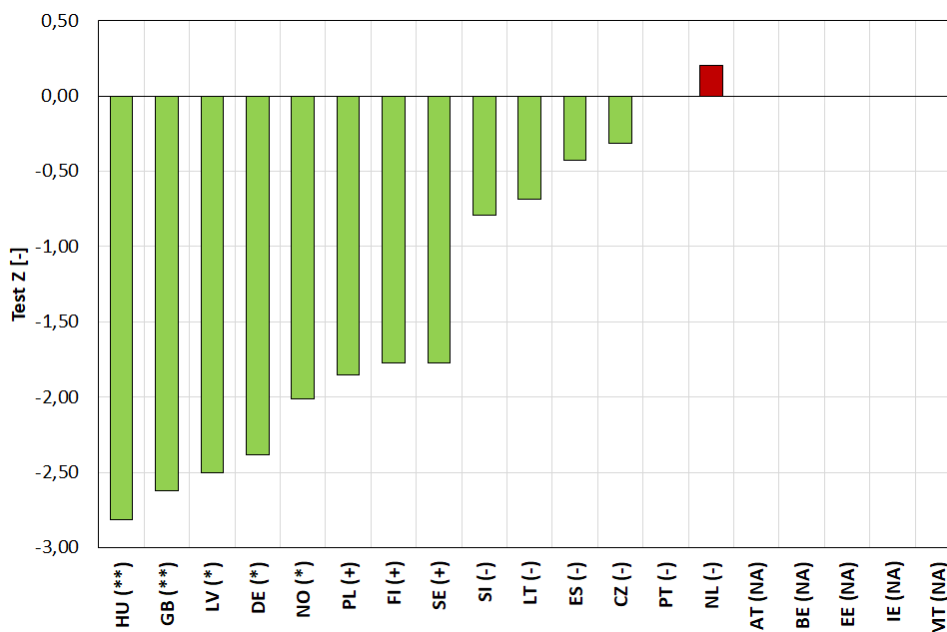
Analiza średniego dobowego wskaźnika depozycji Hg na poszczególnych stacjach europejskich pokazuje znaczną rozpiętość w granicach 0,001 - 0,293 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ na dzień. Wśród 5 stacji z najwyższymi wartościami wskaźnika depozycji na 36 poddanych analizie, znajdowały się pojedyncze stacje, kolejno z Irlandii (maksimum europejskie), Estonii, Holandii, Polski (Osieczów jako 4 maksimum) i Niemiec. Wartości uzyskane na pozostałych dwóch polskich stacjach tła regionalnego uplasowały je odpowiednio: Zielonkę w strefie wartości

wyższych na pozycji 9 maksimum europejskiego oraz Puszcę Borecką w strefie wartości niskich na pozycji 28 spośród 36 analizowanych (Rys. 8.5).



Rys. 8.5. Roczna depozycja Hg do podłoża na poszczególnych stacjach w Europie w roku 2022 (źródło danych: EAŚ, EMEP)

Analiza statystyczna trendów zmian wskaźników depozycji rtęci w okresie 2010-2022 w poszczególnych krajach Europy pokazuje zauważalne spadki. Taka sytuacja dotyczy 12 spośród 14 krajów, dla których serie pomiarowe były co najmniej 10-letnie (spośród 19 poddanych analizie). W przypadku 8 krajów obserwuje się istotne statystycznie trendy spadkowe, najwyraźniej zaznaczone w przypadku Węgier i Wielkiej Brytanii (istotność na poziomie **) oraz Łotwy, Niemiec i Norwegii (*). Dla Polski, Finlandii i Szwecji spadki te są nieco mniejsze, ale nadal istotne statystycznie (+). Nieistotne statystycznie tendencje malejące wskaźników depozycji zauważalne są dla Słowenii, Litwy, Hiszpanii i Czech. W przypadku Portugalii zmiany nie są zauważalne a w Holandii jako jedynym kraju w Europie zaznaczona jest nieistotna statystycznie tendencja rosnąca (Rys. 8.6).



Rys. 8.6. Trendy i tendencje zmian stężeń średnich rocznych wskaźników depozycji rtęci w poszczególnych krajach Europy w latach 2010-2022 (źródło danych: EAŚ i EMEP)

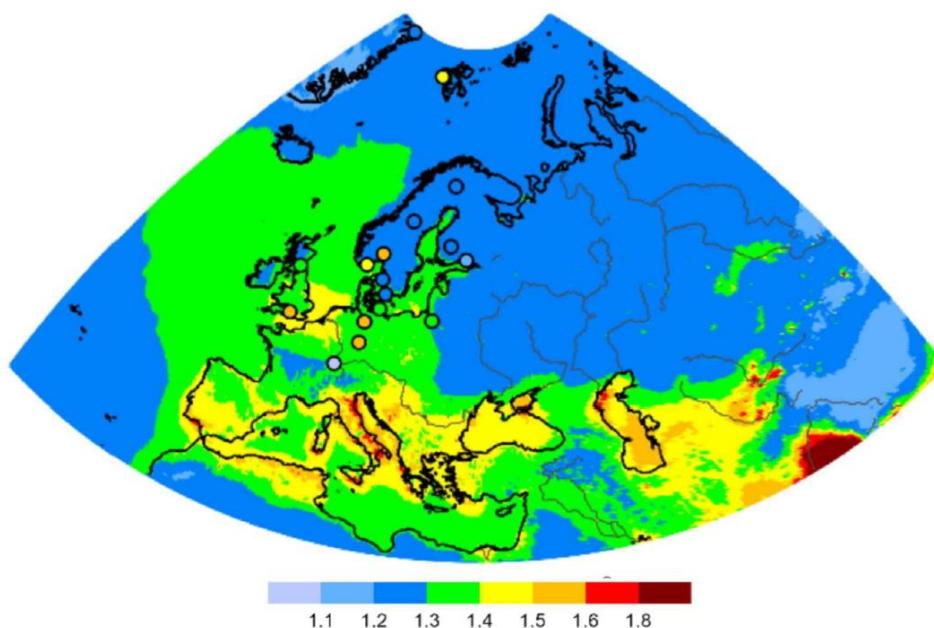
9. Modelowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono rezultaty obliczeń modelowych przeprowadzonych przez Meteorologiczne Centrum Syntetyzujące – Wschód (MSC-E) EMEP, zlokalizowanego od 2024 roku w Jožef Stefan Institute w Ljubljanie, w Słowenii. Zacerpnięto je z raportu dotyczącego zanieczyszczenia powietrza metalami ciężkimi i trwałymi zanieczyszczeniami organicznymi w domenie EMEP (EMEP, 2024). Obliczenia modelowe zostały wykonane przy użyciu najnowszej wersji open-source modelu GLEMOS (v2.2.2) z wykorzystaniem danych o emisji rtęci przygotowanych przez Centrum Inwentaryzacji i Prognoz Emisji EMEP (Centre on Emission Inventories and Predictions CEIP) na podstawie danych przekazanych przez kraje za rok 2022 oraz danych meteorologicznych opracowanych przez Europejskie Centrum Prognoz Średnioterminowych (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF). Ponadto wykorzystano globalną inwentaryzację emisji Hg (UNEP, 2019). W obliczeniach połączono symulacje modelowe zarówno w skali globalnej, jak i regionalnej, aby uwzględnić wpływ zarówno regionalnych, jak i globalnych źródeł emisji.

9.1. Zanieczyszczenie powietrza rtęcią

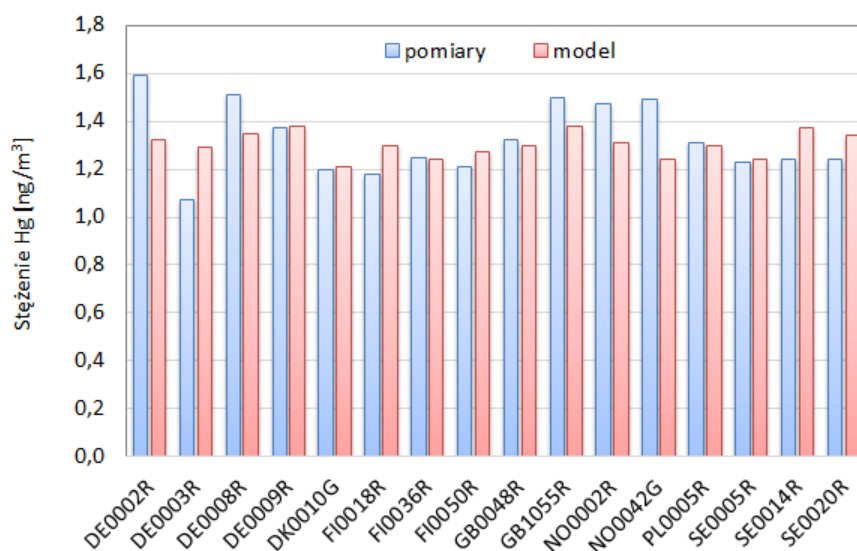
Rozkład przestrzenny stężeń rtęci w powietrzu na obszarze EMEP jest mało zróżnicowany pomiędzy regionami (znacznie mniej niż dla innych metali ciężkich), co można przypisać znaczącemu wpływowi transportu globalnego, powodowanemu długim czasem przebywania rtęci w atmosferze. Na większości obszaru stężenie rtęci w powietrzu wahało się pomiędzy 1 a 2 ng/m³, średnio 1,3 ng/m³. w Polsce, Portugalii, Hiszpanii, Włoszech, Grecji, Albanii, Bułgarii, Macedonii Północnej, Chorwacji, Serbii, Uzbekistanie, Kirgistanie, Tadżykistanie i Turkmenistanie (EMEP, 2024). Podwyższone wartości stężenia rtęci obserwowane są w strefach przybrzeżnych Morza Śródziemnego, a zwłaszcza Morza Czarnego i Kaspijskiego – w południowej części domeny EMEP, co jest spowodowane wpływem naturalnej emisji z tzw. pasa geochemicznego (Pirrone N., Mahaffey K.R., 2005). Na uwagę zasługuje także obszar Arktyki – w tegorocznych obliczeniach modelowych, inaczej niż we wcześniejszych

latach, obszar ten nie został wskazany jako charakteryzujący się wysokimi stężeniami Hg, ale widać to w wynikach pomiarów; wysokie stężenia rtęci przypisywano zwykle globalnemu transportowi tego zanieczyszczenia w atmosferze. Najniższe stężenia rtęci występowały w środkowej Francji, w Skandynawii, północnej Rosji (Rys. 9.1).



Rys. 9.1. Rozkład przestrzenny stężenia rtęci w powietrzu w roku 2022 – rezultaty obliczeń modelowych. Kółka na mapie pokazują wyniki pomiarów na stacjach w tej samej skali kolorystycznej [ng/m^3](źródło: EMEP (EMEP, 2024))

Różnice między modelowanymi i obserwowanymi stężeniami w powietrzu dla poszczególnych stacji wahały się od -17 do 21%, a więc model na niektórych stacjach zawyżał a na innych zaniżał wyniki (Rys. 9.2).

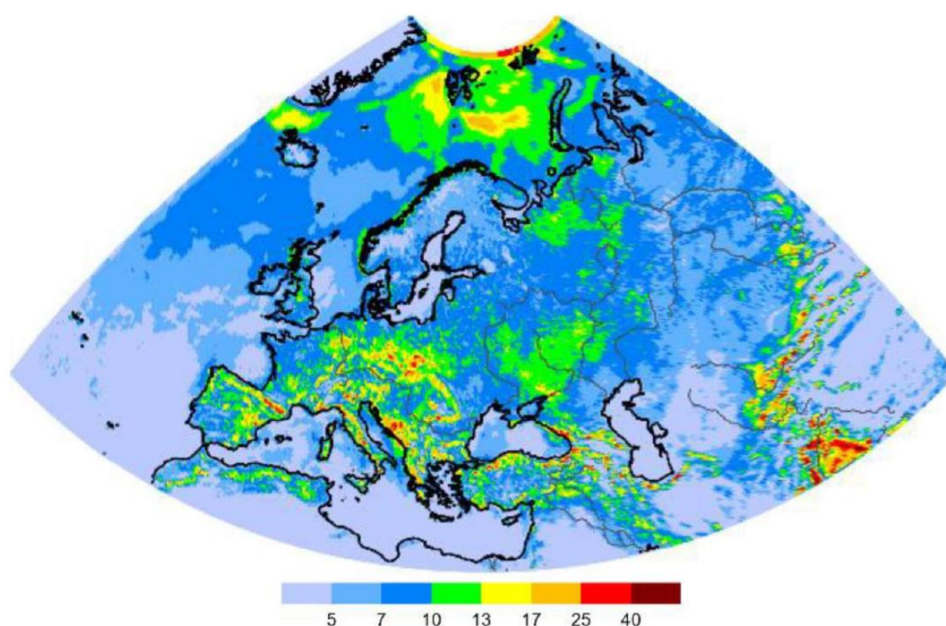


Rys. 9.2. Średnie roczne stężenia rtęci w powietrzu w roku 2022 – rezultaty obliczeń modelowych i wyniki pomiarów [ng/m^3](źródło: danych EMEP (EMEP, 2024))

9.2. Depozycja rtęci do podłoża

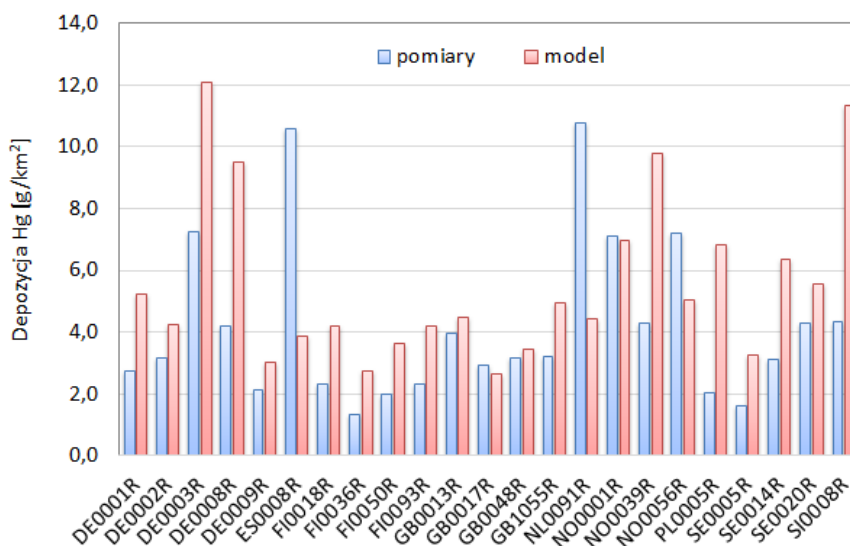
Roczne strumienie depozycji Hg wykazywały znacznie większą zmienność przestrzenną w porównaniu ze stężeniami w powietrzu. Wysokie poziomy całkowitej depozycji Hg (przekraczające 17 g/km^2) obserwuje się w całej Europie środkowej i południowej, w tym w takich krajach jak Niemcy, Polska, Czechy, Rumunia, Włochy, Hiszpania, Bośnia i Hercegowina oraz Bułgaria. Najbardziej intensywne strumienie depozycji (powyżej 25 g/km^2) występują w częściach Kaukazu i Azji Środkowej, głównie z powodu znacznych rocznych sum opadów i zwiększonego utleniania atmosferycznego rtęci (Rys. 9.3). Znaczącą depozycję odnotowano w Arktyce, co jest efektem dalekiego transportu rtęci i wiąże się również z intensywnym utlenieniem i depozycją rtęci w okresie wiosennym. Wielkość depozycji na tym obszarze wynosi na ogół $10\text{-}17 \text{ g/km}^2$, ale miejscami przekracza 17 g/km^2 . Należy jednak zauważyć, że znaczna część rtęci osadzonej na śniegu jest później ponownie emitowana do atmosfery. Obszary morskie/oceaniczne w domenie EMEP i pustynne obszary Środkowej Azji charakteryzują się najmniejszą depozycją rtęci (około 7 g/km^2 i poniżej tej wartości) (EMEP, 2024).

W wyniku intensywnego transportu międzykontynentalnego udział źródeł emisji spoza domeny EMEP w całkowitej depozycji rtęci jest największym czynnikiem przyczyniającym się do depozycji Hg w większości krajów EMEP, odpowiadając za ponad 50% całkowitej depozycji w 49 krajach EMEP, z wyjątkiem Czech i Polski; w 28 krajach EMEP transport transgraniczny ze źródeł spoza domeny EMEP stanowił ponad 75% całkowitej depozycji. Bezpośredni wpływ regionalnych źródeł wtórnych/naturalnych jest minimalny i stanowi mniej niż 3% strumienia depozycji we wszystkich krajach. Liczba ta nie uwzględnia jednak części wtórnych emisji Hg, które opuściły obszar EMEP i powróciły poprzez transport międzykontynentalny (EMEP, 2024).



Rys. 9.3. Rozkład przestrzenny depozycji rtęci w roku 2022 – rezultaty obliczeń modelowych [g/km^2] (źródło: EMEP (EMEP, 2024))

Zgodność między modelowanymi i zmierzonymi poziomami depozycji jest mniejsza niż w przypadku stężenia rtęci w powietrzu, a różnice względne dla poszczególnych stacji EMEP wyniosły w 2022 roku od -63% do 263%, przy czym model na ogół zawyżał wartości depozycji w stosunku do pomiarów (Rys. 9.4).



Rys. 9.4. Roczne wartości depozycji rtęci w roku 2022 – rezultaty obliczeń modelowych i wyniki pomiarów [g/km²] (źródło danych: EMEP (EMEP, 2024))

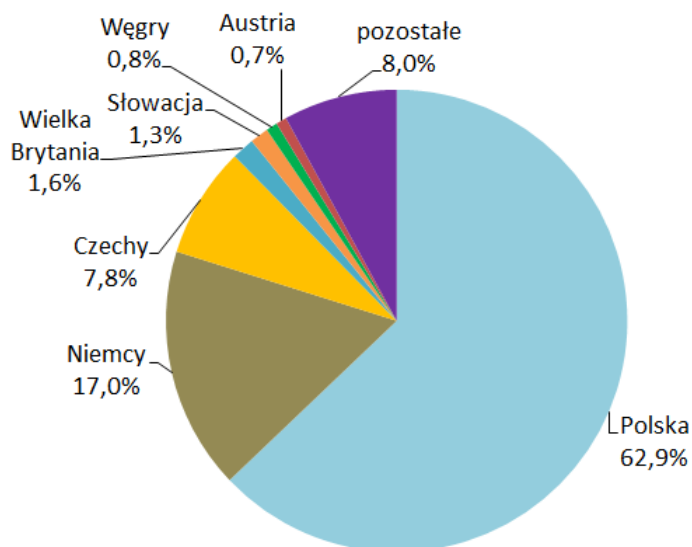
9.3. Transport transgraniczny rtęci

W wyniku intensywnego transportu międzykontynentalnego udział źródeł emisji spoza domeny EMEP w całkowitej depozycji rtęci jest największym czynnikiem przyczyniającym się do depozycji Hg w większości krajów EMEP, odpowiadając za ponad 50% całkowitej depozycji w 49 krajach EMEP, z wyjątkiem Czech i Polski. W 28 krajach EMEP transport transgraniczny ze źródeł spoza domeny EMEP stanowił ponad 75% całkowitej depozycji. Bezpośredni wpływ regionalnych źródeł wtórnych/naturalnych jest minimalny i stanowi mniej niż 3% strumienia depozycji we wszystkich krajach. Liczba ta nie uwzględnia jednak części wtórnych emisji Hg, które opuściły obszar EMEP i powróciły poprzez transport międzykontynentalny (EMEP, 2024).

Biorąc pod uwagę wyłącznie depozycję rtęci ze źródeł antropogenicznych, kraje o znacznych krajowych emisjach rtęci - takie jak Bośnia i Hercegowina, Polska, Niemcy, Włochy, Wielka Brytania, Irlandia, Turcja i Hiszpania - doświadczają wyższej depozycji ze źródeł krajowych niż z innych krajów EMEP. I odwrotnie, kraje o minimalnych emisjach krajowych (np. Liechtenstein, Monako, Malta, Kirgistan, Cypr) wykazują ponad 90% względnego udziału depozycji rtęci pochodzącej z transportu transgranicznego (EMEP, 2024).

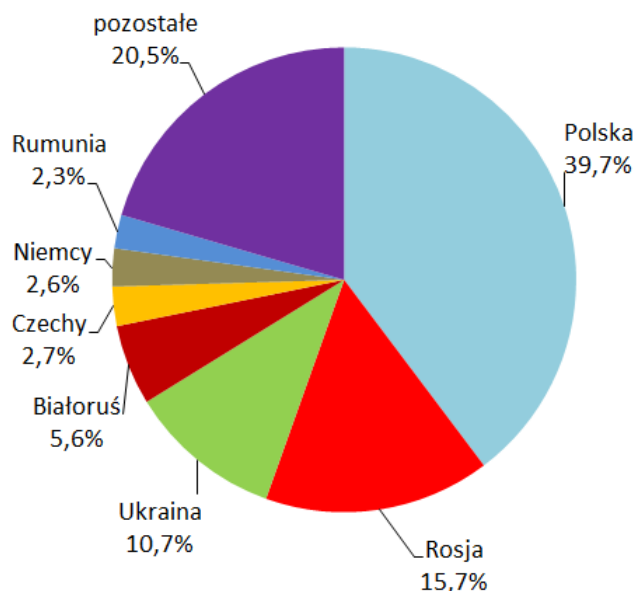
Z 1,83 Mg rtęci ze źródeł antropogenicznych, zdeponowanych w 2022 roku na obszarze Polski, blisko 63% zostało wyemitowane na terenie kraju. W mniejszych ilościach do tej depozycji przyczyniły się źródła niemieckie (17%), czeskie (ok. 8%), brytyjskie (ponad 1,5%),

słowackie (nieco ponad 1%), węgierskie i austriackie (blisko 1%). Pozostałe kraje w domenie EMEP w sumie dostarczyły 8% rtęci osiadłej na obszarze Polski (Rys. 9.5).



Rys. 9.5. Obszary źródłowe dla depozycji rtęci w Polsce w roku 2022 – na podstawie rezultatów obliczeń modelowych (źródło danych: EMEP (EMEP, 2024))

Rtęć emitowana w Polsce osiada na terenie kraju oraz poza jego granicami, przy czym Polska jest głównym receptorem rtęci emitowanej z własnych źródeł.



Rys. 9.6. Obszary docelowe dla depozycji rtęci emitowanej w Polsce w roku 2022 – na podstawie rezultatów obliczeń modelowych (źródło danych: EMEP (EMEP, 2024))

W 2022 roku ok. 40% zdeponowanej na podłożu rtęci pochodzącej z polskich źródeł antropogenicznych osiadło na naszym terytorium. Poza Polską głównymi odbiorcami rtęci emitowanej w naszym kraju były kraje sąsiednie: Rosja (gdzie osiadło ok. 16% depozycji z polskich źródeł emisji), Ukraina (ok. 11%), Białoruś (ok. 5%), Czechy (ok. 3%), Niemcy i Rumunia (po ok. 2%). W mniejszych ilościach rtęć z Polski osiadała także na innych terenach, do których w sumie dotarło ponad 20% zdeponowanej rtęci pochodzącej z krajowych źródeł (Rys. 9.6).

10. Podsumowanie

Emisja rtęci

Wśród krajów o największej emisji rtęci w Unii Europejskiej znajdują się: Niemcy, Polska, Włochy, Hiszpania i Francja. W roku 2022 krajowa emisja rtęci ze źródeł antropogenicznych wyniosła 6,21 Mg i była mniejsza o blisko 27% w stosunku do emisji z roku poprzedniego. Udział Polski w emisji europejskiej (z 27 krajów UE) rtęci w 2022 roku wynosił 17%, a w emisji z domeny EMEP blisko 5%.

Dominującymi sektorami w krajowej emisji Hg w roku 2022 były: *Przemysły energetyczne* (ponad 50% emisji krajowej rtęci) oraz *Procesy przemysłowe* (24%). Około 47% rtęci emitowanej z zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza pochodziło z województwa łódzkiego.

Warunki meteorologiczne

Cechą charakterystyczną warunków termicznych obserwowanych na większości stacjach ostonowych w 2023 roku była wyjątkowo ciepła zima i upalne lato, czyniąc ten okres kolejnym rekordowo ciepłym rokiem (zbliżonym do 2019). Dla okresu 2010-2023 obserwuje się zdecydowaną tendencję wzrostową temperatury.

Warunki opadowe obserwowane na stacjach w roku 2023 charakteryzowały się wzrostem opadów w stosunku do wartości z 2022 roku na czterech z pięciu stacji ostonowych i względem wielolecia 2010-2022 na trzech z pięciu stacji. Był to rok o wyjątkowo zróżnicowanych opadach w czasie i przestrzeni w rejonach analizowanych stacji tła regionalnego.

Warunki meteorologiczne kształtowane były najczęściej przez masy powietrza napływające nad Polskę z kierunku północno-zachodniego i południowego a najrzadziej – z kierunku południowo-zachodniego. Względem lat wcześniejszych odnotowano ponadprzeciętną częstość występowania wiatru z kierunków południowego i północno-wschodniego i niższą częstość wiatru z kierunków południowo-zachodniego, południowo-wschodniego i północnego.

Zanieczyszczenie powietrza rtęcią

Charakterystyczną cechą przebiegu stężeń Hg w powietrzu na wszystkich stacjach tła regionalnego w 2023 roku i latach wcześniejszych (2010-2022) są relatywnie niewielkie zmiany. Wyższe stężenia rtęci w powietrzu w 2023 roku uzyskano na stacjach Osieczów, Granica i Złoty Potok, a niższe na stacjach Puszcza Borecka i Zielonka. W roku 2023 nieznaczny spadek średniego rocznego stężenia Hg w powietrzu z roku na rok zaobserwowano na stacjach Osieczów, Złoty Potok i Zielonka, a niewielki wzrost na stacjach Granica i Puszcza Borecka, przy czym były to zmiany rzędu kilku procent (największa w Puszczy Boreckiej wyniosła ok. 8%). Analizy wartości średnich rocznych z 2023 roku w zestawieniu ze średnimi z wielolecia

(2010-2022) wykazały niższe wartości na wszystkich stacjach, poza Granicą. Zmiany względne wyniosły od kilku do kilkunastu procent.

Porównanie wyników stężeń rtęci w powietrzu w 2022 roku w krajach europejskich wskazuje, że przeciętne roczne stężenie rtęci gazowej w powietrzu w Polsce było najwyższe w Europie, nieco wyższe niż uzyskane średnie dla Węgier i Norwegii. Taki stan rzeczy wynika z faktu, iż wśród 5 stacji z najwyższymi stężeniami Hg w powietrzu w Europie, znajdowały się 3 z Polski, w tym z pierwszym i drugim maksimum. Analiza względnych zmian stężeń uśrednionych dla każdego z krajów z roku na rok (w 2022 w stosunku do 2021) pokazuje wzrost stężeń z roku na rok dla 6 krajów (największy dla Wielkiej Brytanii i Szwecji) oraz spadek dla 5 (największy dla Słowenii). W przypadku Polski spadek stężeń Hg z roku na rok wyniósł blisko 8%, zaś w porównaniu do średniej z wielolecia 2010-2021 – 2%, przy zauważalnej, nieistotnej statystycznie, tendencji malejącej w analizowanym okresie 2010-2022.

Depozycja rtęci

Spośród trzech analizowanych stacji tła regionalnego, najwyższą depozycję rtęci w roku 2023 zaobserwowano na stacji w Osieczowie, zaś najniższą w Zielonce. Względne zmiany depozycji Hg z roku na rok (2022-2023) wykazały spadek w Osieczowie i Zielonce. W roku 2023 zanotowano niższe wartości wskaźników depozycji niż średnia z wielolecia (2010-2022) na stacjach w Puszczy Boreckiej i Zielonce i nieznacznie wyższy w Osieczowie. Wyższe wartości wskaźnika depozycji obserwuje się na ogół latem niż zimą, co wynika z sezonowego rozkładu sum opadów atmosferycznych.

Uśrednione wartości wskaźnika depozycji Hg dla obszarów pozamiejskich tła w poszczególnych krajach europejskich pokazują, że w 2022 roku w Polsce wskaźnik średniej dobowej depozycji rtęci znajdował się na poziomie wyższym, lecz poniżej średniej obliczonej dla Europy. Wyższe niż w Polsce wartości zanotowano dla 4 krajów. Analiza zmian uśrednionego wskaźnika depozycji Hg z roku na rok (w latach 2022-2021) wskazuje na wzrost depozycji Hg w 4 spośród 16 analizowanych krajów oraz spadek w 11, w tym w Polsce, przy braku zmian w Austrii. Analiza zmian średniego rocznego wskaźnika depozycji Hg w roku 2022 na tle całego rozważanego okresu 2010-2021 wskazała generalne spadki (w tym dla Polski), z wyjątkiem Irlandii, Hiszpanii i Holandii. Generalne spadki wskaźnika depozycji rtęci w Europie potwierdza analiza statystyczna, wskazująca na istotne statystycznie trendy malejące dla większości krajów w tym dla Polski. Analiza średniego dobowego wskaźnika depozycji Hg na poszczególnych stacjach europejskich pokazuje znaczną rozpiętość, widoczną w wielu krajach, w tym również w Polsce.

Modelowanie

Rezultaty obliczeń modelowych wskazują, że Polska należy do obszarów o przeciętnych w Europie stężeniach rtęci powietrzu i jej depozycji do podłoża, poza województwem śląskim i dolnośląskim oraz małymi obszarami związanymi z dużymi źródłami punktowymi, gdzie notowane są wyższe wartości.

Obliczenia modelowe wskazują, że wysokie stężenia rtęci w powietrzu występują we wschodniej i południowej części domeny EMEP i w rejonie Morza Śródziemnego, co jest spowodowane zarówno przez źródła antropogeniczne, jak również przez wpływ naturalnej emisji z tzw. pasa geochemicznego. Obszary o największej depozycji rtęci w Europie były zlokalizowane w Europie środkowej i południowej, co przypisuje się zarówno lokalizacji dużych źródeł emisji, jak i wpływowi źródeł naturalnych.

11. Bibliografia

Opracowania wykonane w ramach PMŚ, dostępne na stronie GIOŚ <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/measuringstation/U>

- Pyta H., Zajusz R. (2013):** Ocena zanieczyszczenia powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce w latach 2010-2012. Inspekcja Ochrony Środowiska, Zabrze, 2013
- Falkowska L.(2014):** Zanieczyszczenie powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce - ocena za 2013 rok. Inspekcja Ochrony Środowiska, Gdańsk, 2014
- Skotak K., Degórska A., Prządka Z. (2015):** Zanieczyszczenie powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce - ocena za 2014 rok. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2015
- Falkowska L., Bełdowska M., Saniewska D. (2016):** Zanieczyszczenie powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce za 2015 rok. Inspekcja Ochrony Środowiska, Gdańsk, 2016
- Skotak K., Degórska A., Prządka Z. (2017):** Zanieczyszczenie powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce za 2016 rok. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2017
- Skotak K., Degórska A., Prządka Z., Syrzycki M. (2018):** Zanieczyszczenie powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce za 2017 rok. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2018
- Skotak K., Degórska A., Prządka Z., Syrzycki M. (2019):** Zanieczyszczenie powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce za 2018 rok. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2019
- Skotak K., Degórska A., Prządka Z., Syrzycki M. (2020):** Zanieczyszczenie powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce za 2019 rok. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2020
- Skotak K., Degórska A., Prządka Z., Syrzycki M. (2021):** Zanieczyszczenie powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce za 2020 rok. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2021
- Degórska A., Skotak K., Prządka Z., Syrzycki M. (2022):** Ocena zanieczyszczenia powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce za 2021 rok, IOŚ-PIB Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2022
- Degórska A., Skotak K., Prządka Z., Syrzycki M. (2023):** Ocena zanieczyszczenia powietrza rtęcią na stacjach tła regionalnego w Polsce za 2022 rok, IOŚ-PIB Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2023

Materiały źródłowe i zbiory danych przygotowane przez:
oddziały Centralnego Laboratorium Badawczego GIOŚ:

- **we Wrocławiu:** Sprawozdanie z badań jakości powietrza przeprowadzonych na stacji tła regionalnego "Osieczów", Osieczów, gm. Osiecznica, powiat bolesławiecki, Kod stacji: DsOsieczow w roku 2023

- **w Katowicach:** Sprawozdanie z badań jakości powietrza przeprowadzonych na stacji tła regionalnego Złoty Potok, gm. Janów (rejon Leśniczówki), SIzłotyJano_lesni w roku 2023
 - **w Bydgoszczy:** Sprawozdanie z badań jakości powietrza przeprowadzonych na stacji tła regionalnego Bory Tucholskie, Zielonka, KpZielBoryTu w roku 2023
 - **w Warszawie:** Sprawozdanie z badań jakości powietrza przeprowadzonych na stacji tła regionalnego Granica-KPN, Granica - Kampinoski Park Narodowy, MzGranicaKPN w roku 2023
- oraz **Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy:** Sprawozdanie z badań jakości powietrza przeprowadzonych na stacji tła regionalnego Puszcza Borecka, WmPuszczaBor w roku 2023

Publikacje dostępne (w większości) na stronach www:

- 2021 AMAP** Mercury Assessment. Summary for Policy-makers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2021)
- Bose-O'Reilly i in., (2010):** Mercury exposure and children's health. *Curr Probl Pediatr Adolesc Health Care* 2010 Sep;40(8):186-215
- EC (2017):** Science for Environment Policy, Tackling mercury pollution in the EU and worldwide, University of the West of England, In-depth report 15, 2017
- EEA (2018):** Mercury in Europe's environment. A priority for European and global action. European Environmental Agency, 2018
- EEA (2020):** Air quality in Europe — 2020 report, EEA report, 9/2020, European Environment Agency
- EMEP (2024):** Assessment of transboundary pollution with heavy metals and POPs. MSC-E & CCC & CEIP; EMEP Status Report 2/2024
- Genchi i in., (2017):** Mercury Exposure and Heart Diseases, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14(1):74
- Grandjean and Herz, (2011):** Methylmercury and Brain Development: Imprecision and Underestimation of Developmental Neurotoxicity in Humans *Mt Sinai J Med* 78:107–118
- GUS (2023):** Ochrona środowiska 2023. Informacje i opracowania statystyczne. GUS, 2023
- Gworek B. i inni (2013)** Rtęć w środowisku – Monografia – IOŚ-PIB, 2013
- Gworek B. i inni (2013)** Źródła uwalniania rtęci do środowiska – Regulacje prawne - Monografia – IOŚ-PIB, 2013
- Karagas i in., (2012):** Evidence on the human health effects of low level methylmercury exposure. *Environmental Health Perspectives* 120(6): 799-806
- MAKESENS 1.0, (2002):** Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates for the Trend on Annual Data. Version 1.0. Finnish Meteorological Institute, 2002
- Miklavčič i in., (2013):** Economic benefits of methylmercury exposure control in Europe: monetary value of neurotoxicity prevention. *Environ Health* 2013 Jan 7;12
- MKiŚ, KOBIZE (2024):** Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 1990-2022. Raport syntetyczny. MKiŚ, KOBIZE, 2024

- Pirrone N., Mahaffey K.R. (2005):** Dynamics of Mercury Pollution on Regional and Global Scales: Atmospheric Processes and Human Exposures Around the World. Springer, 2005
- UNEP (2002):** Global Mercury Assessment, United Nations Environmental Programme, Geneva, Switzerland
- UNEP (2019):** Global Mercury Assessment 2018 (AMAP/UNEP, 2019; <https://www.amap.no/mercury-emissions/datasets>)
- UNITED NATIONS (2021)** PROGRESS REPORT 2020 Overview of the Minamata Convention on Mercury activities, UNEP/MINAMATACONVENTION/2021/1
- Young-Seoub i in., (2012):** Methylmercury exposure and health effects. J Prev Med Public Health 2012 Nov 29;45(6):353-63

Przepisy prawne i wytyczne:

- EU (1978):** Council Directive 79/117/EEC of 21 December 1978 prohibiting the placing on the market and use of plant protection products containing certain active substances(OJ L 33, 8.2.1979, p. 36-40)
- EU (2003):** Regulation (EC) No 304/2003 of the European Parliament and of the Council of 28 January concerning the export and import of dangerous chemicals (OJ L63, 6.3.2003, p. 1-26)
- EC (2010):** Guidance on the quantification of the contribution of natural sources under the EU Air Quality Directive 2008/20/EC. Draft version 2. European Commission, DG Environment. May 2010
- KE (2005):** 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. Urz. UE L 23/3 z 26.1.2005)
- KE (2008):** Dyrektywa 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (Dz. U. UE L 152/1, 11.6.2008)
- KE (2010):** Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 roku w sprawie emisji przemysłowych (Dz. Urz. UE L 334/17 z 17.12.2010)
- KE (2015):** Dyrektywa Komisji (UE) 2015/1480 z dnia 28 sierpnia 2015 r. zmieniającą niektóre załączniki do dyrektyw Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/107/WE i 2008/50/WE ustanawiających przepisy dotyczące metod referencyjnych, zatwierdzania danych i lokalizacji punktów pomiarowych do oceny jakości powietrza (Dz. Urz. UE L 226 z 29.08.2015, str. 4)
- KE (2016):** Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/2284 z dnia 14 grudnia 2016 r. w sprawie redukcji krajowych emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych, zmiany dyrektywy 2001/35/WE oraz uchylenia dyrektywy 2001/81/WE (Dz. Urz. UE L 344/1 z 17.12.2006)
- KE (2017):** Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/852 z dnia 17 maja 2017 r. w sprawie rtęci oraz uchylające rozporządzenie (WE) nr 1102/2008 (Dz. Urz. UE L 137/1 z 24.05.2017)
- KE (2021):**Decyzja wykonawcza Komisji (UE) 2021/2326 z dnia 30 listopada 2021 r. ustanawiająca konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (BAT) w odniesieniu do dużych obiektów energetycznego spalania zgodnie z dyrektywą

- Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE (notyfikowana jako dokument nr C(2021) 8580)
- LRTAP (1979):** Konwencja Genewska w sprawie transgranicznego zanieczyszczenia powietrza na dalekie odległości, sporządzona w Genewie dn. 13 listopada 1979 r. (Dz. U. z 1985 r. Nr 60, poz 311; Dz.U z 1988 r. Nr 40, poz. 313)
- PMŚ-W (2024):** Wykonawczy Program Państwowego Monitoringu Środowiska na rok 2024. Monitoring jakości powietrza. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2024
- PMŚ-W (2023):** Wykonawczy Program Państwowego Monitoringu Środowiska na rok 2024. Monitoring jakości powietrza. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2023
- PMŚ-W (2022):** Wykonawczy Program Państwowego Monitoringu Środowiska na rok 2023. Monitoring jakości powietrza. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2022
- PMŚ-W (2021):** Wykonawczy Program Państwowego Monitoringu Środowiska na rok 2022. Monitoring jakości powietrza. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2021
- PMŚ-W (2020):**Wykonawczy Program Państwowego Monitoringu Środowiska na rok 2021. Monitoring jakości powietrza. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2020
- PMŚ-W (2020):**Wykonawczy Program Państwowego Monitoringu Środowiska na rok 2020. Monitoring jakości powietrza. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2020
- PMŚ (2020):** Strategiczny Program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2020-2025. Główny Inspektor Ochrony Środowiska, Warszawa 2015
- PMŚ (2015):** Program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2016-2020. Główny Inspektor Ochrony Środowiska, Warszawa 2015
- PMŚ (2012):** Program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2013-2015. Główny Inspektor Ochrony Środowiska, Warszawa 2012
- PMŚ (2009):** Program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2010-2012. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2009
- Ustawa Poś:** ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (t.j. Dz. U. 2024 r., poz. 54)
- RMŚ (2020):** 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)
- PN-EN 15852:** Jakość powietrza atmosferycznego. Standardowa metoda oznaczania rtęci gazowej całkowitej
- PN-EN 15853:** Jakość powietrza atmosferycznego. Standardowa metoda oznaczania depozycji rtęci
- UNECE (1998):** Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Heavy Metals (The Aarhus Protocol), United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland
- UNEP (2017):** Minamata Convention on Mercury, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland

Bazy danych i model:

Baza GIOŚ: Bank danych pomiarowych GIOŚ JPOAT2.0

Baza IMGW-PIB: Dane publiczne IMGW-PIB

Baza EEA1: The European air quality database. AirBase+

Baza EEA2: Air Quality e-Reporting (AQ e-Reporting)

Baza EMEP: ebas

Baza CEIP: *EMEP/CEIP 2023 Present state of emission*

data; <https://www.ceip.at/webdab-emission-database/reported-emissiondata> or <https://www.ceip.at/status-of-reporting-and-review-results/2023-submission> - baza danych emisyjnych EMEP

wersja open-source modelu GLEMOS (v2.2.2): <https://github.com/glemos-model>