



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

**MONITORING CAŁKOWITEJ ZAWARTOŚCI OZONU
W ATMOSFERZE ORAZ NATĘŻENIA PROMIENIOWANIA UV-B
NA STACJI BELSK W LATACH 2023-2025
RAPORT O STANIE WARSTWY OZONOWEJ W 2023 ROKU**

Opracowano w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Zakładzie Fizyki Atmosfery, pod kierownictwem dr hab. Janusza Jarosławskiego, prof. IFG.



Praca wykonana zgodnie z umową zawartą z Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska nr GIOŚ/31/2023/DMS/NFOŚiGW z dnia 20.02.2023 r. Praca finansowana wyłącznie ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Przy cytowaniu danych należy podawać źródło danych:
Państwowy Monitoring Środowiska, Inspekcja Ochrony Środowiska.

Warszawa, 2024

SPIS TREŚCI

Wstęp	2
1. Całkowita zawartość ozonu i jego rozkład pionowy	5
1.1 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiarów spektrofotometrem Dobsona, B. Rajewska-Więch, J.W. Krzyścin	5
1.2 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiarów spektrofotometrem Brewera, J. Jarosławski, B. Rajewska-Więch	14
1.3 Rozkład pionowy ozonu mierzony metodą Umkehr, B. Rajewska-Więch, J.W. Krzyścin	17
2. Zawartość dwutlenku siarki, ozonu, dwutlenku azotu i tlenku węgla przy powierzchni Ziemi	28
2.1 Dwutlenek siarki, J. Jarosławski	28
2.2 Ozon przyziemny i dwutlenek azotu, J. Jarosławski	31
2.3 Tlenek węgla, J. Jarosławski	35
2.4 Pył zawieszony PM10, J. Jarosławski	37
3. Nadfioletowe promieniowanie słoneczne UV-B, A. Pietruczuk, J. Podgórski, P. Sobolewski, Jakub Wink	71
4. Zmiany zawartości ozonu w atmosferze nad Belskiem w 2021 roku na tle zmian globalnych ozonu, J.W. Krzyścin, B. Rajewska-Więch	82
4.1 Całkowita zawartość ozonu w Belsku	82
4.2 Profil pionowy ozonu w Belsku	84
4.3 Ekstremalne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku	87
4.4 Promieniowanie UV-B w Belsku	90
4.5 Globalne zmiany całkowitej zawartości ozonu	93

WSTĘP

Celem pracy jest:

- * śledzenie stanu warstwy ozonowej nad Polską, trendów i skali zjawiska na tle globalnego procesu zmian warstwy ozonowej w celu zapewnienia naukowej podstawy i obiektywnego uzasadnienia działań podejmowanych na rzecz ochrony warstwy ozonowej
- * zapewnienie podstaw do informowania społeczeństwa o skutkach zmian warstwy ozonowej objawiających się wzrostem natężenia biologicznie czynnego promieniowania UV-B w przypadku zmniejszenia zawartości ozonu w atmosferze
- * udział w międzynarodowej wymianie danych ozonowych, zgodnie z wymaganiami Konwencji Wiedeńskiej i Światowego Systemu Obserwacji Ozonu.

Wyniki tych prac stanowią naukową podstawę działań podejmowanych na rzecz ochrony warstwy ozonowej w ramach Protokołu Montrealskiego, którego Polska jest stroną.

W okresie od 1 stycznia 2023 r. do 31 grudnia 2023 r. zrealizowano wszystkie zadania zgodnie ze szczegółowym zakresem prac stanowiącym załącznik nr 1 do umowy nr GIOŚ/31//2023/DMS/NFOŚiGW z dnia 20.02.2023r.

W ramach poszczególnych zadań w 2023 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk w Belsku wykonano:

1. Całkowita zawartość ozonu i jego rozkład pionowy.
 - 1.1 Pomiary całkowitej zawartości ozonu przy pomocy spektrofotometru Dobsona prowadzono systematycznie pięciokrotnie (w lecie) lub trzykrotnie (w zimie) w ciągu dnia, o ile nie uniemożliwiło tego wystąpienie opadu deszczu lub śniegu. Wartości średnie dzienne wyznaczono z pomiarów o największej dokładności, zgodnie z rekomendacją Międzynarodowej Komisji Ozonu (International Ozone Commission) Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO).
 - 1.2 Pomiary całkowitej zawartości ozonu przy pomocy spektrofotometru Brewera prowadzono systematycznie o ile nie uniemożliwiło tego wystąpienie opadu deszczu lub śniegu. Wartości średnie dzienne uzyskiwane są z pomiarów, dla których rozrzut nie przekracza 2,5 D.
 - 1.3 Wykonano 203 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr. Pomiary Umkehr wykonywane są w określonych warunkach pogodowych (bezchmurne niebo). Wyniki pomiarów z serii Umkehr, po wstępnym opracowaniu w Belsku wysyłane są do

Światowego Centrum Danych Ozonowych w Kanadzie, gdzie profile ozonu wyznaczone są dla całej sieci światowej tego rodzaju pomiarów.

Wyniki otrzymane z pomiarów są weryfikowane pod względem kompletności i spójności oraz przetwarzane do postaci umożliwiającej ich dalsze wykorzystywanie. Dodatkowo, po wykonaniu kalibracji spektrofotometrów dane historyczne są ponownie przeliczane, już z uwzględnieniem najnowszych współczynników kalibracyjnych. Dopiero tak przetworzone dane stanowią podstawę do interpretacji i analiz statystycznych. Zbiory danych powstałe w wyniku realizacji zadań są przechowywane na dysku twardym komputera zakładowego, a kopie zapasowe na nośnikach elektronicznych.

2. W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku w 2023 roku kontynuowano rejestrację biologicznie czynnego ultrafioletowego promieniowania słonecznego, UV-B, rozpoczętą w roku 1975. Obecnie pomiary wykonywane są przy pomocy miernika UVS-AE-T firmy Kipp & Zonen (K&Z), w jednostkach [SED]. Jednostka SED jest proponowana przez *International Organization for Standardization* (ISO) w miejsce jednostki MED, Minimum Erythema Dose. Zgodnie ze standardem ISO 17166:1999 stosowanie jednostek SED pozwala na prowadzenie standaryzowanych pomiarów promieniowania UV, które nie są obciążone indywidualnymi cechami osobniczymi determinującymi wystąpienie rumienia. Wyniki otrzymane z pomiarów są weryfikowane pod względem kompletności i spójności oraz przetwarzane do postaci umożliwiającej ich dalszą obróbkę. Dodatkowo, po wykonaniu kalibracji dane historyczne są ponownie przeliczane już z uwzględnieniem najnowszych współczynników kalibracyjnych. Dopiero tak przetworzone dane stanowią podstawę do interpretacji i analiz statystycznych. Zbiory danych powstałe w wyniku realizacji zadań są przechowywane na dysku twardym komputera zakładowego, a kopie zapasowe na nośnikach elektronicznych.

3. W 2023 roku wykonywano w Belsku pomiary i rejestrację stężenia ozonu, SO₂, CO, NO₂ i pyłu zawieszonego PM10 w przyziemnej warstwie atmosfery. Pomiary te wykonywane są w sposób ciągły (24 godziny na dobę) analizatorami firmy Horiba, Thermo i Envea. Na podstawie uzyskiwanych wartości chwilowych obliczane są średnie 60 min. Na ich podstawie przeprowadzana jest dalsza analiza wyników: obliczane są dobowe wartości maksimum i minimum, średnia wartość dobową, średnie przebiegi dobowe oraz średnie miesięczne. Wyniki pomiarów przekazywano na bieżąco do bazy danych CAS znajdującej się w oddziale CLB GIOŚ w Warszawie i przesyłane do Komisji Europejskiej trybie miesięcznym. Opracowano 1-godzinne wartości stężeń O₃, SO₂, CO, NO₂ i PM10.

Wyniki otrzymane z pomiarów są weryfikowane pod względem kompletności i spójności oraz przetwarzane do postaci umożliwiającej ich dalszą obróbkę. Dodatkowo, po

wykonaniu kalibracji dane historyczne są ponownie przeliczane już z uwzględnieniem najnowszych współczynników kalibracyjnych. Dopiero tak przetworzone dane stanowią podstawę do interpretacji i analiz statystycznych. Wyposażenie pomiarowe i używana aparatura podlegała stałemu nadzorowi i obsłudze serwisowej.

4. Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu w atmosferze oraz natężenia promieniowania UV-B przekazywano do GIOŚ w trybie miesięcznym.
5. Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu i natężenia promieniowania UV-B za rok 2022 dla Głównego Urzędu Statystycznego oraz europejskiej bazy danych INSPIRE przekazano do GIOŚ.
6. W przypadku spadku całkowitej zawartości ozonu o więcej niż 20% średniej wieloletniej zostałby poinformowany GIOŚ.
7. Dane o całkowitej zawartości ozonu i jego rozkładzie pionowym przekazywano do Światowego Centrum Danych Ozonowych w Toronto, Kanada.
8. Średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu przekazywano do Laboratorium Fizyki Atmosfery Uniwersytetu w Salonikach, Grecja, oraz do Światowego Centrum Danych Ozonowych w Toronto, Kanada, gdzie sporządzane są aktualne mapy ozonu dla półkuli północnej
9. Opracowano końcowy raport o stanie warstwy ozonowej i natężenia promieniowania UV-B. Raport ten zawiera analizę danych i trendy w Polsce na tle zmian globalnych.

1. Całkowita zawartość ozonu i jego rozkład pionowy

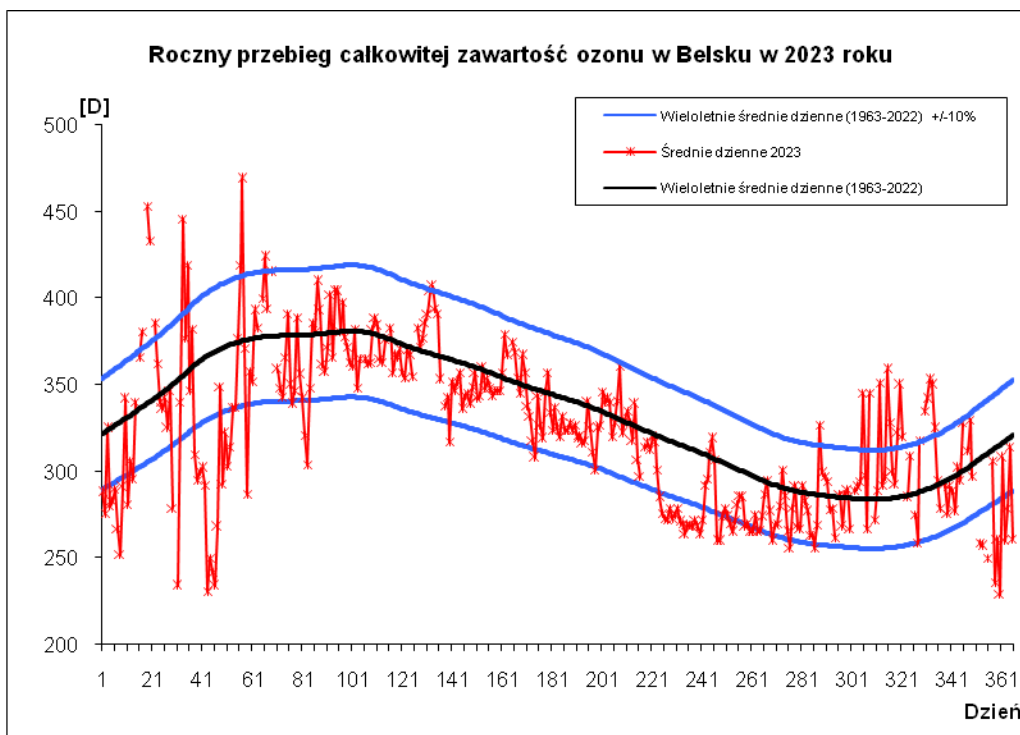
1.1 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem

Dobsona

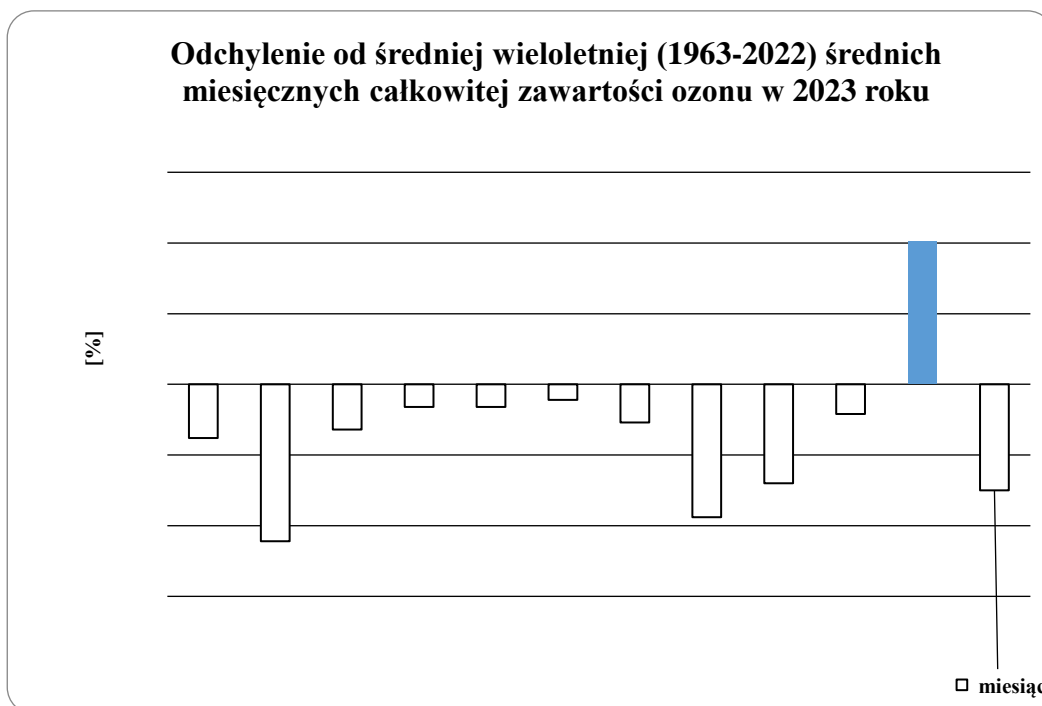
Bonawentura Rajewska-Więch, Janusz W. Krzyścin

Całkowita zawartość ozonu jest wielkością, od której w znacznej mierze zależy dopływ do powierzchni Ziemi słonecznego promieniowania ultrafioletowego UV-B. Miarą jej jest grubość warstwy ozonu w atmosferze po sprowadzeniu go do warunków standardowych ciśnienia i temperatury. Średnio w atmosferze znajduje się 8×10^{18} cząsteczek ozonu w słupie powietrza o podstawie 1 cm^2 , co jest równoważne warstwie tego gazu o grubości 0,3 cm. Jednostka całkowitej zawartości ozonu nazywana jest atmocentymetrem (atm-cm); całkowita zawartość ozonu wynosi 1 atm-cm, jeśli grubość warstwy ozonu w standardowych warunkach ciśnienia i temperatury wynosi 1 cm, a jej tysięczną część nazwano dobsonem (D).

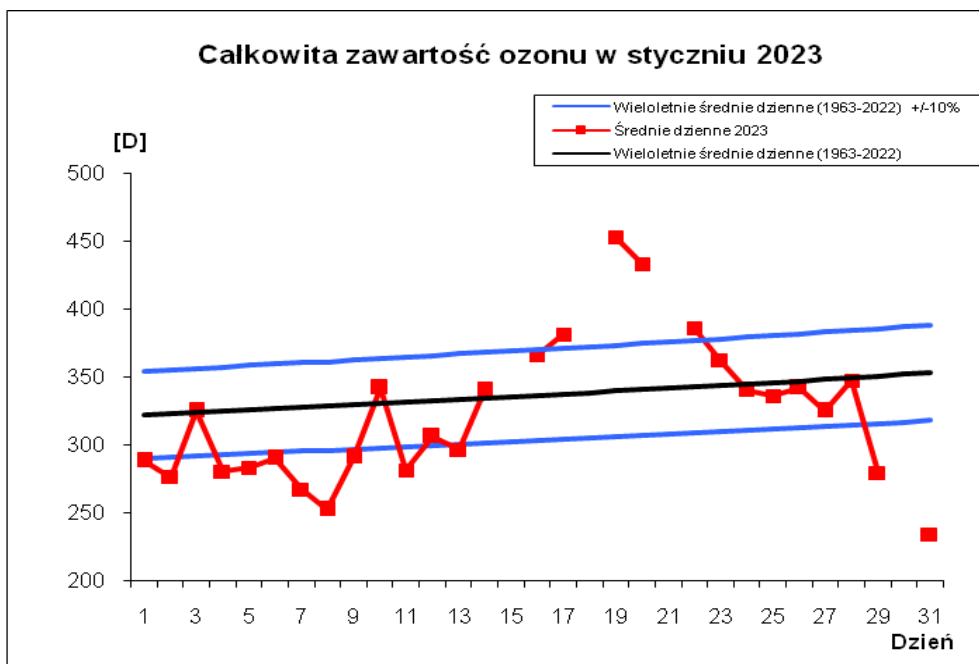
Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwala stwierdzić, że w 2023 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2022 tylko w listopadzie o 10,1%. Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w styczniu 3,8%, lutym 11,1%, marcu 3,2%, kwietniu 1,6%, maju 1,6%, czerwcu 1,1%, lipcu 2,7%, sierpniu 9,4%, wrześniu 7,0%, październiku 2,1% i grudniu 7,5%. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu w 2023 roku, zmierzonych spektrofotometrem Dobsona, w odniesieniu do wieloletniej średniej dziennej (1963-2022) $\pm 10\%$ przedstawiono na Rys.1.1.1. Odchylenia procentowe średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu od odpowiednich średnich wieloletnich przedstawia Tab.1.1.1 i Rys.1.1.1a.



Rys. 1.1.1. Roczny przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, Belsk, 2023 rok.



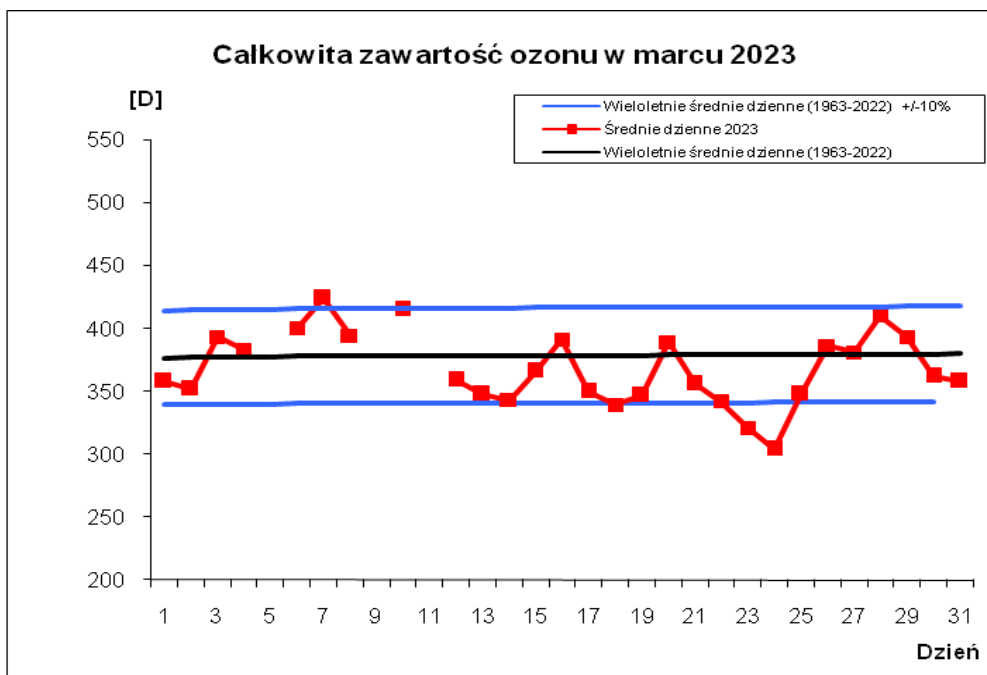
Rys.1.1.1.a. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2022) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2023 roku



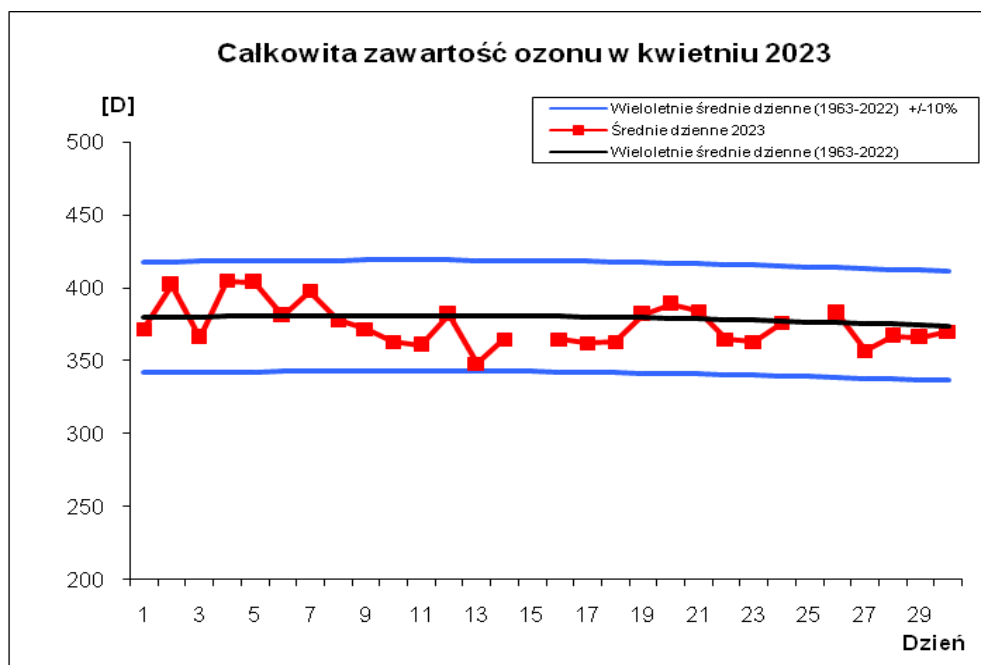
Rys. 1.1.2. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, styczeń 2023r.



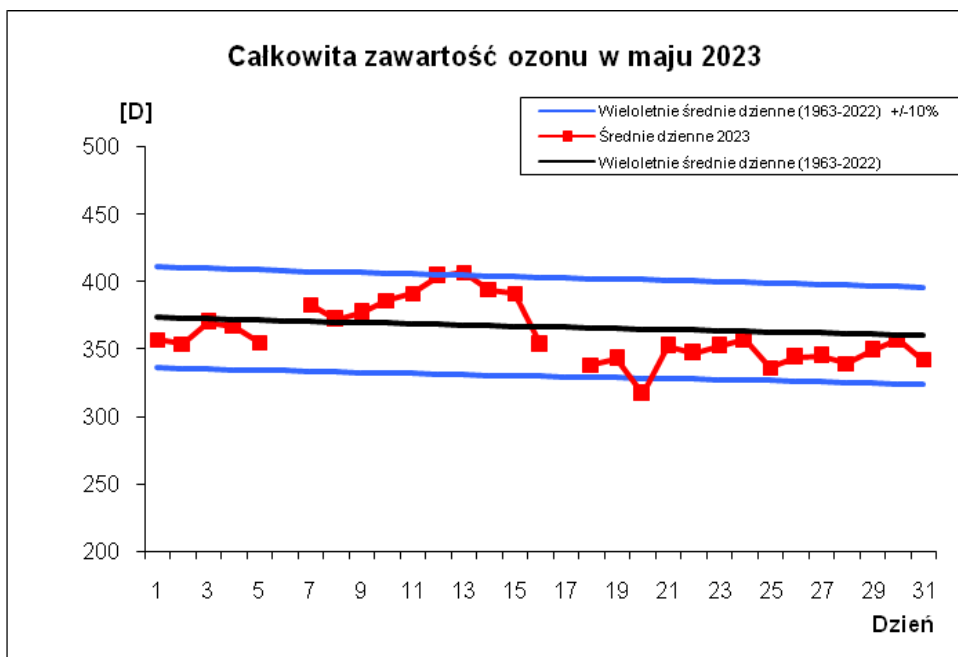
Rys. 1.1.3. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, luty 2023r.



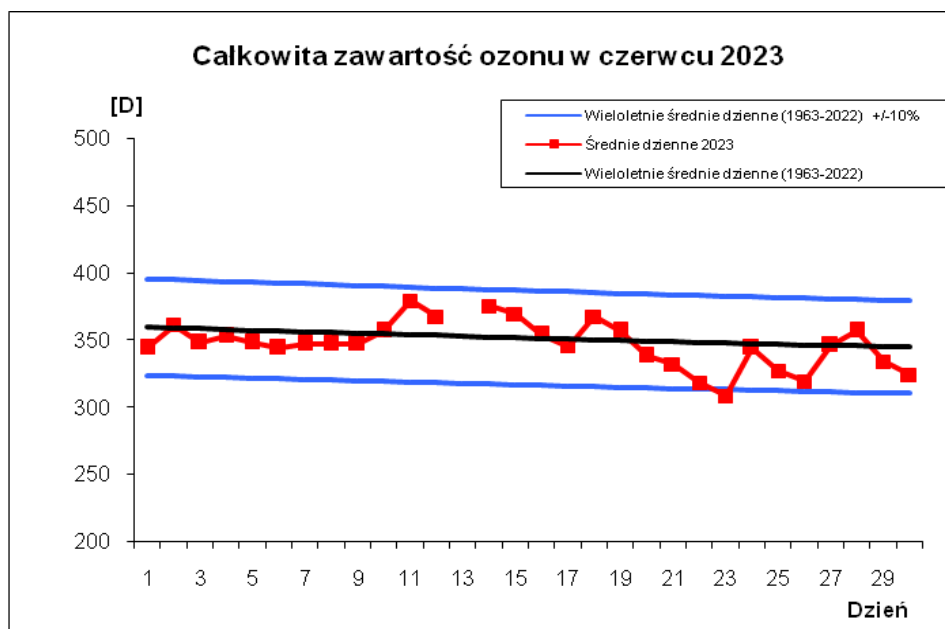
Rys.1.1.4. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, marzec 2023r.



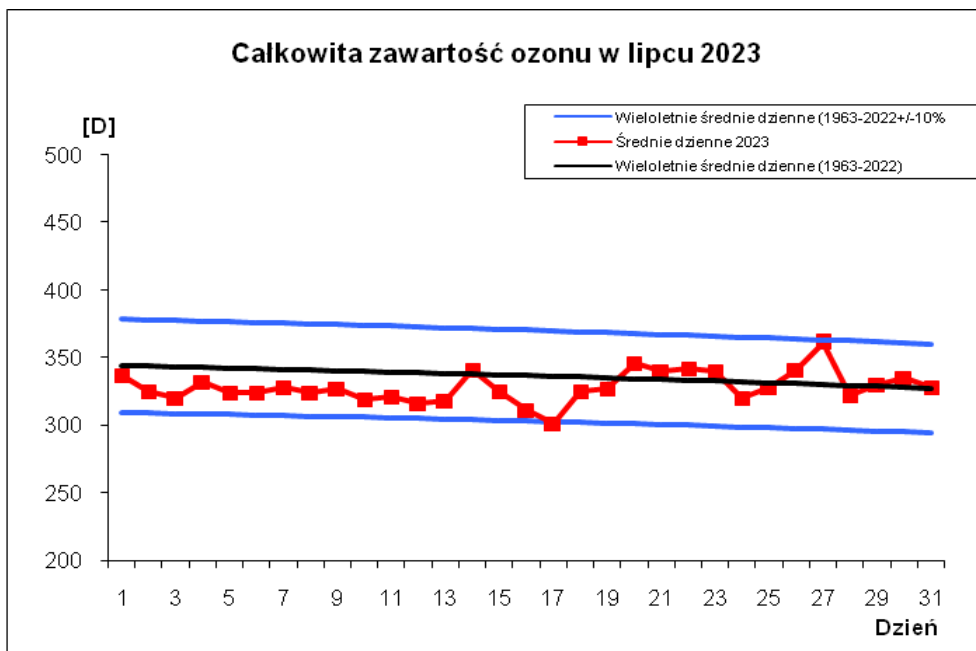
Rys.1.1.5. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, kwiecień 2023r.



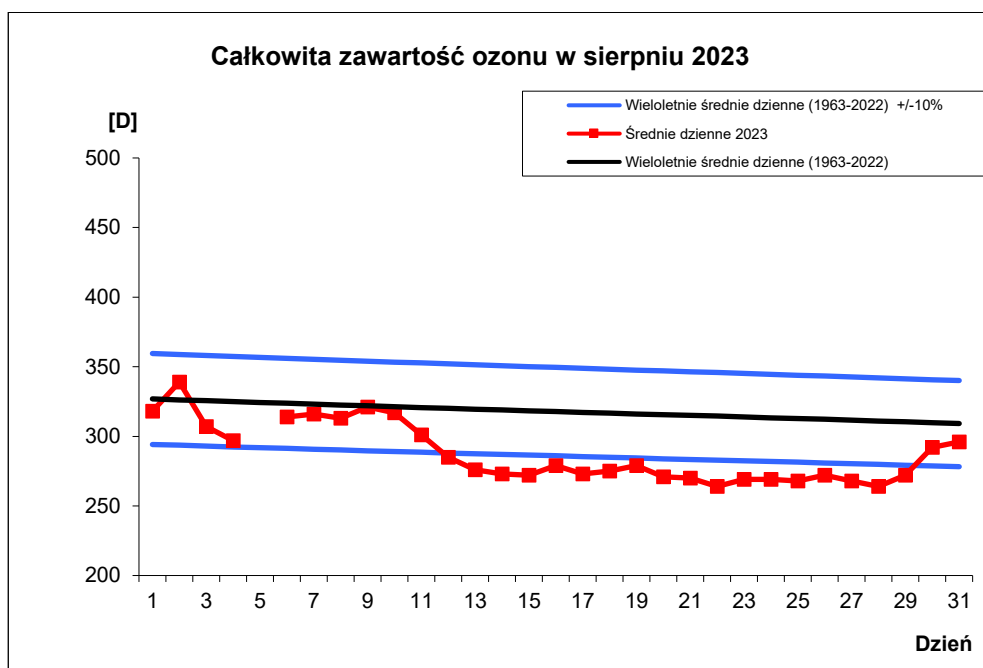
Rys.1.1.6. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, maj 2023r.



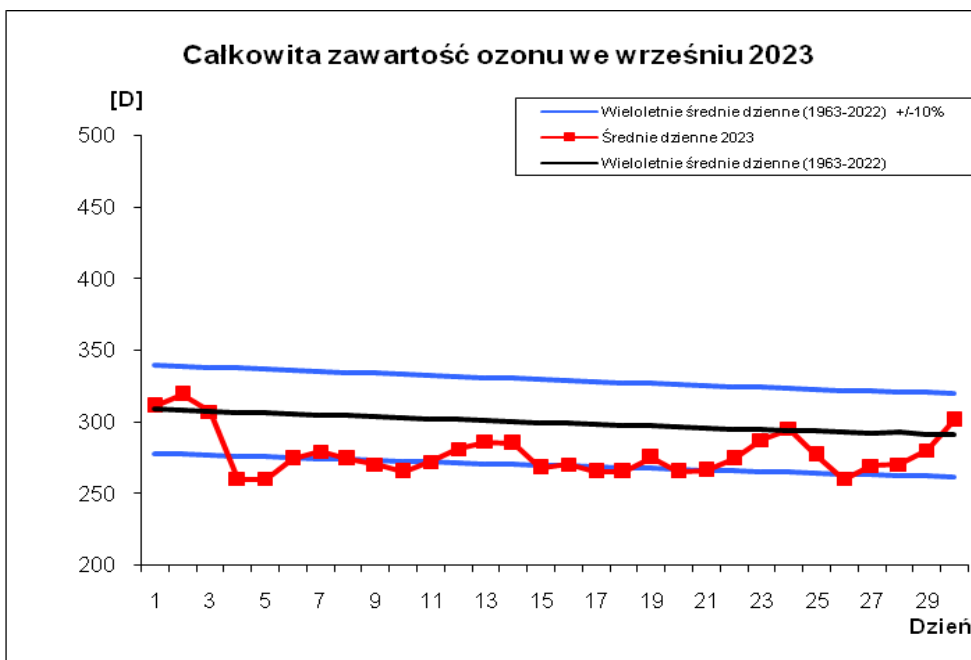
Rys.1.1.7. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, czerwiec 2023r.



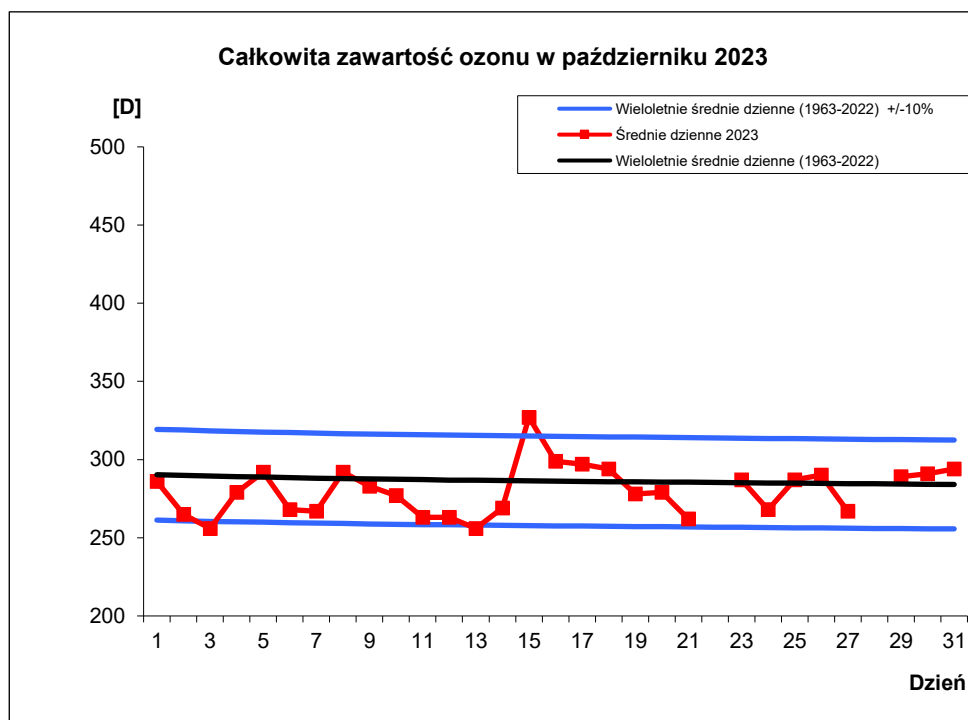
Rys.1.1.8. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, lipiec 2023r.



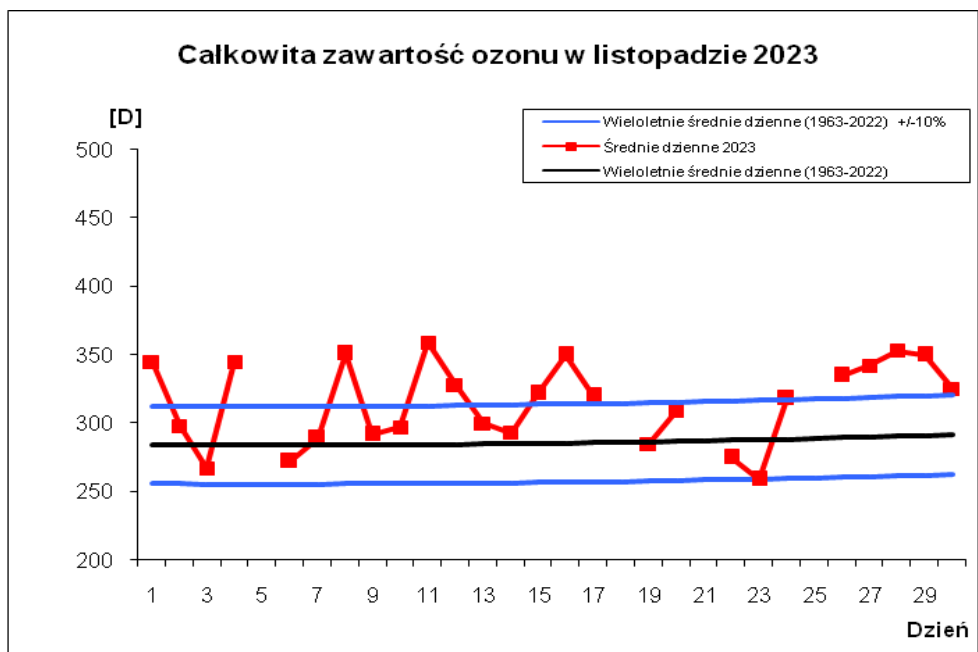
Rys.1.1.9. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, sierpień 2023r.



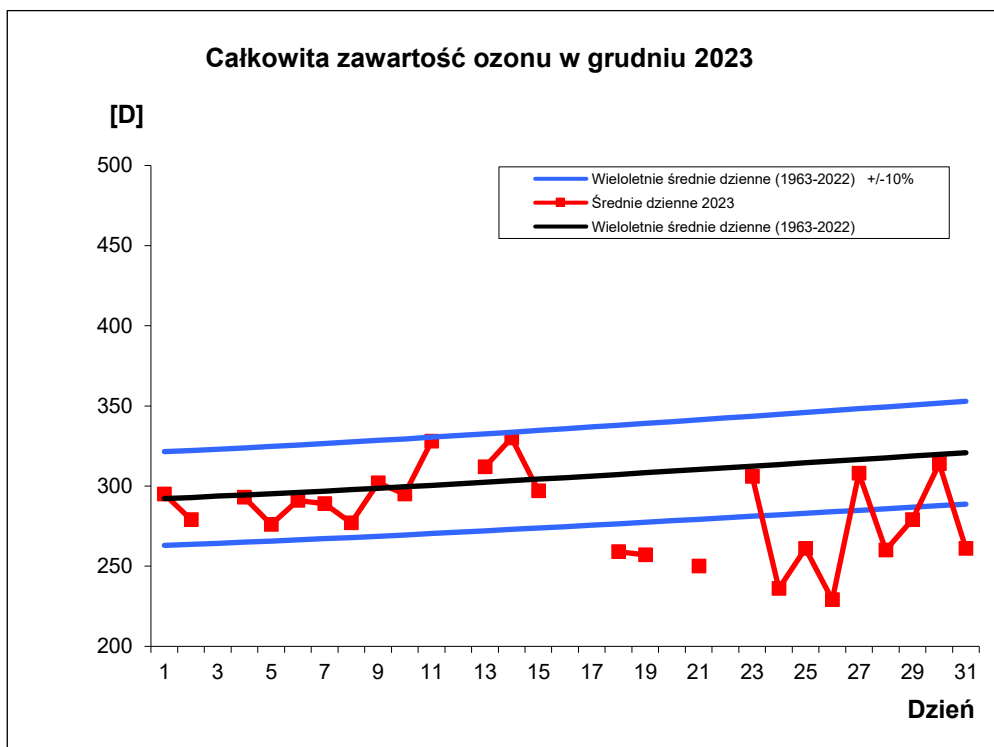
Rys.1.1.10. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, wrzesień 2023r.



Rys.1.1.11. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, październik 2023r.



Rys.1.1.12. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, listopad 2023r.



Rys.1.1.13. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, grudzień 2023r.

Tabela 1.1.1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2023 roku i ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963-2022.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. wiel. 1963-2022	338	370	380	381	367	351	337	318	299	286	286	306
Śr. mieś. 2023	325	329	368	375	361	347	328	288	278	280	315	283
Różnica w %	-3,8	-11,1	-3,2	-1,6	-1,6	-1,1	-2,7	-9,4	-7,0	-2,1	10,1	-7,5

W miesiącach letnich 2023 roku, kiedy promieniowanie ultrafioletowe osiąga maksymalne natężenie, ze względu na dominującą zależność od wysokości Słońca, odchylenia średnich miesięcznych wartości ozonu w odniesieniu do średnich wieloletnich (1963-2022) wynosiły -1,1% w czerwcu, -2,7% w lipcu i -9,4% w sierpniu (Tabela 1.1.1).

Przebieg średnich wartości dziennych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze w poszczególnych miesiącach przedstawia sekwencja rysunków (Rys.1.1.2 – Rys.1.1.13), gdzie czerwona linia – średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu w 2023 roku, linia czarna – wieloletnia (1963-2022) średnia dzienna całkowitej zawartości ozonu, linia niebieska – odchylenie o $\pm 10\%$ od wieloletniej średniej dziennej. Jeśli odniesiemy te przebiegi do miesięcznych średnich wieloletnich, to widzimy, że największe niedobory całkowitej zawartości ozonu obserwowano w styczniu, lutym, marcu, sierpniu, wrześniu i grudniu. W styczniu (Rys.1.1.2), lutym (Rys.1.1.3), marcu (Rys.1.1.4), sierpniu (Rys.1.1.9), wrześniu (Rys.1.1.10) i grudniu (Rys.1.1.13) średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem odpowiednio dziewięciu, sześciu, dziewięciu, jednego, dwóch i trzech dni były poniżej średniej wieloletniej 1963-2022. W kwietniu (Rys.1.1.5), maju (Rys.1.1.6) i czerwcu (Rys.1.1.7) średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu były odpowiednio przez siedem, osiem i siedem dni niższe od średniej wieloletniej (1963-2022). W lipcu (Rys.1.1.8) i październiku (Rys.1.1.11) średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem sześciu dni w każdym z nich były niższe od średniej wieloletniej 1963-2022. Tylko w listopadzie (Rys.1.1.12) przez dwadzieścia dni całkowita zawartość ozonu była wyższa od średniej wieloletniej 1963-2022. Niedobory całkowitej zawartości ozonu w miesiącach letnich (maj, czerwiec, lipiec, sierpień) w stosunku do średniej wieloletniej mogą stanowić potencjalne zagrożenie wzmożonym dopływem promieniowania ultrafioletowego. Spadki całkowitej zawartości ozonu, przekraczające -10% średniej wieloletniej obserwowano w styczniu, lutym, marcu, wrześniu i grudniu 2023 roku.

Przebieg zmienności z dnia na dzień całkowitej zawartości ozonu w Belsku w 2023 roku w odniesieniu do przebiegu średnich wieloletnich (1963-2022) i ich odchyleń $\pm 10\%$ od średniej wieloletniej przedstawiono na Rys.1.1.1.

Stacja ozonu w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku uczestniczy w programie sporządzania codziennych map całkowitej zawartości ozonu dla półkuli północnej przez Northern Hemisphere Ozone Mapping Centre w Laboratorium Fizyki Atmosfery

Uniwersytetu w Salonikach, Grecja oraz w Światowym Centrum Danych Ozonowych w Toronto, Kanada. Program ten realizowany jest w ramach Systemu Globalnego Monitoringu Ozonu (GO₃OS), działającego pod egidą Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO). Dzięki temu mamy dostęp do aktualnych danych o całkowitej zawartości ozonu w ciągu całego roku, uzyskiwanych przez stacje pomiarowe biorące udział w tym eksperymencie.

1.2 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Brewera

Janusz Jarosławski, Bonawentura Rajewska-Więch

Przez cały 2023 rok wykonywano pomiary całkowitej zawartości ozonu przy pomocy spektrofotometru Brewera. Wartości średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu uzyskiwane są z pomiarów spełniających założone kryteria jakości, tj. dla których odchylenie standardowe pojedynczej serii pomiarów składających się na jeden cykl pomiarowy nie przekracza 2,5 D.

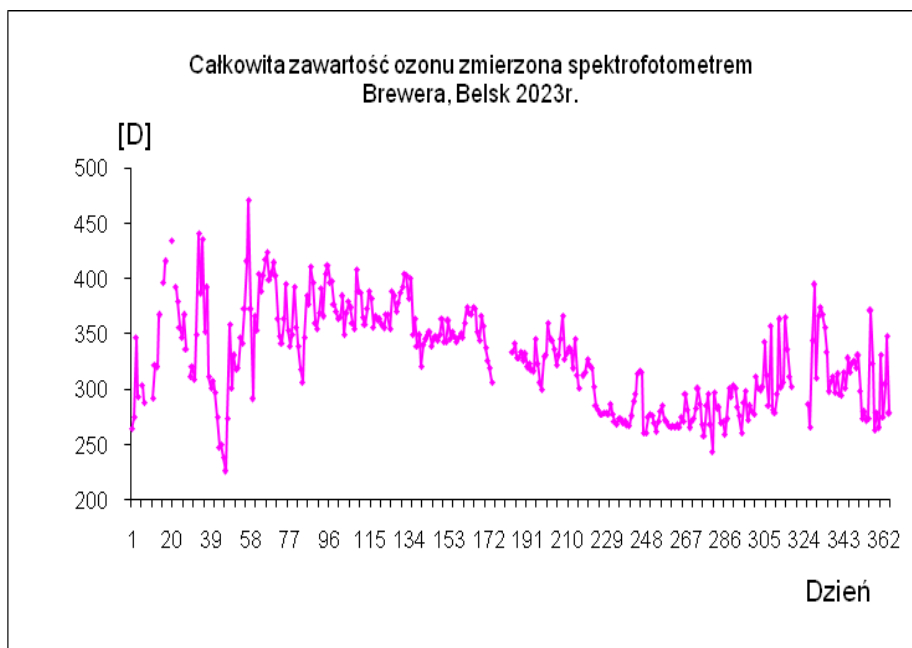
Metodę pozwalającą wyznaczyć całkowitą zawartość ozonu na podstawie pomiarów w świetle rozproszonym z zenitu opracowano w 1995 roku. Pozwoliło to na wykonywanie pomiarów również w okresie pochmurnej pogody, co ma istotne znaczenie szczególnie w okresie jesienno-zimowym ze względu na ograniczoną liczbę dni pogodnych. Wyniki pomiarów w postaci średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu przedstawiono w Tabeli 1.2.1 i na Rys.1.2.1.

Zgodność danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych ze spektrofotometru Brewera z danymi otrzymanymi przy pomocy spektrofotometru Dobsona może być oceniona jako dobra. Różnica średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu uzyskanych za pomocą spektrofotometru Dobsona i Brewera mieści się w granicach około $\pm 2\%$ w ciągu całego roku. Należy dodać, że wyniki tych pomiarów różnią się między innymi dlatego, że spektrofotometr Brewera dostarcza danych, w których uwzględniony jest błąd wynikający z obecności w atmosferze zaburzającego absorbera, jakim jest dwutlenek siarki (SO₂). Mimo wymienionych różnic pomiarowych, średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu uzyskane przy pomocy obydwu przyrządów różnią się niewiele (Rys.1.2.2).

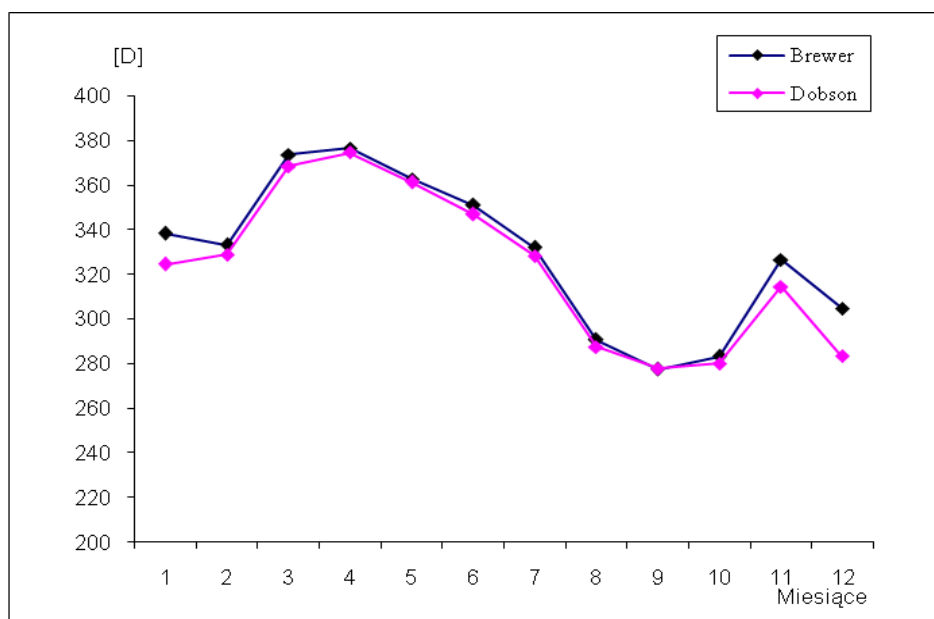
Jakkolwiek podstawowym przyrządem sieci pomiarów całkowitej zawartości ozonu nadal pozostaje spektrofotometr Dobsona, to jednak możliwość kontynuacji pomiarów i analiz porównawczych obu przyrządów jest niezwykle ważna, chociażby ze względu na zapewnienie ciągłości serii pomiarów

Tabela 1.2.1. Średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiaru spektrofotometrem Brewera w Belsku w 2023 roku.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	264,5	349,7	366,4	368,9	358,1	342,6	-	318,8	314,6	287,4	342,6	333,7
2	274,7	440,9	353,5	391,1	355,6	362	-	345,7	317,2	268	312,9	298
3	347,5	386,9	404,3	366,1	367,8	345,8	334,1	312,9	316,1	258,2	285,8	307,4
4	293,2	435,8	388,5	404,6	367,7	352,2	341,3	301,1	260,3	285,2	357,9	311,6
5	-	352,8	403,5	412,8	354,4	347,9	328,5	-	261,2	295,8	281,9	296,8
6	304,3	392,1	417,5	397	388,7	342,6	328,8	312,4	274,9	268,3	278,9	313,7
7	287,7	311,3	423,9	398,3	384,2	346,8	333,9	315,3	278,2	243,6	296,3	296,1
8	-	301,5	399	377,4	370,7	350,6	326,5	327,6	276,4	296,9	363,4	294,3
9	-	308	405,8	371,1	378,1	347,3	332	321,8	269,4	283	301,8	315,6
10	-	297,6	414,3	363,6	387,4	360	320,3	319,6	262	283,5	306	301,7
11	292,3	274,7	402,9	365,2	392,6	374,9	324	302,7	271,6	269,6	365,6	328,1
12	322,2	247,7	364,1	384,4	405,1	369,1	317,6	285,1	280,7	271,4	336,5	315,9
13	320,2	250,2	347,8	350,1	403,7	367,7	316,3	281,8	285,3	258,9	311,6	323,6
14	367,4	238,2	342,1	369,2	382	374,7	345,9	277,4	271,9	273,1	302,4	326,2
15	-	226	363,9	379,4	400,7	373,4	323,7	277,5	271,5	301,4	-	319,8
16	396,3	274,1	395,7	373,9	349,8	352,1	305,8	278,5	267,5	292,9	-	330,7
17	415,6	359,2	353,1	360,1	364	344,5	299,4	279,5	265,4	303,8	-	298,4
18	-	300,9	339,6	355,1	338,8	366,9	329,3	278,1	267,7	301,2	-	273,4
19	-	330,6	349,6	408,7	349	357,8	331,7	286,8	265,9	284,6	-	279,6
20	434,5	317,8	393,1	388,7	321,1	337,7	359,8	278	268,1	276,2	-	271,9
21	-	319,6	356,6	387,3	340,7	326,3	345,1	271,5	265,9	260,7	-	273,8
22	392,6	347,1	339,4	365,4	345	319,6	344,4	268,2	274,6	287,9	287	371,3
23	380,1	341,4	318,4	358,6	349,3	306,4	336,9	273,7	270,7	298,7	265,8	323,3
24	356,7	373,1	306,5	373,5	351,6	-	322,5	273,4	295,5	272,1	343,7	263,5
25	346,5	415,7	346,5	389,2	339	-	330,7	270,1	281,3	284,8	394,7	279,5
26	367,3	471,6	384,9	381,9	346,1	-	345,5	270,4	265,2	279,8	310,3	265,2
27	336,8	372,9	376,6	356,5	347,8	-	367,1	267,9	271,2	277,2	367,1	331,5
28	-	291,5	411,6	366,5	344,7	-	327,8	267	274,1	311,9	374,9	274,8
29	312		396,7	362,8	349,2	-	333,1	275,7	283,2	300,9	368,2	304,5
30	321,1		360,4	363,3	364	-	338,1	288,9	300,5	299,3	356,2	348,1
31	308,7		355,3		343,6		335,5	295,5		302,3		278,4



Rys.1.2.1. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu zmierzonej spektrofotometrem Brewera, Belsk, w 2023 roku.



Rys.1.2.2. Przebieg średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona i Brewera, Belsk 2023.

1.3 Rozkład pionowy ozonu metodą Umkehr

Bonawentura Rajewska-Więch, Janusz W. Krzyściń

Serie pomiarów wykonywanych w świetle rozproszonym pochodzącym z niezachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych Słońca 60° – 90° umożliwiają wyznaczenie rozkładu pionowego ozonu tzw. metodą Umkehr. Wyniki pomiarów z tych serii, po wstępnym opracowaniu w Belsku, wysyłane są do Centrum Danych Ozonowych w Kanadzie, gdzie profile ozonu wyznaczane są z tego rodzaju obserwacji dla całej sieci światowej pomiarów spektrofotometrycznych. Ze względu na wymagania pogodowe (około 3,5 godzin bezchmurnej pogody) liczba serii pomiarów Umkehr zmienia się znacznie z roku na rok.

W 2023 roku wykonano 203 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr.

W tabeli 1.3.1 przedstawiono wyniki pomiarów rozkładu pionowego ozonu (rano - A, po południu - P) w dziesięciu warstwach atmosfery o grubości 5 km. Do wyznaczenia rozkładu pionowego ozonu konieczna jest znajomość całkowitej zawartości ozonu.

Tabela 1.3.1 Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrowskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃ [D]
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
27 01 2023 A	1,42	2,85	6,98	15,89	32,28	53,17	66,11	64,55	46,93	39,98	333,1
06 02 2023 A	1,43	3,11	9,38	23,26	40,78	62,69	80,54	72,27	49,57	40,81	387,1
08 02 2023 P	1,55	3,6	10,37	23,95	44,19	66,79	66,87	40,66	22,22	20,12	298,2
09 02 2023 A	1,54	3,42	8,86	19,83	40,59	58,11	47,64	37,91	36,07	39,44	297,5
09 02 2023 P	1,52	3,49	10,12	23,07	41,33	64,37	68,21	44,43	26,74	25,04	307,7
12 02 2023P	1,43	3,02	8,15	18,47	30,67	40,00	45,82	40,66	28,45	25,93	241,9
16 02 2023 P	1,47	3,24	9,28	20,33	30,64	50,46	88,39	65,32	22,80	7,78	291,9
23 02 2023 A	1,86	4,73	12,29	21,33	35,80	78,29	105,84	53,50	14,57	9,3	332,7
23 02 2023 P	1,6	3,82	11,03	23,34	35,34	56,85	96,95	75,13	30,73	12,89	341,3
28 02 2023 A	1,47	3,16	8,33	17,87	32,37	48,16	48,30	40,46	38,98	42,69	285,9
28 02 2023 P	1,63	3,85	10,61	21,96	36,55	50,73	58,47	52,07	36,56	29,07	295,8
01 03 2023 A	1,35	2,64	6,97	18,63	40,78	57,32	59,41	59,14	50,46	44,16	343,8
01 03 2023 P	1,6	3,72	10,06	21,01	38,59	67,57	91,46	66,70	35,31	25,01	359,1
16 03 2023 A	1,66	4,03	11,56	23,21	36,26	59,85	91,93	82,61	53,14	38,51	403,5
17 03 2023 A	1,52	3,48	10,33	25,13	47,33	66,93	77,91	61,44	36,09	24,27	351,4
18 03 2023 A	1,72	4,4	13,42	26,70	36,01	58,59	97,39	68,13	25,11	9,29	334,4
21 03 2023 P	1,45	3,25	9,85	23,70	42,52	63,92	74,61	56,71	38,24	33,02	347,4
29 03 2023 A	1,59	3,81	11,55	24,68	37,77	60,36	96,83	83,25	49,92	33,96	402,9
29 03 2023 P	1,51	3,56	11,62	27,16	39,59	57,50	92,96	79,71	47,53	32,63	387,7
04 04 2023 A	1,48	3,29	10,11	22,71	36,03	51,95	78,54	77,58	62,66	49,46	395,9
08 04 2023 A	1,43	3,24	10,67	25,24	37,64	54,82	82,84	73,45	48,90	37,74	376,1
10 04 2023 A	1,42	3,2	10,72	25,91	38,79	53,16	73,94	66,19	47,79	40,85	363,1
11 04 2023 A	1,38	3	9,62	25,03	42,95	54,88	69,12	65,69	48,87	39,59	360,1
14 04 2023 A	1,3	2,65	8,5	23,35	42,63	60,77	74,88	61,25	43,30	37,87	356,9
21 04 2023 A	1,36	2,92	9,51	23,97	40,08	61,51	85,88	68,81	44,76	37,04	375,5
21 04 2023 P	1,37	2,99	10,21	24,96	37,15	61,85	97,53	74,64	42,22	30,01	381,1
22 04 2023 A	1,21	2,37	8,95	27,24	42,42	55,96	78,19	66,71	44,35	35,26	361,8
22 04 2023 P	1,41	3,04	9,29	21,46	40,42	69,54	82,61	56,14	36,88	36,59	362,9

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
23 04 2023 A	1,31	2,68	8,82	24,40	43,84	61,56	77,20	59,95	39,33	34,21	352,9
23 04 2023 P	1,33	2,68	7,7	18,49	42,39	70,67	69,42	51,28	43,92	48,77	359,9
24 04 2023 A	1,23	2,53	10,21	30,50	42,79	49,88	76,56	72,44	48,36	35,56	368,9
24 04 2023 P	1,32	2,73	8,87	24,31	45,08	62,77	79,50	67,07	46,45	38,83	376,9
26 04 2023 A	1,33	2,84	10,00	25,95	39,50	57,08	83,43	70,73	46,83	37,68	375,1
27 04 2023 A	1,25	2,44	8,2	24,24	44,90	60,65	70,51	57,03	41,80	39,35	350,9
28 04 2023 A	1,33	2,79	9,32	24,53	42,12	60,01	73,99	58,84	42,21	40,12	356,1
28 04 2023 P	1,4	3,10	10,59	28,86	49,84	60,73	74,28	63,38	40,72	29,70	360,4
29 04 2023 A	1,47	3,24	9,6	24,11	53,24	66,45	58,97	49,82	43,18	45,47	357,8
30 04 2023 P	1,32	2,78	9,74	27,08	46,33	63,24	79,20	61,83	40,14	33,91	364,8
01 05 2023 A	1,22	2,46	9,53	28,99	47,14	61,60	74,27	57,88	38,86	33,76	354,8
01 05 2023 P	1,35	2,94	10,46	27,83	41,96	55,65	81,74	66,28	38,83	28,04	352,8
02 05 2023 A	1,78	4,32	12,36	21,43	40,22	84,92	88,45	42,16	21,39	30,12	349,1
02 05 2023 P	1,24	2,44	8,24	24,85	46,71	61,46	72,61	61,28	45,78	43,10	368,7
04 05 2023 A	1,24	2,44	8,24	24,85	46,71	61,46	72,61	61,28	45,78	43,10	368,7
04 05 2023 P	1,28	2,59	8,78	23,95	42,86	65,30	77,94	56,10	38,16	37,90	355,5
07 05 2023 P	1,36	2,92	9,82	23,91	40,50	66,32	83,91	62,69	43,25	42,19	378,2
08 05 2023 A	1,37	2,95	10,05	25,93	43,52	61,05	80,09	64,96	42,84	36,37	368,6
08 05 2023 P	1,26	2,48	8,10	22,85	45,32	67,22	74,12	54,77	41,02	43,88	362,8
09 05 2023 A	1,32	2,76	9,37	24,54	44,09	67,45	78,99	58,33	41,23	41,62	370,9
09 05 2023 P	1,4	3,06	10,33	26,19	45,05	67,15	87,06	65,07	39,96	33,40	377,7
10 05 2023 A	1,42	3,15	10,61	25,55	41,49	64,05	86,78	67,18	43,80	39,15	385,3
10 05 2023 P	1,28	2,62	9,38	25,78	44,63	71,20	89,57	64,05	40,40	36,23	384,9
11 05 2023 A	1,24	2,54	10,06	30,12	45,34	59,83	86,04	70,32	44,13	34,39	382,6
11 05 2023 P	1,22	2,37	8,13	24,27	46,59	69,08	81,36	64,01	46,61	45,30	390,3
12 05 2023 A	1,4	3,00	9,27	21,12	40,97	67,77	86,65	72,25	51,44	47,00	402,3
12 05 2023 P	1,4	2,99	9,13	21,64	45,61	71,90	84,43	66,46	46,73	44,17	39,5,7
13 05 2023 A	1,46	3,24	10,24	22,18	40,90	71,61	85,05	64,24	46,84	48,63	397,1

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
13 05 2023 P	1,22	2,40	8,65	25,30	44,12	64,75	82,42	68,06	48,57	44,45	390,7
14 05 2023 A	1,2	2,34	8,78	26,26	43,33	63,92	81,40	62,53	44,00	43,57	378,6
21 05 2023 A	1,27	2,58	9,25	26,74	49,04	61,96	56,38	40,03	33,74	43,37	326,5
21 05 2023 P	1,28	2,61	8,90	24,49	43,79	58,60	68,13	54,49	39,81	41,24	344,2
22 05 2023 A	1,4	3,03	9,78	22,18	39,52	63,86	71,65	49,92	35,55	40,91	339,3
22 05 2023 P	1,4	2,7	9,43	25,20	41,78	58,79	75,43	57,72	37,75	36,13	345,9
23 05 2023 A	1,24	2,48	8,90	25,82	43,86	60,40	74,15	55,56	37,28	37,49	347,6
25 05 2023 P	1,31	2,68	8,72	22,23	44,71	67,83	66,54	43,24	32,86	43,20	335,7
26 05 2023 P	1,23	2,39	8,35	24,49	45,11	59,87	64,33	50,91	39,97	45,56	344,0
27 05 2023 A	1,14	2,06	7,79	25,87	43,60	55,84	63,29	49,66	39,24	47,16	338,0
28 05 2023 A	1,18	2,22	7,89	24,90	45,63	55,47	59,22	50,77	40,89	44,73	334,0
28 05 2023 P	1,14	2,06	7,79	25,43	42,48	59,24	73,81	55,37	37,47	38,61	343,5
29 05 2023 A	1,17	2,17	7,85	24,99	44,31	55,91	64,06	53,60	41,17	44,34	340,6
30 05 2023 P	1,28	2,61	9,01	23,65	44,00	64,18	72,40	52,92	39,33	40,02	350,0
31 05 2023 A	1,29	2,68	9,55	25,13	43,98	61,85	70,39	50,24	35,42	35,01	335,2
31 05 2023 P	1,31	2,72	9,63	25,21	45,78	66,35	73,02	49,12	33,49	33,76	340
01 06 2023 A	1,10	2,42	8,38	24,46	44,77	59,50	64,50	48,91	37,40	39,54	331,2
01 05 2023 P	1,09	2,39	8,25	24,39	45,71	63,35	71,01	51,70	36,23	35,54	339,4
02 06 2023 A	1,11	2,43	8,25	22,70	38,28	58,08	83,92	66,13	40,46	29,06	348,9
02 06 2023 P	1,07	2,28	7,48	21,71	42,69	61,02	71,15	57,31	44,35	44,76	354,3
03 06 2023 A	1,16	2,64	8,70	22,33	40,76	60,14	69,46	52,49	38,20	38,48	334,4
03 06 2023 P	1,08	2,35	8,14	23,91	44,63	65,60	74,83	51,93	34,16	32,64	338,7
04 06 2023 A	1,17	2,68	8,75	21,67	40,18	63,65	72,10	50,56	36,24	39,74	337,2
04 06 2023 P	1,02	2,06	7,24	24,08	44,55	56,54	64,84	55,13	44,66	45,91	346,5
05 06 2023 A	1,20	2,85	9,45	23,21	40,00	59,55	71,15	52,67	36,37	35,95	332,3
05 06 2023 P	1,12	2,50	8,33	22,95	44,04	61,50	65,51	50,37	39,93	43,93	340,8
06 06 2023 A	1,18	2,75	9,00	21,56	37,48	62,23	76,06	52,56	34,17	34,14	330,9
06 06 2023 P	1,09	2,34	7,47	22,15	50,32	58,04	41,40	37,57	46,32	66,74	336,7

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
07 06 2023 A	1,08	2,31	7,36	20,39	43,38	64,55	62,33	44,08	37,52	47,86	332,2
08 06 2023 A	1,24	2,95	9,49	21,93	39,64	62,98	72,17	51,79	36,16	37,67	336,2
08 06 2023 P	1,15	2,62	8,94	23,54	41,00	62,81	76,53	55,35	36,55	34,66	342,8
09 06 2023 A	1,09	2,34	7,18	18,12	37,99	60,48	63,33	48,52	42,54	53,76	337,2
10 06 2023 A	1,46	3,93	13,59	31,42	46,70	55,08	58,92	49,17	39,98	45,10	346,5
11 06 2023 P	1,11	2,41	7,73	20,52	39,43	60,62	75,16	61,67	46,54	46,43	362,1
12 06 2023 A	1,13	2,52	8,62	23,20	39,12	57,81	76,02	60,45	42,21	40,28	351,3
12 06 2023 P	1,09	2,34	7,48	20,61	41,33	59,77	71,72	62,22	49,73	51,49	368,7
15 06 2023 P	1,14	2,55	8,48	22,94	42,84	61,95	73,97	59,19	43,63	44,51	361,6
16 06 2023 A	1,24	2,98	9,60	21,50	36,61	64,05	78,34	54,21	35,79	37,99	342,6
19 06 2023 A	1,15	2,63	9,25	25,10	39,73	53,01	73,44	65,79	48,99	47,82	367,4
19 06 2023 P	1,07	2,30	7,98	23,83	41,75	56,32	68,06	53,80	38,13	38,43	331,5
20 06 2023 P	1,07	2,29	8,07	25,01	44,58	56,42	64,78	51,45	36,43	36,12	325,8
22 06 2023 P	1,12	2,49	8,54	24,50	45,24	58,80	59,15	42,52	30,98	36,26	309,7
03 07 2023 P	1,21	2,86	9,92	25,79	41,09	56,89	73,05	56,47	34,83	31,04	331,9
07 07 2023 P	1,12	2,47	8,33	23,46	44,10	62,84	65,86	46,95	32,69	39,34	327,4
08 07 2023 P	1,13	2,51	8,49	24,17	46,09	62,97	62,63	44,47	31,78	39,84	324,5
09 07 2023 P	1,19	2,76	9,23	23,79	41,45	59,64	68,10	49,71	32,39	35,48	323,7
11 07 2023 P	1,12	2,48	8,57	23,95	41,34	59,69	68,03	47,86	29,99	32,49	314,9
12 07 2023 A	1,16	2,62	8,49	21,88	42,03	63,93	65,49	42,91	27,66	34,22	310,3
15 07 2023 A	1,38	3,49	11,45	25,50	39,28	56,70	68,36	49,46	29,33	29,16	313,2
15 07 2023 P	1,14	2,55	8,54	23,41	43,65	60,85	61,22	43,80	31,06	40,37	317,0
16 07 2023 A	1,22	2,88	9,52	23,93	42,47	59,40	59,89	40,72	26,98	34,76	301,8
18 07 2023 P	1,31	3,23	10,53	23,26	37,05	61,19	73,20	49,74	30,18	36,27	326,2
19 07 2023 A	1,17	2,65	8,71	23,77	47,52	64,52	62,00	46,17	33,69	44,36	335,3
19 07 2023 P	1,15	2,56	8,29	21,27	37,94	54,84	62,36	51,20	38,92	52,42	332,6
21 07 2023 P	1,24	2,92	9,48	22,23	38,24	62,58	74,45	53,91	34,45	41,57	341,5
02 08 2023 A	1,12	2,37	7,31	19,83	42,31	61,72	64,74	52,59	37,94	54,17	346,0

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
09 08 2023 A	1,51	4,03	12,77	24,34	31,41	49,32	68,55	52,85	30,41	39,21	315,1
10 08 2023 A	1,30	3,14	9,60	20,27	37,88	66,16	67,98	43,40	25,86	40,70	317,5
11 08 2023 A	1,30	3,17	10,60	25,68	41,97	54,34	59,22	46,03	27,88	35,77	305,8
11 08 2023 P	1,12	2,40	8,28	24,13	43,43	54,27	51,42	40,26	28,72	46,34	301,8
12 08 2023 A	1,19	2,68	8,65	22,99	44,67	57,47	49,99	35,18	23,51	37,66	284,5
12 08 2023 P	1,15	2,54	8,57	23,76	42,46	53,05	49,23	36,17	23,83	36,52	277,6
13 08 2023 A	1,15	2,50	8,04	22,66	46,14	53,60	34,43	24,12	23,44	54,12	273,6
14 08 2023 P	1,18	2,63	8,09	20,16	40,98	55,42	42,86	29,35	23,46	47,68	274,1
15 08 2023 A	1,25	2,91	9,25	22,08	40,27	55,22	49,41	32,86	20,86	35,00	269,6
15 08 2023 P	1,20	2,76	9,42	24,75	41,98	53,22	51,62	36,67	21,91	31,66	274,9
16 08 2023 A	1,25	2,92	9,36	22,87	42,75	56,09	45,13	30,08	21,57	40,91	274,3
16 08 2023 P	1,29	3,13	10,27	23,68	34,94	42,19	52,57	46,64	27,79	32,83	274,5
18 08 2023 A	1,56	4,33	14,51	28,60	32,92	38,48	51,30	42,30	23,80	31,89	269,8
19 08 2023 A	1,45	3,84	12,59	25,96	36,17	48,67	53,07	38,10	22,37	35,17	278,1
20 08 2023 A	1,25	2,97	9,81	24,70	43,76	54,98	47,74	32,86	20,88	34,50	273,8
20 08 2023 P	1,28	3,18	11,06	26,14	38,44	48,17	50,88	38,63	23,51	35,43	277,1
24 08 2023 A	1,15	2,57	8,69	23,98	41,30	49,16	47,25	36,81	23,04	34,70	268,8
24 08 2023 P	1,11	2,35	7,90	22,96	39,13	43,02	41,73	38,64	27,54	43,51	268,9
26 08 2023 A	1,31	3,19	9,72	22,09	43,02	56,92	42,86	27,65	19,33	37,46	264,7
27 08 2023 P	1,17	2,65	8,78	24,73	48,75	58,34	40,56	24,84	17,73	36,02	264,6
01 09 2023 A	1,30	3,16	9,86	22,25	39,86	60,25	65,01	46,30	24,47	33,26	305,7
01 09 2023 P	1,12	2,42	8,03	23,99	44,75	49,83	47,83	45,48	32,01	51,76	309,4
02 09 2023 A	1,31	3,24	10,20	21,29	33,17	55,59	70,30	52,09	27,65	38,55	314,1
04 09 2023 A	1,12	2,36	7,52	21,69	41,87	50,01	41,11	31,29	21,16	36,52	255,3
04 09 2023 P	1,21	2,84	9,55	24,46	41,04	50,99	49,16	35,37	18,91	24,61	256,8
05 09 2023 A	1,29	3,14	9,80	22,45	39,76	52,68	45,72	29,93	17,36	29,55	251,7
05 09 2023 P	1,24	2,96	9,35	22,75	42,39	56,37	47,24	29,99	17,44	30,15	360,1
06 09 2023 A	1,24	2,96	9,36	22,89	42,47	55,72	48,39	33,50	20,38	35,00	272,9

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
06 09 2023 P	1,18	2,69	9,02	24,25	43,17	54,20	49,20	35,04	20,43	32,22	271,2
07 09 2023 A	1,20	2,80	9,21	23,89	42,49	53,43	49,32	36,36	21,51	34,05	274,6
07 09 2023 P	1,26	3,05	9,85	23,47	40,98	54,46	49,92	35,06	20,78	34,81	274,3
08 09 2023 A	1,29	3,18	10,11	23,70	42,19	55,61	49,23	33,62	19,56	32,71	271,7
08 09 2023 P	1,18	2,69	8,58	22,37	41,97	53,47	46,52	34,85	22,44	38,91	274,1
09 09 2023 A	1,26	3,04	9,44	21,97	39,20	52,19	49,24	35,62	20,37	32,18	264,7
09 09 2023 P	1,05	2,08	7,04	22,49	39,00	44,16	43,12	38,22	25,46	43,11	267,3
10 09 2023 A	1,18	2,68	8,47	22,07	41,33	52,66	45,16	31,26	18,58	31,36	255,0
10 09 2023 P	1,21	2,84	9,47	24,14	41,02	50,95	47,04	34,37	19,94	31,68	262,8
11 09 2023 A	1,19	2,74	8,67	22,09	40,82	52,53	46,59	33,72	20,46	34,93	264,5
11 09 2023 P	1,27	3,11	9,80	22,30	37,91	51,27	50,04	37,31	22,05	36,55	272,5
12 09 2023 A	1,41	3,83	13,02	29,03	42,89	48,75	44,39	34,68	20,91	33,28	272,6
12 09 2023 P	1,13	2,52	8,76	24,50	41,62	51,08	49,20	38,86	23,63	38,47	280,8
13 09 2023 A	1,24	2,94	9,08	21,84	41,03	53,90	46,59	34,69	22,65	42,24	278,2
13 09 2023 P	1,60	4,47	13,46	22,81	29,39	55,19	76,89	49,49	17,80	14,34	282,9
15 09 2023 A	1,27	3,07	9,19	20,75	40,51	59,33	52,18	32,99	17,83	30,05	367,4
15 09 2023 P	1,24	2,98	9,53	22,73	40,39	55,74	51,12	34,08	18,56	30,48	267,0
16 09 2023 A	1,31	3,29	10,29	22,85	39,02	53,80	50,70	33,97	17,90	28,41	261,5
16 09 2023 P	1,28	3,18	10,00	22,34	37,91	54,05	53,03	35,95	18,87	29,70	266,4
18 09 2023 P	1,14	2,51	7,69	20,22	38,02	49,11	42,48	32,32	21,51	40,40	257,1
20 09 2023 A	1,18	2,78	8,95	23,29	41,36	50,44	44,92	35,35	22,13	37,76	269,3
21 09 2023 A	1,20	3,03	9,12	20,70	37,22	52,65	50,20	34,96	19,17	31,08	259,7
21 09 2023 P	1,26	3,17	10,09	22,86	38,01	55,04	56,53	37,87	18,20	25,36	267,7
22 09 2023 A	1,29	2,56	7,62	20,24	41,18	56,48	50,67	36,00	20,78	34,67	272,2
24 09 2023 P	1,18	3,91	11,45	23,11	44,41	73,75	67,63	36,41	15,27	22,88	299,8
25 09 2023 A	1,26	4,07	12,65	24,63	34,81	50,11	60,52	45,12	21,29	27,43	281,7
25 09 2023 P	1,05	3,46	10,33	22,19	39,54	56,73	52,75	35,77	19,36	31,35	273,3
26 09 2023 P	1,18	3,33	10,32	22,89	39,04	54,94	51,66	34,04	17,53	27,35	262,3

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
27 09 2023 A	1,33	3,42	10,37	22,40	38,27	54,69	52,06	34,63	18,09	28,69	264,1
27 09 2023 P	1,31	3,35	10,29	22,73	38,53	54,21	53,77	37,98	19,81	29,66	271,7
28 09 2023 A	1,37	3,55	10,19	20,71	37,18	55,89	53,40	36,43	19,48	31,13	269,8
28 09 2023 P	1,30	3,32	10,34	23,43	40,02	54,45	51,52	36,21	19,56	30,74	271,3
29 09 2023 A	1,36	3,51	10,21	21,34	38,46	56,56	53,85	37,64	20,53	32,87	277,1
29 09 2023 P	1,38	3,64	10,80	22,88	40,82	56,87	49,75	35,18	21,08	36,64	280,5
01 10 2023 P	1,29	3,20	9,08	18,76	32,78	52,40	60,50	46,32	23,72	33,06	281,5
03 10 2023 A	1,33	3,44	10,06	21,58	37,95	53,66	50,42	34,58	18,18	27,98	259,2
08 10 2023 A	1,43	3,88	10,87	20,12	31,74	52,83	66,22	51,37	24,84	31,89	295,4
08 10 2023 P	1,29	3,24	9,20	18,65	30,41	48,06	61,45	52,87	28,55	40,16	295,3
10 10 2023 A	1,41	3,88	11,25	22,08	35,04	54,36	64,36	47,68	21,83	26,19	287,7
10 10 2023 P	1,33	3,43	9,73	20,32	36,31	53,91	53,25	40,00	22,55	35,56	277,6
14 10 2023 A	1,20	2,90	8,83	22,53	41,35	54,77	50,94	37,67	20,23	29,21	269,7
15 10 2023 A	1,08	2,21	6,15	18,93	41,08	52,87	46,10	43,62	30,61	52,14	298,6
17 10 2023 A	1,28	3,31	10,03	23,41	40,04	53,39	57,65	49,36	26,74	35,62	301,6
17 10 2023 P	1,45	4,12	12,20	23,86	35,52	53,90	69,89	53,83	22,86	22,50	298,6
18 10 2023 A	1,48	4,27	12,40	21,43	25,88	44,62	77,97	61,82	24,09	21,68	294,0
18 10 2023 P	1,37	3,75	11,11	23,54	38,57	55,88	63,50	49,40	23,93	29,35	300,3
19 10 2023 A	1,50	4,35	12,56	21,93	28,22	48,05	73,21	53,31	20,18	19,04	280,7
21 10 2023 P	1,50	4,29	12,02	22,67	35,60	52,14	54,69	38,53	18,08	22,70	261,4
24 10 2023 A	1,35	3,54	9,57	20,15	39,27	62,48	56,96	33,80	16,12	24,01	267,0
24 10 2023 P	1,55	4,64	13,70	26,10	35,77	43,07	48,90	43,90	23,23	28,15	268,8
30 10 2023 A	1,27	3,20	9,22	22,25	40,64	51,37	47,47	44,44	28,94	41,81	292,9
30 10 2023 P	1,34	3,44	8,77	17,59	33,95	53,68	53,69	46,43	29,62	44,30	295,6
01 11 2023 A	1,28	3,21	8,5	17,9	31,23	52,43	78,06	71,45	35,12	37,26	337,0
02 11 2023 A	1,51	4,3	11,47	21,48	35,88	58,37	67,12	50,53	24,46	28,98	304,2
09 11 2023 P	1,43	3,98	11,2	24,26	42,87	60,33	59,63	45,13	22,29	23,3	293,1
13 11 2023 P	1,34	3,41	8,18	15,78	31,3	54,97	59,04	51,54	32,7	45,06	306,4

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
22 11 2023 P	1,52	4,14	10,19	18,08	29,73	52,0	65,63	51,02	25,11	26,25	283,4
04 12 2023 P	1,43	3,53	8,49	16,56	31,05	56,17	70,99	57,78	30,44	28,82	305,2
05 12 2023 A	1,6	4,28	10,41	18,14	30,22	61,6	79,18	48,22	18,85	17,8	289,0
05 12 2023 P	1,43	3,54	8,73	17,45	31,32	51,85	64,69	55,92	30,93	29,48	295,4
28 12 2023 A	1,34	2,84	6,23	13,07	29,54	56,67	59,79	43,34	28,04	27,96	268,9
31 12 2023 A	1,76	4,73	11,61	20,03	29,82	54,58	72,42	47,05	21,8	20,3	283,5
31 12 2023 P	1,34	3,01	7,95	19,51	35,77	47,89	51,68	50,34	34,08	29,27	280,8

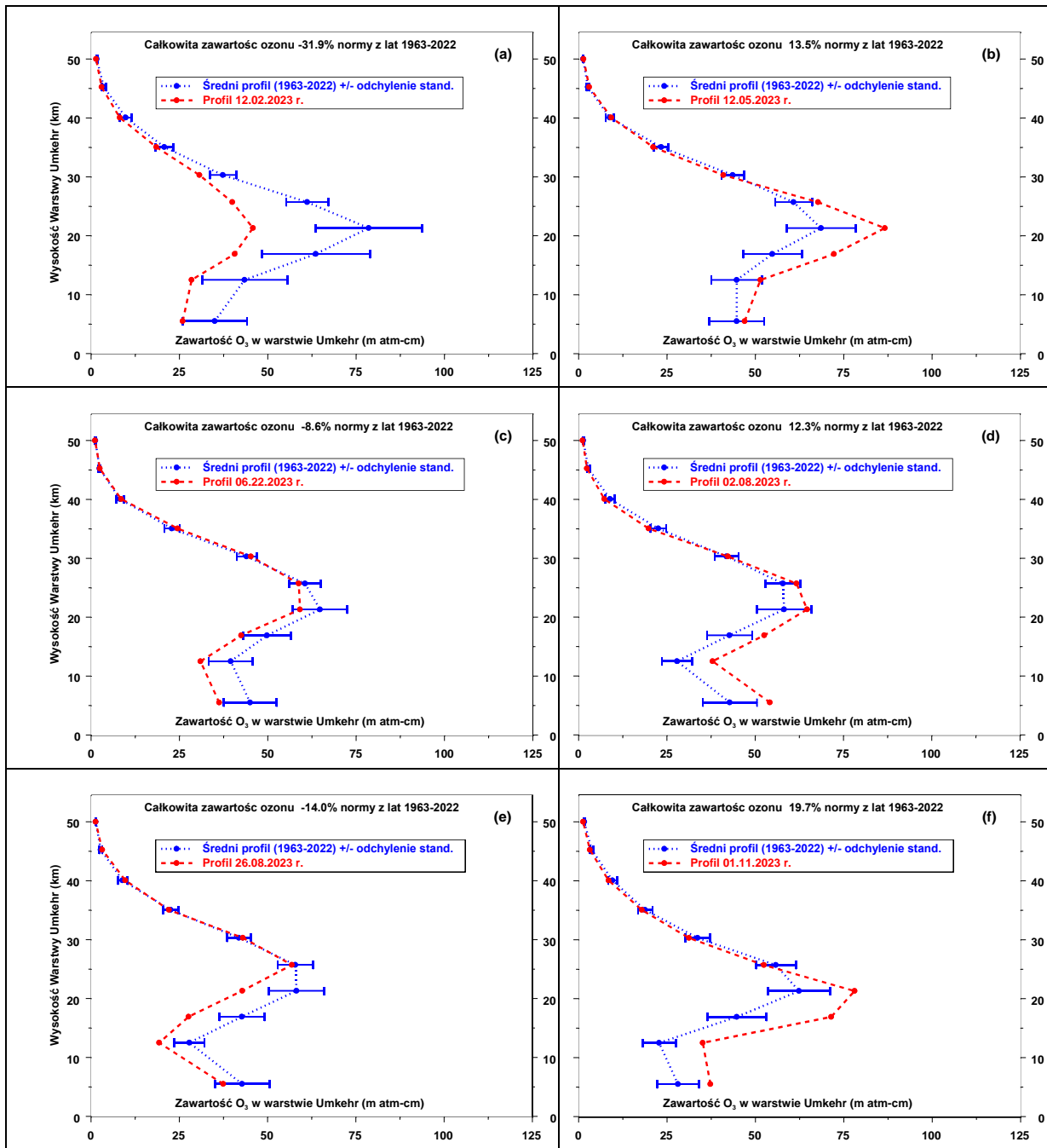
W Tabeli 1.3.2 przedstawiono średnie miesięczne zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrskich, gdzie AVE – średnia arytmetyczna, SD – odchylenie standardowe, n – ilość obserwacji Umkehr w miesiącu, O₃ – średnia całkowitej zawartości ozonu z dni kiedy wykonywano pomiar Umkehr.

Na Rys.1,3 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2022 (linia niebieska) są najbardziej spektakularne w dolnej stratosferze i w troposferze, Niestety, w metodzie Umkehr zawartości ozonu wyznaczone w najniższych warstwach są najmniej wiarygodne, Na Rys.1.3 można zauważyć znacznie większą zmienność średnich zawartości ozonu w dolnej stratosferze w okresie zimowo-wiosennym w porównaniu do lata. Ponadto profile w poszczególnych dniach mogą znacznie odbiegać od średnich wieloletnich, zarówno co do wartości w poszczególnych warstwach jak i wysokości wystąpienia maksimum ozonu,

Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi, Dane ozonowe ze stacji dysponującymi długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie cenione w analizach statystycznych, mających na celu poznanie zmian zawartości ozonu na różnych wysokościach w atmosferze, W Europie są tylko trzy stacje wykonujące spektrofotometryczne pomiary rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, w których tego typu pomiary wykonywane są ponad dwadzieścia lat, Należy do nich Belsk z ponad 50-letnią zrewaloryzowaną serią pomiarową. Wyniki pomiarów rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr w Belsku są szeroko stosowane w najpoważniejszych analizach statystycznych i metodycznych.

Tabela 1.3.2 Średnie miesięczne zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich w 2023 roku

Miesiąc	Średnia zawartość ozonu w warstwie [D]											O ₃ [D]	
	2022	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		n
I	AVE	1,42	2,85	6,98	15,9	32,3	53,2	66,1	64,6	46,9	40,0	1	333,1
	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-
II	AVE	1,55	3,54	9,84	21,3	36,8	57,6	70,7	52,2	30,7	25,3	10	308,0
	SD	0,13	0,51	1,29	2,1	4,8	11,0	27,4	20,6	14,4	11,3		38,6
III	AVE	1,55	3,61	10,67	23,8	39,9	61,5	85,3	69,7	42,6	30,1	8	366,3
	SD	0,12	0,53	1,89	2,9	3,7	4,1	13,4	10,8	9,8	10,6		27,6
IV	AVE	1,35	2,87	9,51	24,9	42,5	59,9	77,2	64,4	44,9	38,3	19	366,1
	SD	0,07	0,28	0,85	2,6	4,3	5,6	7,9	7,7	5,5	5,3		11,3
V	AVE	1,30	2,68	9,19	24,8	44,0	63,9	76,1	57,7	40,4	40,2	34	361,1
	SD	0,12	0,42	0,99	2,0	2,2	5,9	8,8	8,2	5,6	5,1		21,6
VI	AVE	1,14	2,55	8,53	23,0	42,0	60,1	69,2	53,4	39,8	41,7	26	341,8
	SD	0,08	0,36	1,25	2,4	3,3	3,1	8,3	6,7	4,9	7,9		13,4
VII	AVE	1,20	2,77	8,20	23,6	41,7	60,5	66,5	48,0	31,8	37,8	13	323,1
	SD	0,08	0,31	0,97	1,3	3,1	3,0	4,9	4,5	3,2	6,2		11,2
VIII	AVE	1,25	2,96	9,68	23,6	40,7	52,8	50,6	37,4	24,5	39,1	21	286,3
	SD	0,13	0,54	1,80	2,1	4,3	6,5	8,7	8,1	4,4	6,6		24,3
IX	AVE	1,27	3,09	9,69	22,7	39,9	54,0	51,3	36,4	20,5	32,8	42	272,2
	SD	0,10	0,47	1,33	1,5	2,8	4,3	7,3	4,7	2,9	6,1		13,8
X	AVE	1,36	3,62	10,38	21,4	35,6	52,3	58,7	46,1	23,6	31,4	18	284,8
	SD	0,11	0,58	1,77	2,1	4,5	4,3	9,1	7,6	4,1	8,7		13,9
XI	AVE	1,42	3,81	9,91	19,5	34,2	55,6	65,9	53,9	27,9	32,2	5	304,8
	SD	0,10	0,47	1,51	3,3	5,4	3,7	7,7	10,1	5,6	8,9		20,2
XII	AVE	1,48	3,66	8,90	17,5	31,3	54,8	66,5	50,4	27,4	25,6	6	287,1
	SD	0,17	0,72	1,89	2,5	2,3	4,6	9,8	5,5	5,8	5,2		12,5



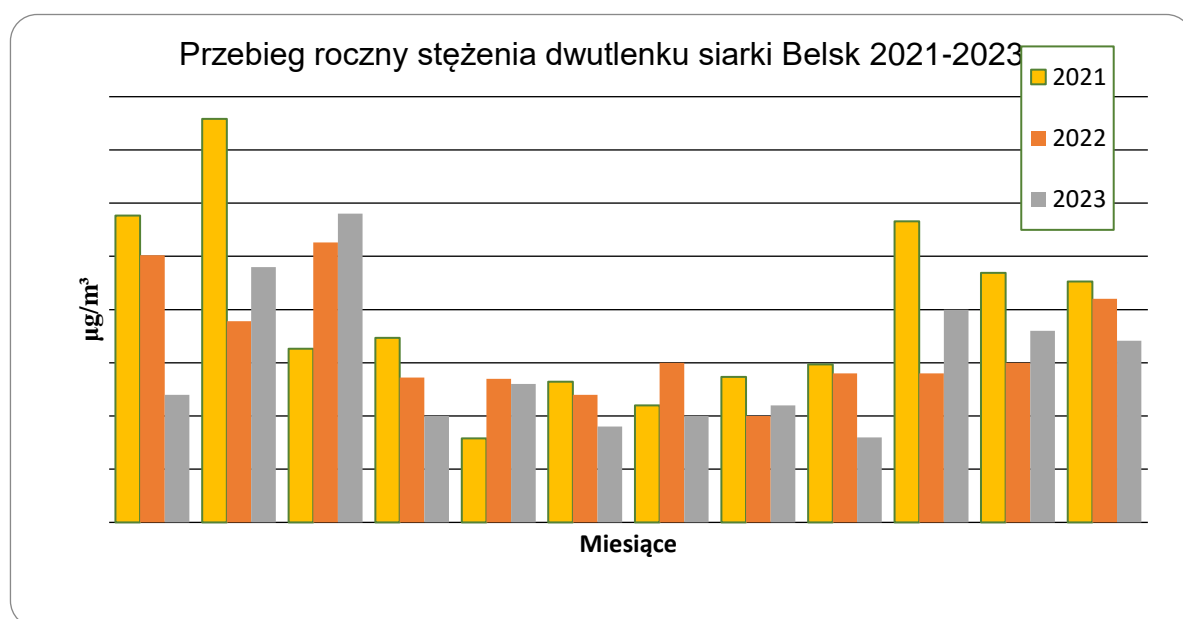
Rys.1.3. Pionowy profil O_3 dla wybranych dni w 2023 r, wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona z zastosowaniem algorytmu obliczeniowego *UMK04*.

2. Zawartość dwutlenku siarki, ozonu dwutlenku azotu, tlenku węgla i pyłu PM10 przy powierzchni Ziemi w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN Belsku w 2023 r.

Janusz Jarosławski

2.1 Dwutlenek siarki

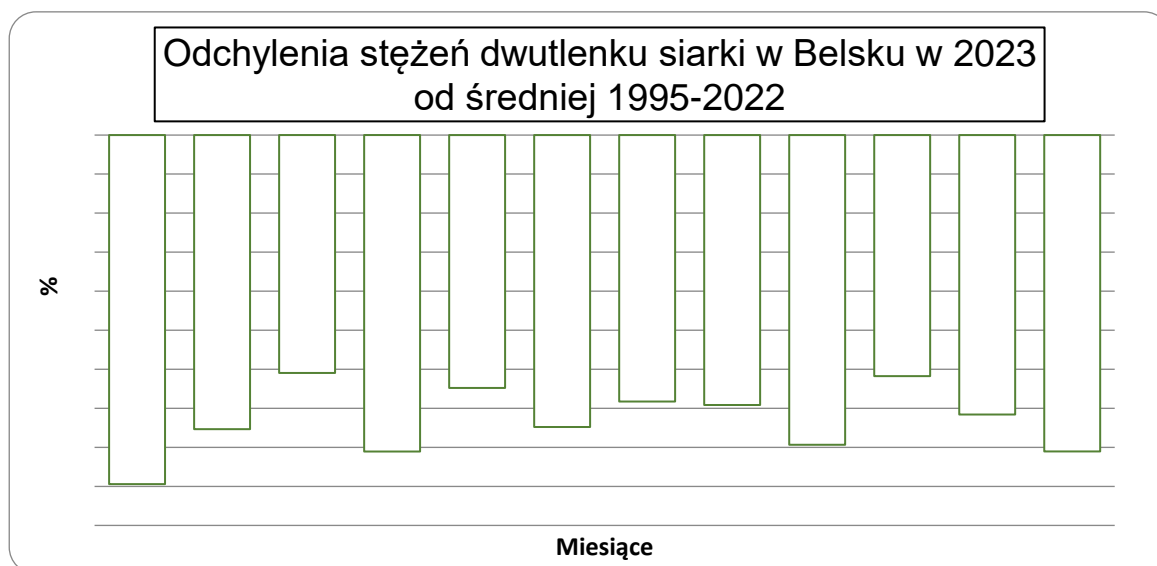
Rok 2023 był kolejnym rokiem systematycznych pomiarów stężeń dwutlenku siarki na stacji w Belsku. Pomiar wykonywany był analizatorem firmy Horiba APSA 370 działającym w oparciu o zjawisko fluorescencji SO₂ w promieniowaniu UV. Wyniki ciągłych pomiarów w postaci średnich 60-min obejmują okres od stycznia do grudnia.



Rys.2.1.1. Przebieg roczny stężenia SO₂ przy powierzchni Ziemi, Belsk 2023 na tle lat 2021-2022.

Przebieg roczny średnich miesięcznych stężeń SO₂ charakteryzował się występowaniem bardzo niskich stężeń w okresie całego roku, ze średnimi miesięcznymi oscylującymi pomiędzy 0,8 a 2,9 µg/m³ (Rys. 2.1.1.). Maksymalne średnie miesięczne stężenie SO₂ w roku 2023 zostało zmierzone w marcu (2,9 µg/m³) i było wyższe od maksymalnego średniego miesięcznego stężenia SO₂ zmierzonego w roku 2022 o 0,3 µg/m³ (w marcu). W roku 2023 średnie miesięczne stężenia SO₂ były niższe od średnich wieloletnich zmierzonych w okresie 1995-2022 od około 90% w miesiącach zimowych do około 60% - 80% w pozostałych miesiącach (Rys. 2.1.2). Najniższe średniomiesięczne stężenie SO₂ w ciągu roku zmierzono we wrześniu (średnia miesięczna – 0,8µg/m³). Było ono niższe o 0,2 µg/m³ od najniższej wartości średniomiesięcznej stężeń SO₂ zmierzonej w sierpniu w roku 2022 i było to jedno

z najniższych średniomiesięcznych stężeń SO₂ w całej dotychczasowej historii pomiarów tego zanieczyszczenia (od 1995). W roku 2023 kolejny raz obserwowano kontynuację zmniejszenia amplitudy przebiegu sezonowego SO₂ ze szczególnie niskimi stężeniami od marca do września, przy również bardzo niskich stężeniach w pozostałych miesiącach roku (np. w styczniu).



Rys.2.1.2 Odchylenia średnich miesięcznych stężeń SO₂ w 2023 roku od średniej z lat 1995-2022 w Belsku.

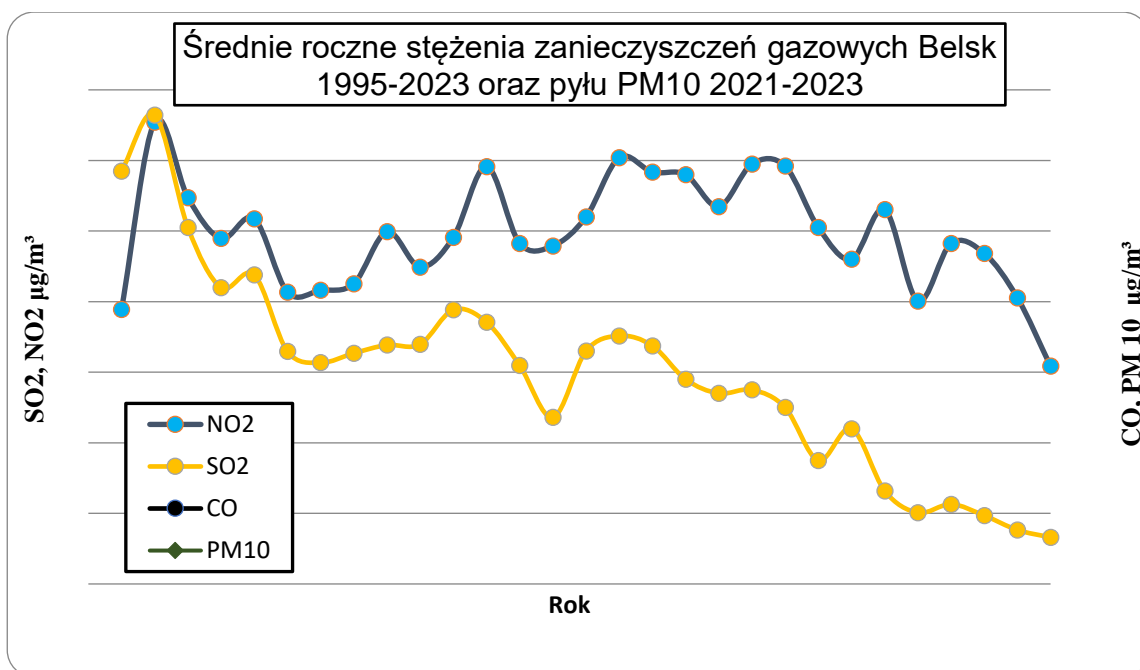
Duże względne odchylenia procentowe od wartości średnich spowodowane są bardzo niskimi wartościami bezwzględnymi stężenia SO₂ – niewielkie zmiany wartości stężeń powodują duże zmiany procentowe względnych odchyżeń. Amplituda roczna zmian poziomów stężeń SO₂ pomiędzy zimą a latem była podobna jak w ostatnich latach wynosiła około 1,8 µg/m³. Średnia roczna wartość stężenia SO₂ w roku 2023 była niższa o 0,4 µg/m³ od zmierzonej w roku 2021 i była najniższa w całej serii pomiarowej z lat 1995-2023; wynosiła 1,51 µg/m³ (Rys. 2.1.3). Średnie roczne stężenia SO₂ od roku 1995 przedstawia Tabela 2.1.1.

Tabela 2.1.1 Średnie roczne koncentracji SO₂ w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku (µg/m³).

Rok	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
SO ₂	11,7	13,6	10,1	8,4	8,8	6,6	6,3	6,5	6,8	6,8	7,8	7,4	6,2	4,7	6,6

Rok	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
SO2	7,0	6,8	5,8	5,4	5,5	5,0	3,5	4,4	2,4	2,0	2,3	1,94	1,53	1,51	

Przebieg średniorocznych stężeń SO_2 od roku 1995 przedstawia Rys.2.1.3. Maksymalne wartości chwilowe (śr. 60-min) stężeń dwutlenku siarki w poszczególnych miesiącach roku 2023 charakteryzowały się jeszcze mniejszą zmiennością, niż w latach poprzednich oraz znacznie mniejszymi wartościami maksymalnymi w ciągu całego roku od analogicznych wartości mierzonych poprzednich latach. Najwyższe chwilowe stężenie SO_2 zmierzone w roku 2023 wyniosło $44\mu\text{g}/\text{m}^3$ (nietypowo w czerwcu) i było o $23\mu\text{g}/\text{m}^3$ wyższe niż maksymalne stężenie SO_2 zmierzone w roku 2022. Wartości chwilowe (średnie 60-min) stężeń SO_2 przedstawiają rysunki dołączone na końcu raportu. Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi SO_2 przedstawia Tabela 2.1.2.



Rys.2.1.3. Średnie roczne stężenie zanieczyszczeń gazowych CO , SO_2 i NO_2 Belsk 1995-2023 oraz pyłu zawieszonego PM_{10} 2021-2023.

Tabela 2.1.2 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji SO_2 w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2023 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

Śr.	1,2	2,4	2,9	1,0	1,3	0,9	1,0	1,1	0,8	2,0	1,8	1,7
max.	7	10	30	10	7	44	12	18	7	8	16	15

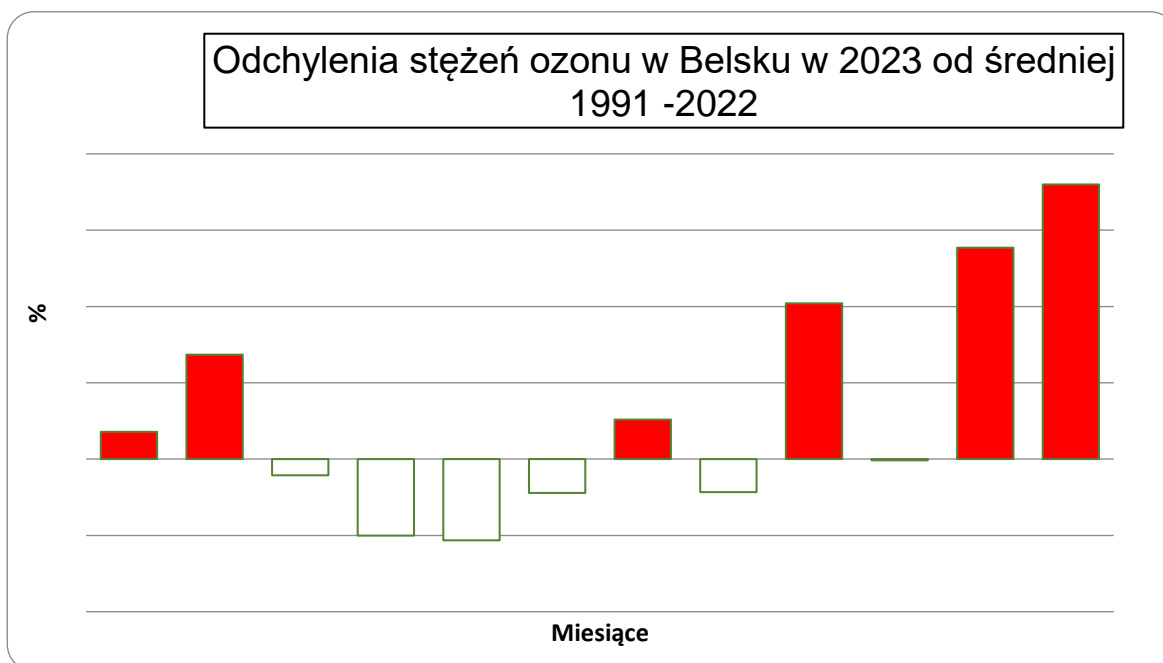
2.2 Ozon przyziemny i dwutlenek azotu

Rok 2023 był kolejnym rokiem pomiarów koncentracji ozonu oraz dwutlenku azotu na stacji w Belsku. Pomiary wykonywane były analizatorami firmy Thermo 49i (ozon) oraz firmy Horiba model APNA 370 (tlenki azotu). Analizator ozonu był w ciągu roku wzorcowany przy pomocy kalibratora posiadającego atest zgodności z czeskim krajowym wzorcem referencyjnym zgodnym z NIST znajdującym się w Pradze (Czechy). Wyniki pomiarów koncentracji ozonu pozwalają stwierdzić, że w roku 2023 przebieg cyklu rocznego ozonu był bardzo zbliżony do średniego przebiegu rocznego z ostatnich kilkunastu lat z wyjątkiem relatywnie dużego wzrostu stężeń we wrześniu. Maksimum roczne średnich miesięcznych wystąpiło w lipcu (średnia miesięczna wartość stężeń ozonu $69,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Było o $6,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niższe od maksimum z roku 2022. Odchylenia średnich miesięcznych stężeń ozonu od wartości średnich z okresu 1991-2022 były dodatnie dla sześciu miesięcy (występowały głównie w zimie – w grudniu do +36%) i ujemne w pozostałym okresie, najbardziej w kwietniu i w maju (-10%). Przebieg roczny stężenia ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery (średnie miesięczne) dla ostatnich trzech lat przedstawia Rys. 2.2.1, a odchylenia od średnich miesięcznych z lat 1991-2022 przedstawia Rys. 2.2.2.



Rys. 2.2.1 Przebieg roczny stężenia ozonu przy powierzchni Ziemi, Belsk 2023 na tle lat 2021-2022.

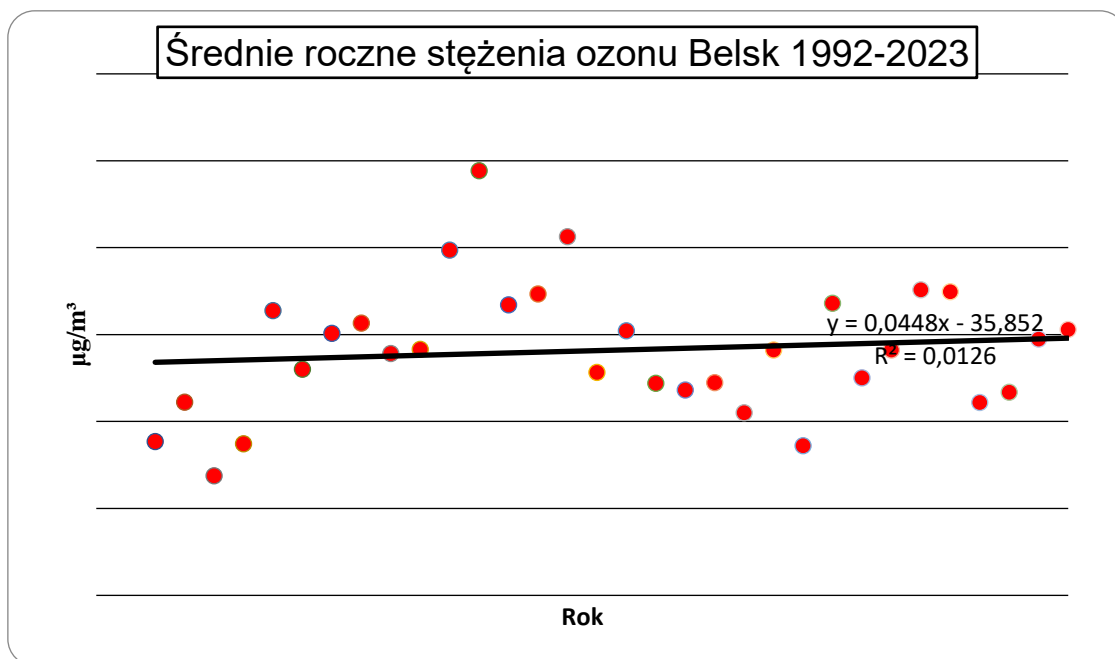
W roku 2023 maksymalne wartości chwilowe stężeń ozonu były porównywalne z obserwowanymi w ostatnich latach, szczególnie w okresie letnim. Maksymalne stężenie chwilowe ozonu (śr. 60-min) wyniosło $149 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i zostało zmierzone nietypowo we wrześniu. Od czerwca do września wartości maksymalne stężenia ozonu były wyrównane i zawierały się w granicach od 131 do $149 \mu\text{g}/\text{m}^3$. W roku 2023 zwraca uwagę płaskie maksimum stężeń średniomiesięcznych rozszerzone na sześć miesięcy, jeszcze więcej niż w poprzednich latach. Świadczyłyby to o m.in. dłużej trwającym wiosennym transporcie ozonu z wyższych warstw atmosfery przeważającym względem lokalnej produkcji fotochemicznej, przynajmniej przez pierwsze dwa miesiące trwania tego maksimum. Wartości chwilowe stężeń ozonu przedstawiają rysunki dołączone na końcu rozdziału.



Rys. 2.2.2 Odchylenia średnich miesięcznych stężeń ozonu przyziemnego w roku 2023 od średniej z lat 1991-2022 w Belsku.

Średnie roczne stężenie ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2023 wyniosło $55,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i było wyższe niż w roku 2022 ($52,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz zbliżone do średnich wartości w całej serii obserwowanych w latach 1991-2022. Można stwierdzić, że obserwowane w 2023 roku, zwłaszcza w okresie letnim poziomy stężenie ozonu były porównywalne do tych, jakie mierzono w Belsku w końcu lat 90-tych. Rok 2023 był rokiem średnich stężeń ozonu w całym regionie, wskaźnik AOT40 (suma wartości przekroczeń stężeń ozonu ponad 40 ppb) wyniósł 21727 był wyższy od tego z roku 2021 o 2282, z 19 przekroczeniami wartości średnich

8-godzinnych stężeń. Biorąc pod uwagę wyniki pomiarów z ostatnich trzydziestu lat można stwierdzić, że obserwujemy kontynuację stabilizacji długookresowego trendu stężeń ozonu. Przebieg średnich rocznych stężeń ozonu w latach 1992-2023 przedstawia Rys.2.2.3. Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi ozonu w roku 2023 przedstawia Tabela 2.2.1.



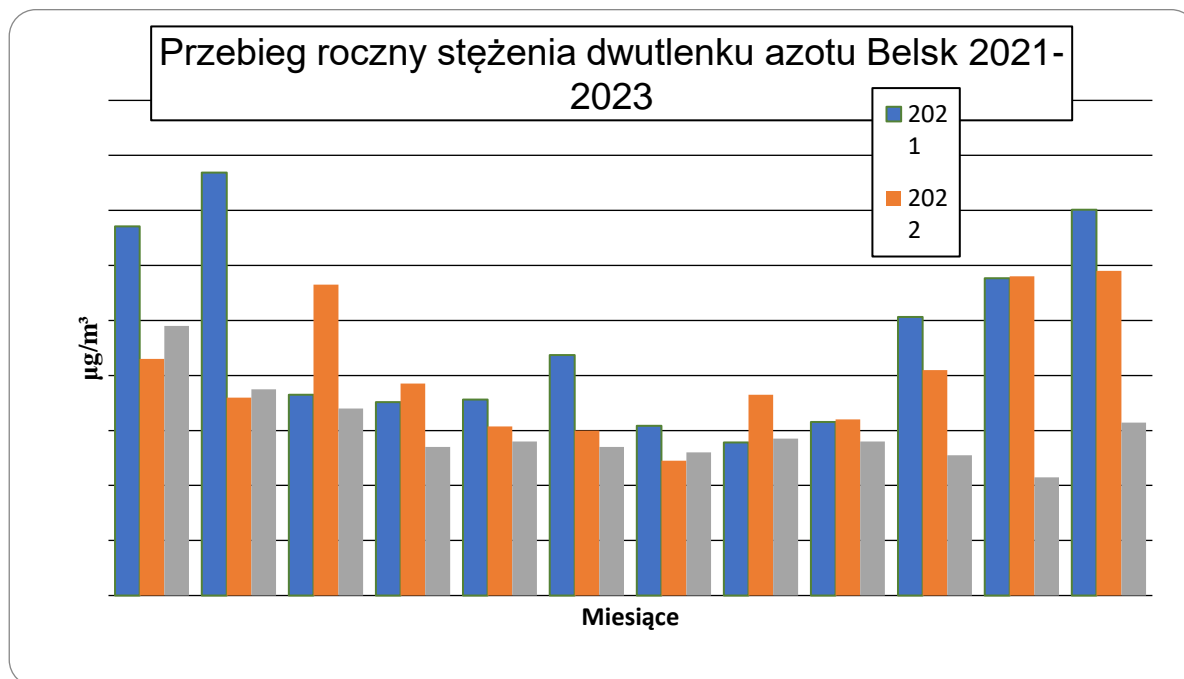
Rys. 2.2.3 Średnie roczne stężenia ozonu przy powierzchni Ziemi, Belsk 1992-2023

Tabela 2.2.1 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2023 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	38,7	58,2	64,8	66,6	66,9	68,1	69,6	61,4	59,6	36,7	35,3	37,6
Max.	71	81	108	117	113	131	131	134	149	88	76	75

Stężenie dwutlenku azotu w roku 2023 w Belsku osiągało wartości znacznie niższe w porównaniu z obserwowanymi w ostatnich latach. Wartości były najniższe w całej serii pomiarowej. Trend spadkowy stężeń obserwowany w ciągu ostatnich 11 lat jest kontynuowany. Przebieg sezonowy stężeń dwutlenku azotu w roku 2022 był bardzo nietypowy ze względu na wystąpienie najniższych stężeń w sezonie zimowym na końcu roku. W okresie letnim stężenia były również niskie w stosunku do średnich – wystąpił natomiast tak jak zwykle wzrost stężeń względem poziomów letnich w okresie zimowym na początku roku (w styczniu). Z wyjątkiem stycznia średnie miesięczne zawierały się między 4 a 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

w styczniu wyniosły $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Rys.2.2.4). Odchylenia średniomiesięcznych stężeń NO_2 od średniej z lat 1995-2022 w roku 2023 były dla ujemne dla wszystkich miesięcy, największe ujemne odchyłki wystąpiły w miesiącach zimowych zwłaszcza na końcu roku do -70% (Rys. 2.2.5).

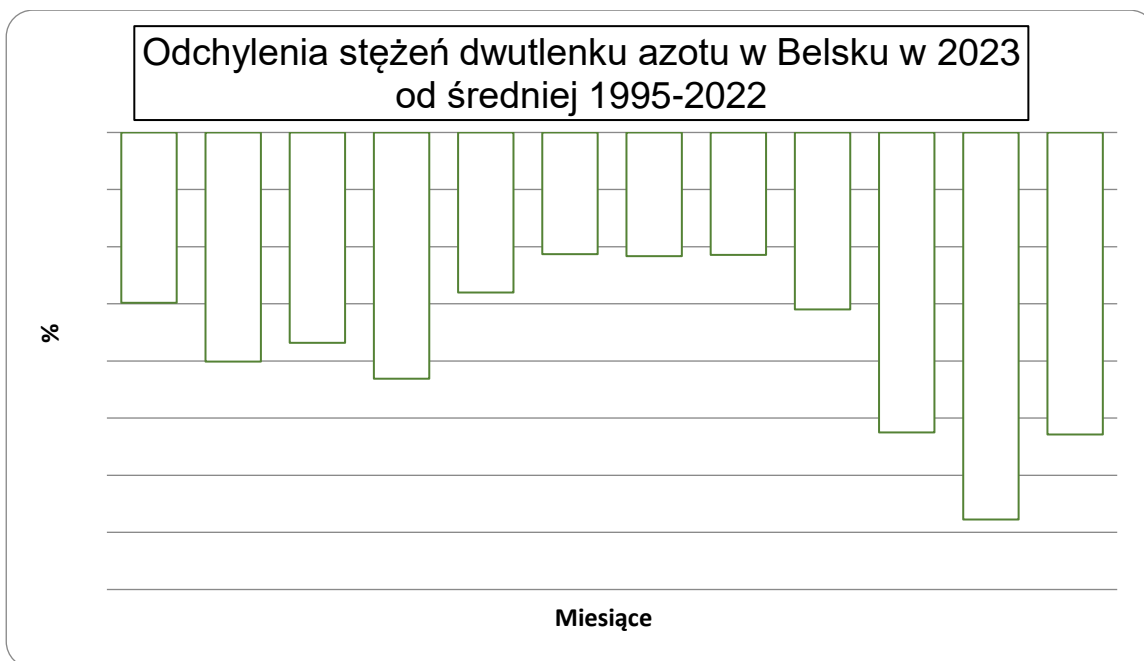


Rys. 2.2.4 Przebieg roczny stężenia NO_2 przy powierzchni Ziemi, Belsk 2023 na tle latm2021-2022.

Najwyższe w roku 2023 średnie miesięczne stężenie dwutlenku azotu zmierzono w grudniu ($9,8\mu\text{g}/\text{m}^3$ – niższe niż w r. 2022) a najniższe w listopadzie ($4,3\mu\text{g}/\text{m}^3$ – niższe niż w roku 2022). Przebieg średnich miesięcznych stężeń dwutlenku azotu w latach 2021-2023 przedstawia Rys. 2.2.4.

Średnie roczne stężenie dwutlenku azotu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2023 wyniosło $6,2\mu\text{g}/\text{m}^3$ i było niższe od tego w roku 2022 o $1,9\mu\text{g}/\text{m}^3$. Obserwowany spadek poziomu średniorocznych stężeń NO_2 wystąpił równolegle z obserwowanym spadkiem stężeń SO_2 i CO w roku 2023.

Wartości chwilowe stężeń dwutlenku azotu przedstawiają rysunki dołączone na końcu rozdziału. Maksymalne wartości chwilowe dwutlenku azotu były przeciętne w stosunku do wartości zaobserwowanych w ubiegłych latach. Wartość maksymalna – śr. 60-min wyniosła $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ (w lutym) była niższa o $19\mu\text{g}/\text{m}^3$ od tej zmierzonej w roku 2022 (w marcu). Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi dwutlenku azotu w roku 2023 przedstawia Tabela 2.2.2.



Rys 2.2.5 Odchylenia średnich miesięcznych stężeń NO₂ w roku 2023 od średniej z lat 1991-2022 w Belsku.

Tabela 2.2.2 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji NO₂ w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2023 (µg/m³).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	9,8	7,5	6,8	5,4	5,6	5,4	5,2	5,7	5,6	5,1	4,3	6,3
Max.	33	45	33	25	35	27	23	24	23	24	19	21

2.3. Tlenek Węgla

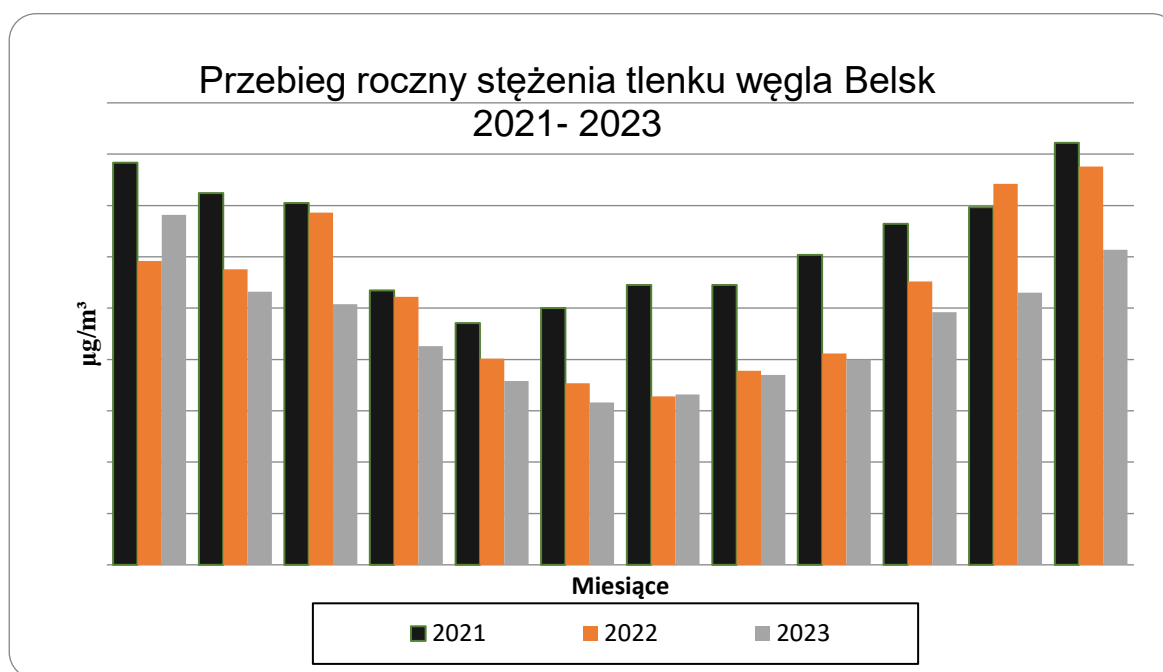
W roku 2023 kontynuowano w Belsku pomiary stężeń tlenu węgla w przyziemnej warstwie atmosfery. Pomiar wykonywany był przyrządem firmy Horiba model APMA370. Analizator działa w oparciu o zjawisko absorpcji promieniowania podczerwonego przez tlenek węgla. Z powodu specyficznych warunków (stacja pozamiejska) stężenia tlenu węgla w rejonie Belska osiągają często niskie wartości szczególnie w okresie letnim (wieloletnia średnia miesięczna w okresie od maja do sierpnia jest na poziomie znacznie poniżej 200 µg/m³ i maleje, zwłaszcza w ostatnich latach). Próg wykrywalności nowego analizatora jest szacowany na ok. 25 µg/m³ (dla poprzedniego analizatora wynosił ok. 100 µg/m³), co skutkuje większą dokładnością danych uzyskiwanych w okresie letnim, kiedy stężenia tlenu węgla w rejonie Belska okresowo zbliżają się 100 µg/m³. Również bardzo ograniczony dryf punktu

zerowego stosowanego analizatora umożliwi dokładniejszy pomiar niskich (rzędu $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) stężeń CO w powietrzu otaczającym.

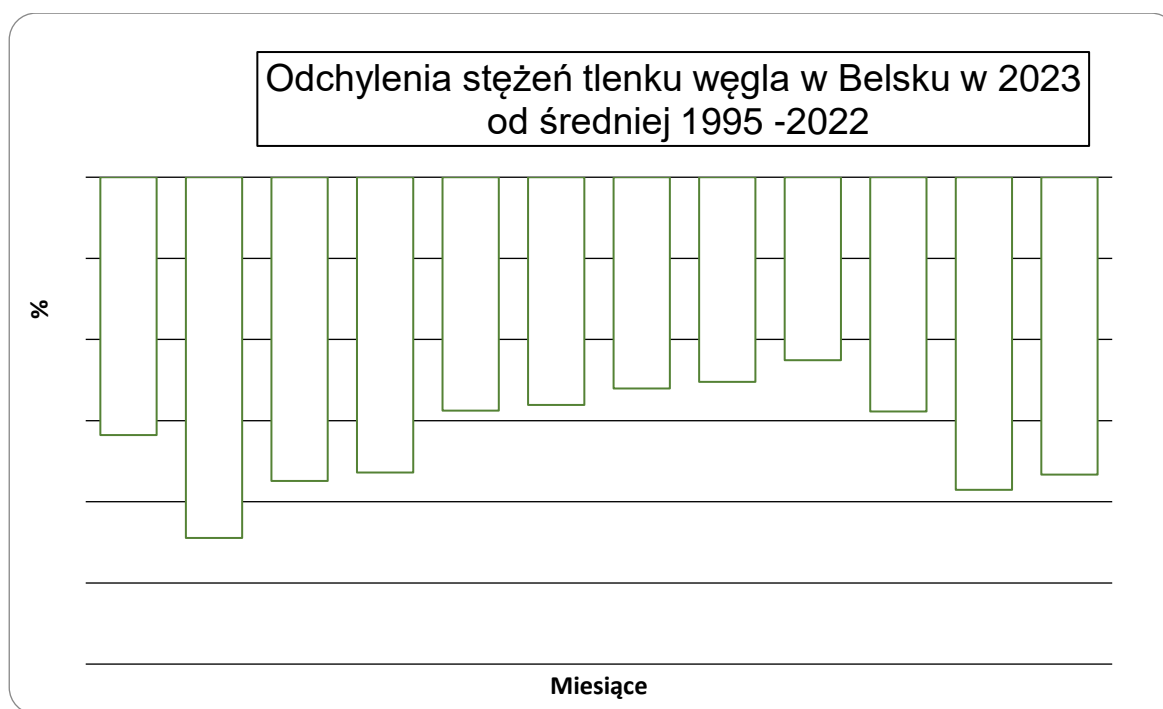
W roku 2023 przebieg roczny stężenia CO charakteryzował się wyraźną sezonowością podobnie jak w latach poprzednich, z porównywalną amplitudą zmienności stężeń. Względnie niskie stężenia tlenu węgla zmierzono od kwietnia do września z minimum w czerwcu – $158 \mu\text{g}/\text{m}^3$; o $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niżej od lipcowego minimum roku 2022.

Maksymalne stężenie średniomiesięczne wyniosło $341 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w styczniu, mniej o $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niż w roku 2022. Odchylenia stężeń w stosunku do średniej wieloletniej były dla wszystkich miesięcy roku ujemne; odchylenia sięgały ok. -45% dla lutego (Rys. 2.3.2).

Średnie roczne stężenie tlenu węgla było niższe o $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ od tego z roku 2022 i wyniosło $231 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Maksymalne wartości chwilowe stężeń tlenu węgla (średnie 60-min) były dość wyrównane w okresie całego roku w granicach $600 - 850 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - patrz Tabela 2.3.1. Maksymalne stężenie chwilowe w roku wyniosło $886 \mu\text{g}/\text{m}^3$; było o ok $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niższe od maksymalnych wartości z roku 2022. Przebieg roczny stężenia CO w Belsku w roku 2023 (średnie miesięczne) przedstawia Rys 2.3.1, a wartości średnich miesięcznych i chwilowych wartości maksymalnych przedstawia Tabela 2.3.1.



Rys. 2.3.1 Przebieg roczny stężenia CO przy powierzchni Ziemi, Belsk 2023 na tle lat 2021-2022.



Rys. 2.3.2 Odchylenia średnich miesięcznych stężeń CO w roku 2023 od średniej z lat 1995 - 2022 w Belsku.

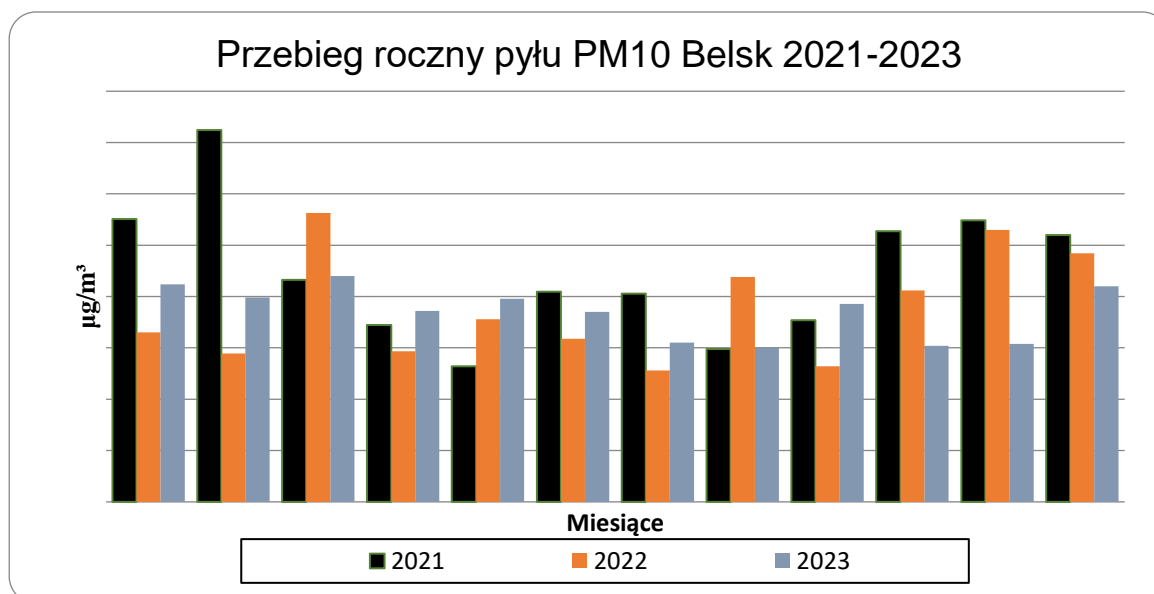
Tabela 2.3.1 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji CO w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2023 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	341	266	254	213	179	158	166	185	200	246	265	307
max	674	679	762	775	843	367	250	382	662	816	578	886

2.4. Pył zawieszony PM10

Rok 2023 był trzecim kompletnym rokiem ciągłych pomiarów w Belsku pyłu zawieszonego PM10. Pomiar wykonywany był przyrządem firmy Environnement model MP101M. Analizator działa w oparciu o zjawisko absorpcji promieniowania beta przez filtr na którym jest osadzany zbierany pył. Średnioroczne stężenie wyniosło $18,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ co jest zbliżoną do najniższych wartością zmierzoną w województwie mazowieckim w roku 2023. Najwyższe stężenia mierzono w sezonie jesienno-zimowym, z maksimum rocznym w marcu – $22,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, najniższe w pozostałych miesiącach roku z minimum w sierpniu – $15,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Maksymalne stężenie pyłu PM10 (średnia 1-godzinna zmierzone w roku 2023 w Belsku wyniosło $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i zostało zmierzone w marcu. Nie zanotowano przekroczeń wartości dopuszczalnej. Przebieg roczny

stężeń pyłu zawieszonego PM10 przedstawiono na rys 2.4.1, wartości średnich miesięcznych stężeń oraz maksymalnych wartości chwilowych przedstawia Tabela 2.4.1



Rys. 2.4.1 Przebieg roczny stężenia PM10 przy powierzchni Ziemi, Belsk 2023 na tle lat 2021-2022.

Tabela 2.4.1 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji PM10 w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2023 (µg/m³).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	21,2	19,9	22,00	18,6	19,8	18,5	15,5	15,0	19,3	15,2	15,4	21,0
max	23	71	125	67	113	78	45	73	108	39	53	82

Wybrane wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń powietrza w roku 2022 (średnich 1-godz i średnich kroczących 8 godz. przedstawione są w Tabelach 2.3.2 i 2.3.3

Tabela 2.3.2 Wybrane wyniki pomiarów zanieczyszczeń gazowych powietrza - średnie 1-godz.

Parametr	Jednostki	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	PM10
Kompletność serii pomiarowej	%	98,7%	98,7%	98,1%	98,6%	95,4%
Percentyle z serii pomiarowej	S10	0,3	24	2	153	7
	S50	1,0	54	5	202	16
	S90	3,2	90	12	356	34
	S98	6,3	111	18	480	52
	S99,8	11,5	130	28	678	75

Wartość najwyższa	µg/m ³	21,1	149	45	886	125
Liczba wyników pomiarów przewyższających poziom informowania		0	0	0	0	0

Tabela 2.3.3 Wybrane wyniki pomiarów zanieczyszczeń gazowych powietrza – średnie 8-godz kroczące oraz wskaźnik ozonowy AOT 40.

Parametr	Jednostki	O ₃	CO
Kompletność serii pomiarowej	%	99,5%	99,4%
Percentyle z serii pomiarowej	S ₁₀	26	156
	S ₅₀	55	205
	S ₉₀	85	353
	S ₉₈	104	461
	S _{99,8}	120	622
Wartość najwyższa	µg/m ³	128	696
Liczba wyników pomiarów przewyższających wartość dopuszczalną		19	0
Wartość wskaźnika ozonowego AOT 40 µg/m ³ *godz.		21727	

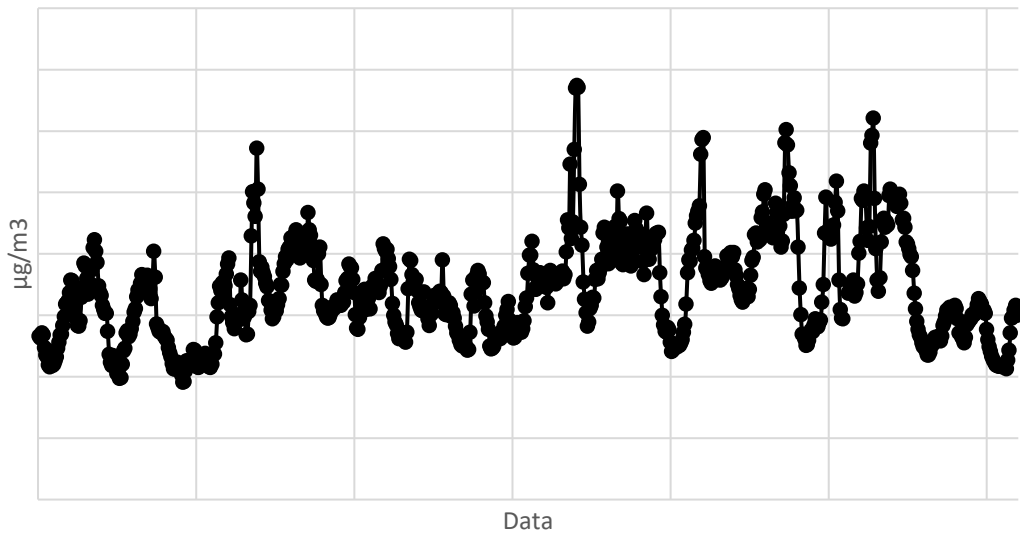
Wszystkie analizatory zanieczyszczeń powietrza pracujące na stacji C.O.G. PAN w Belsku podlegały okresowym przeglądom serwisowym, ponadto przez cały rok realizowany był harmonogram czynności kontrolnych (kontrole parametrów i kontrole typu zero-span, kalibracje wielopunktowe, wymiany zużywających się materiałów eksploatacyjnych), mających na celu zapewnienie jakości otrzymywanych danych.

Ponadto w marcu 2023 analizatory stacji wzięły udział w interkalibracji w laboratorium GIOŚ w Krakowie. Wyniki interkalibracji wskazują na dobrą zgodność całego zestawu pomiarowego z wzorcami CLB GIOŚ.

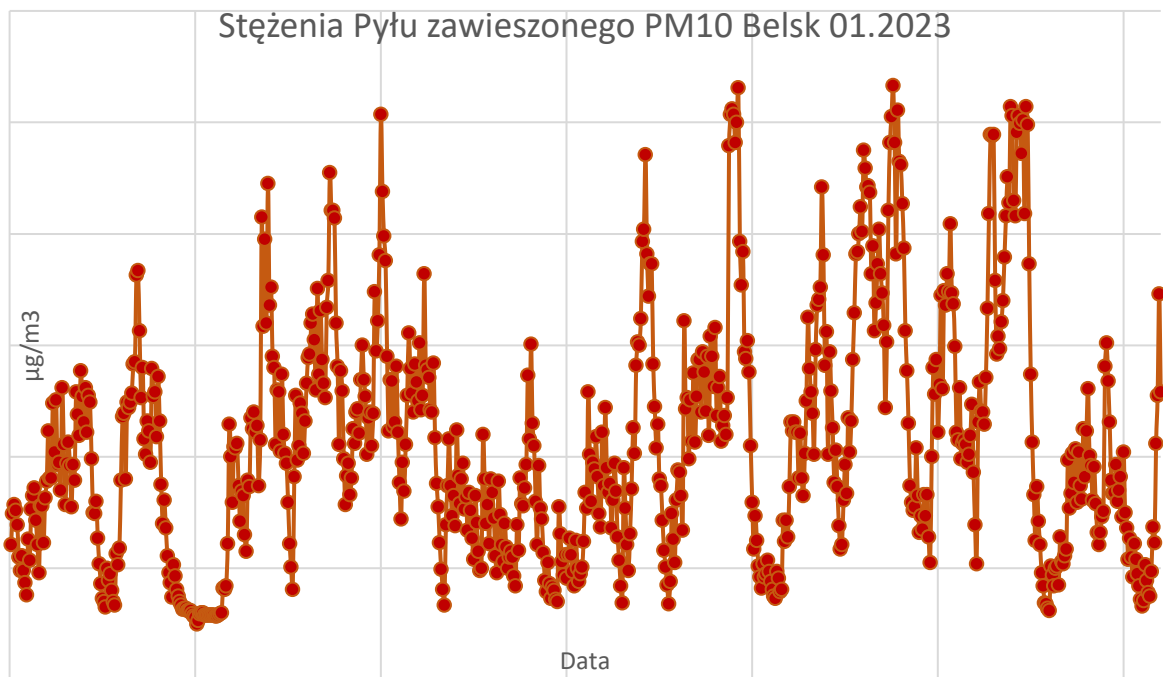
Przebiegi stężeń chwilowych tlenu węgla, dwutlenku azotu, dwutlenku siarki i ozonu rejestrowane w C.O.G. PAN w Belsku w ciągu 2023 roku prezentuje poniższa sekwencja rysunków.

Przebiegi chwilowych (śr. 60-min) stężeń CO, NO₂, SO₂, O₃ i PM₁₀ w COG IGF PAN w Belsku w 2023 roku

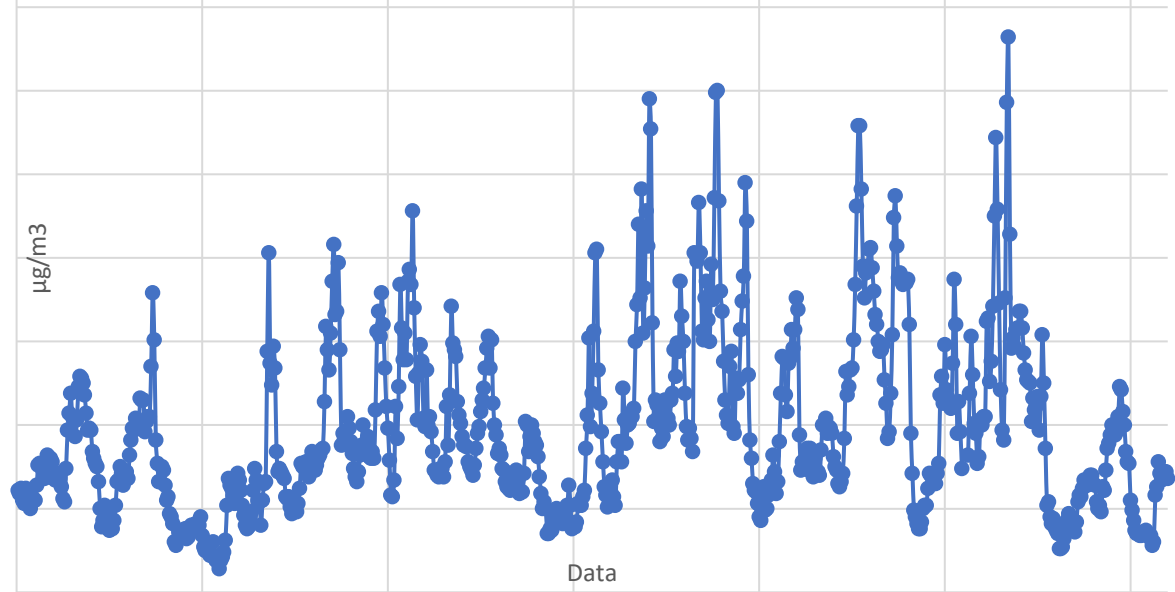
Stężenia Tlenku Węgla Belsk 01.2023



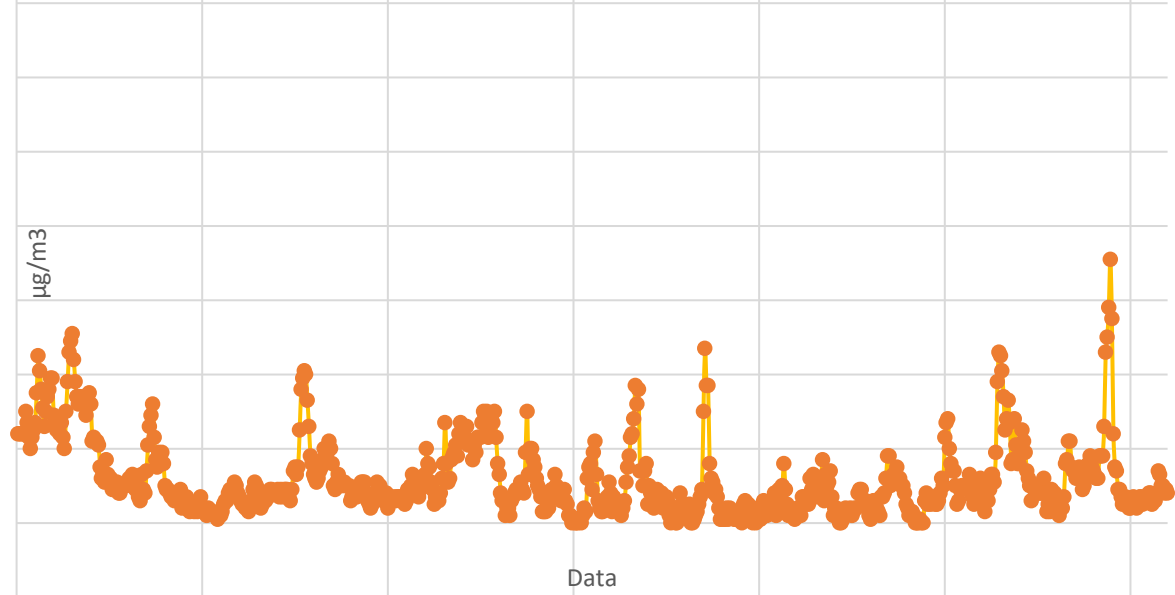
Stężenia Pyłu zawieszzonego PM10 Belsk 01.2023



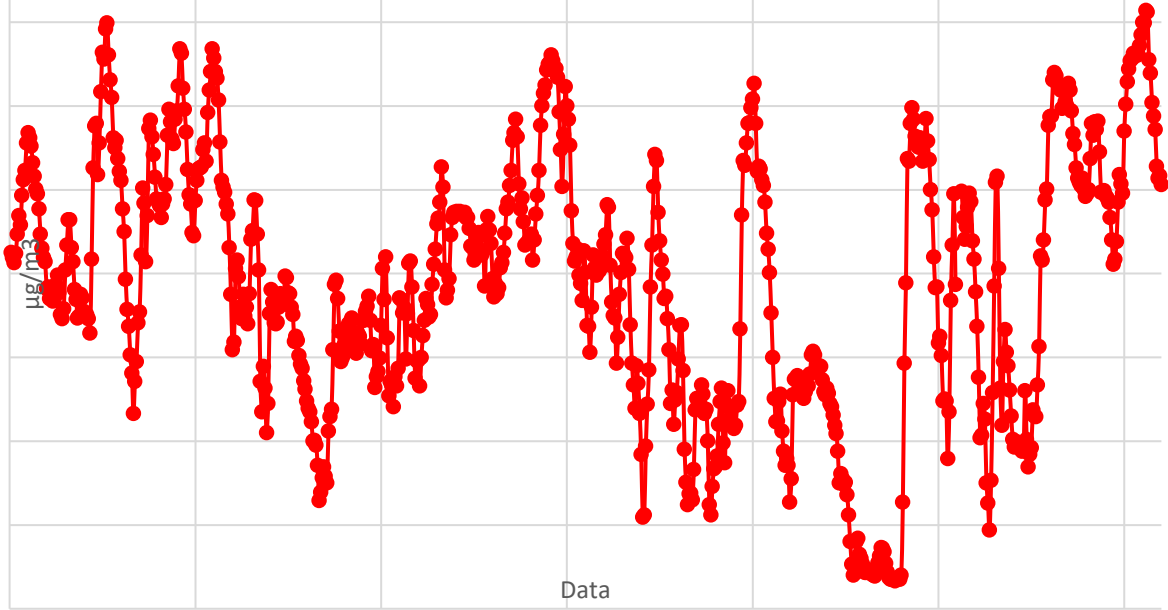
Stężenia Dwutlenku Azotu Belsk 01.2023



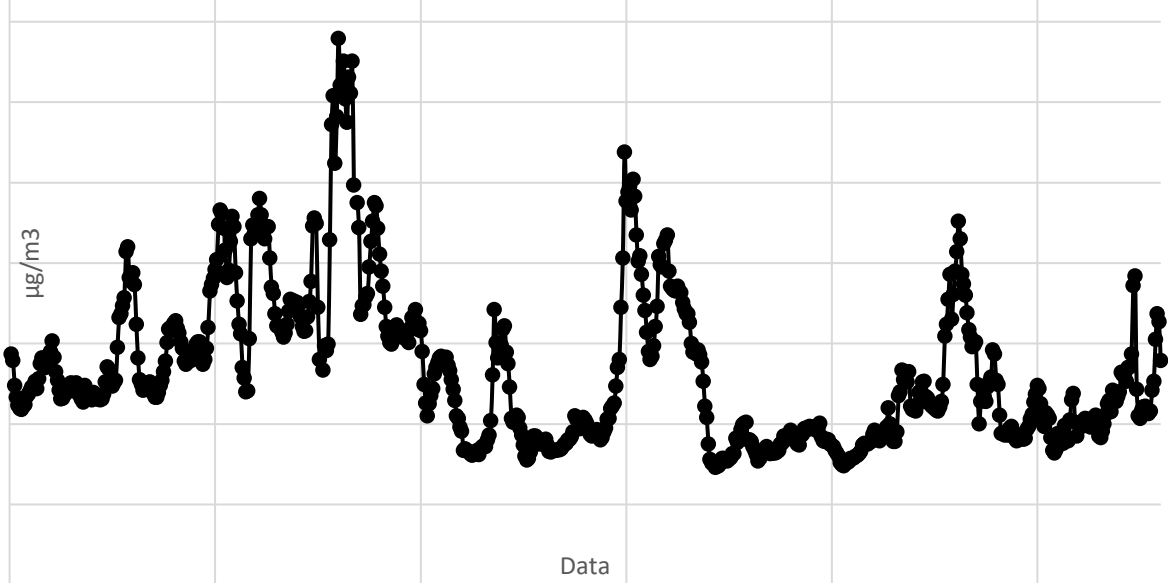
Stężenia Dwutlenku Siarki Belsk 01.2023



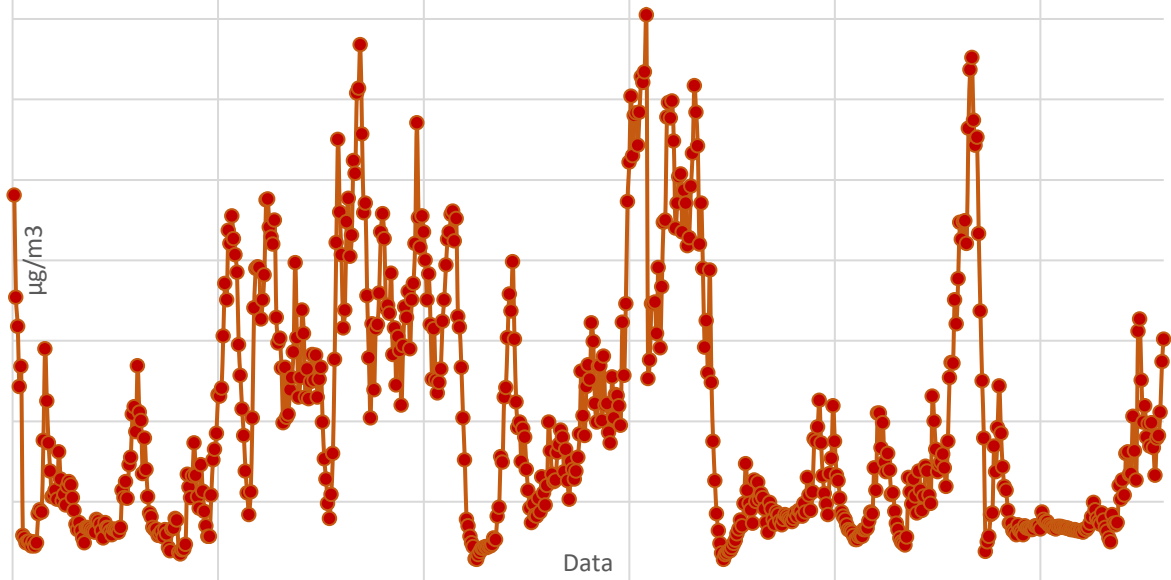
Stężenia Ozonu Belsk 01.2023



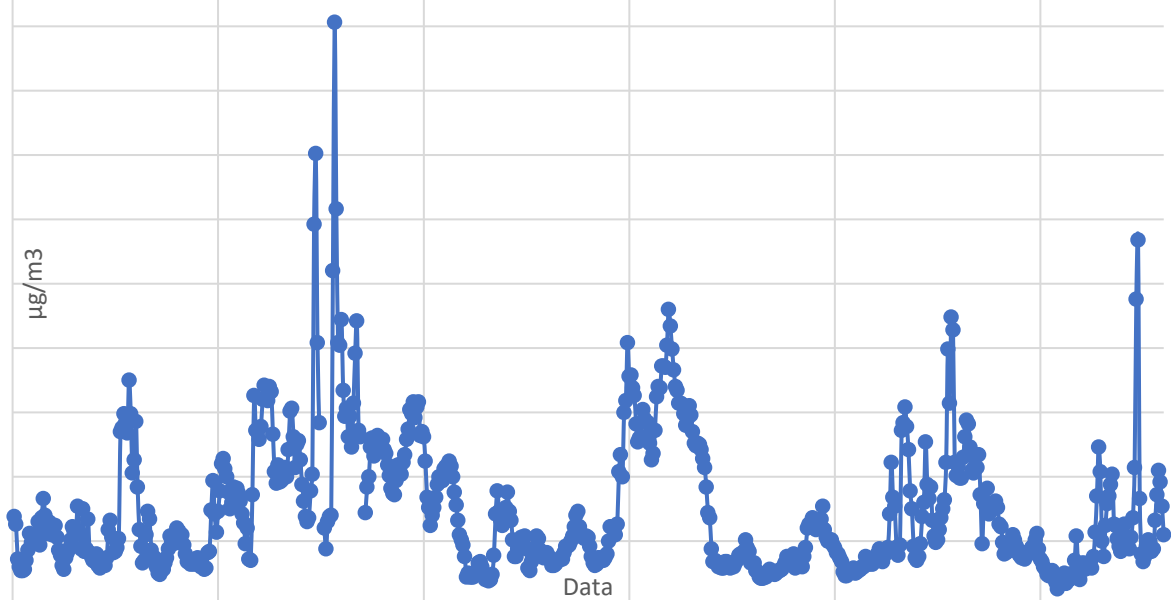
Stężenia Tlenku Węgla Belsk 02.2023



Stężenia Pyłu zawieszzonego PM10 Belsk 02.2023



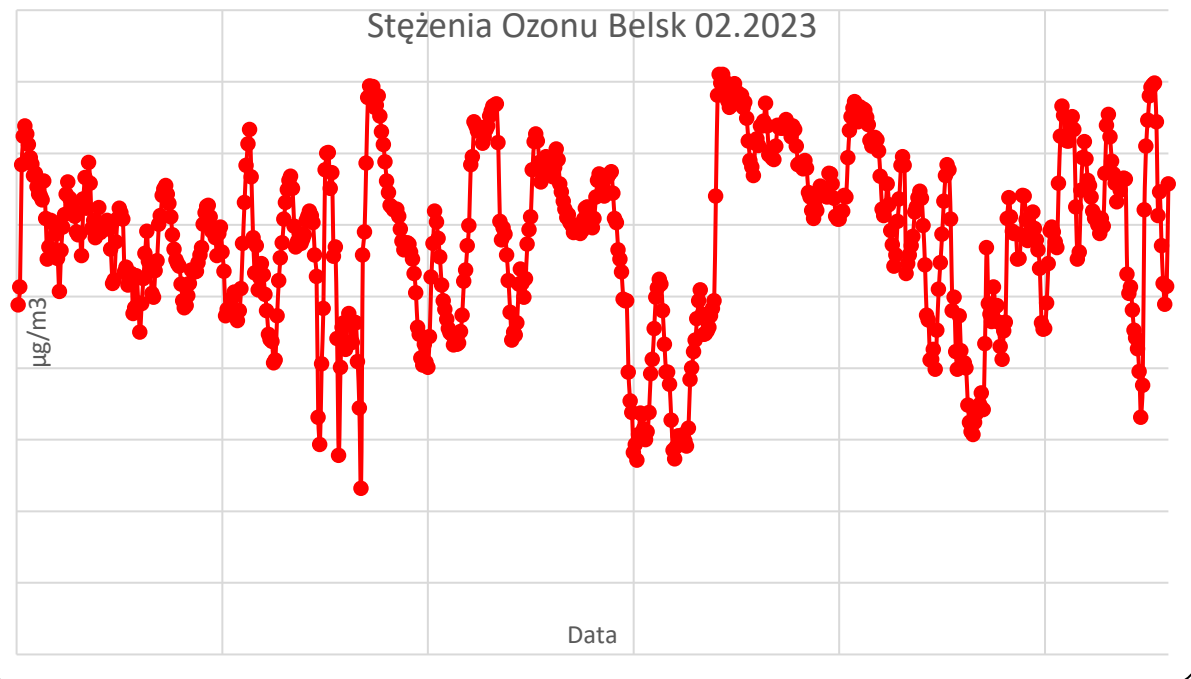
Stężenia Dwutlenku Azotu Belsk 02.2023

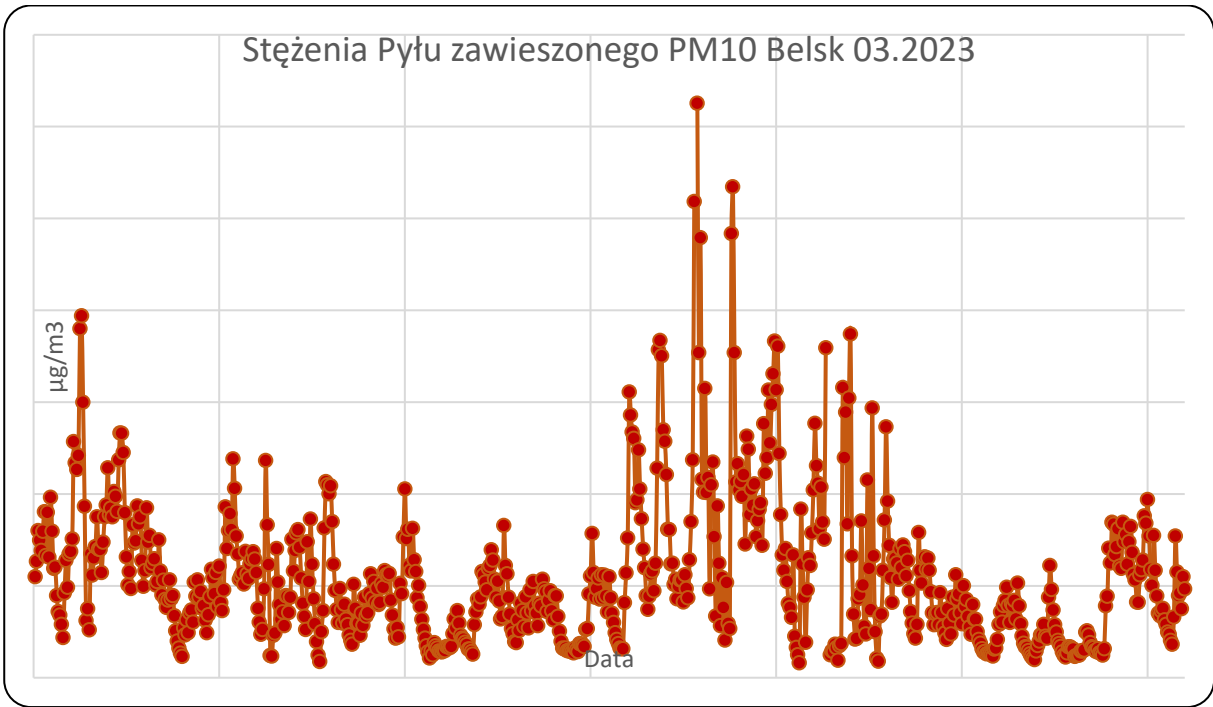
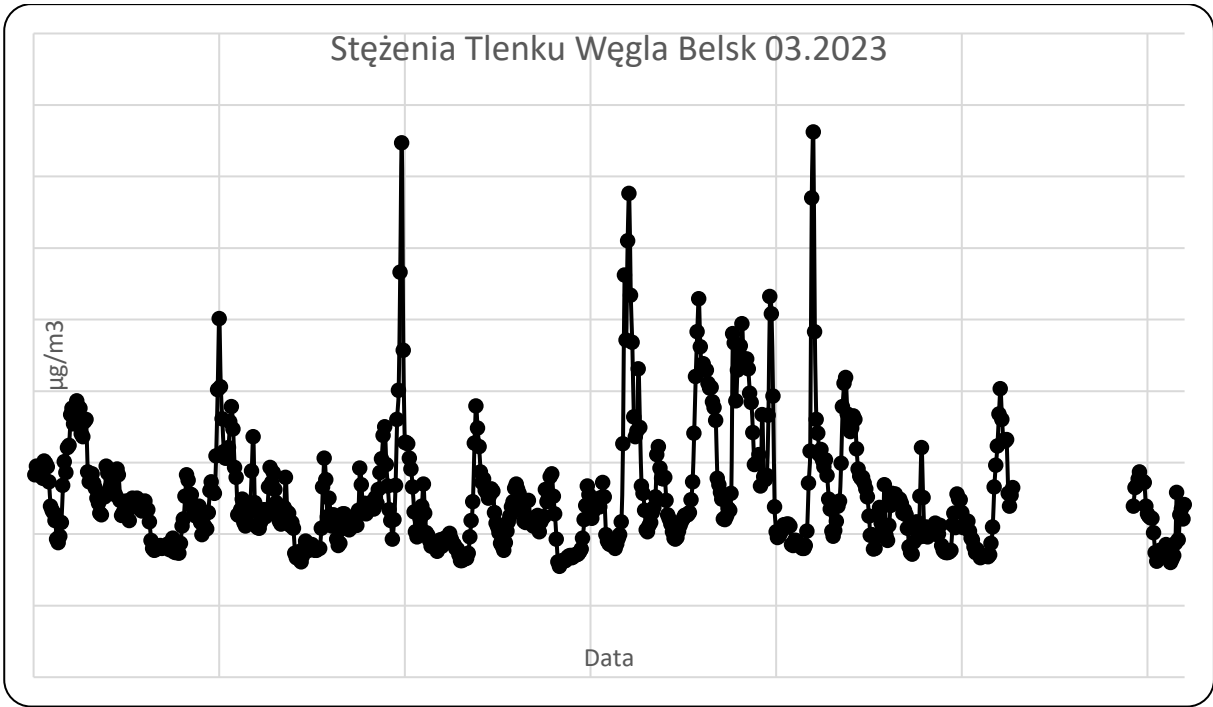


Stężenia Dwutlenku Siarki Belsk 02.2023

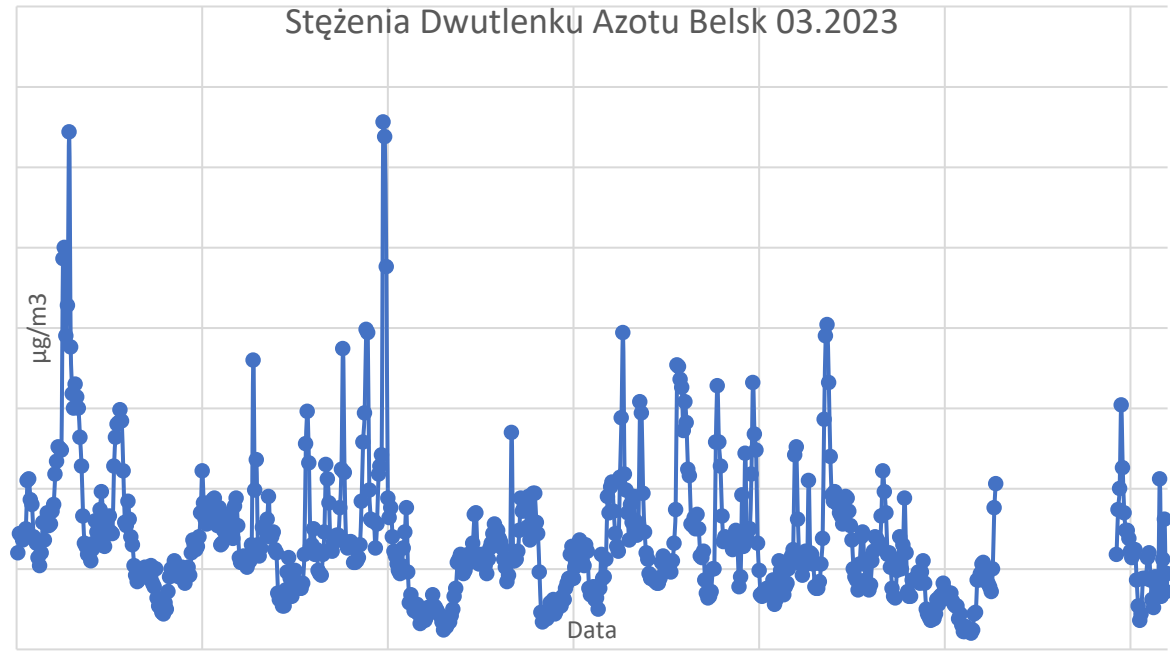


Stężenia Ozonu Belsk 02.2023



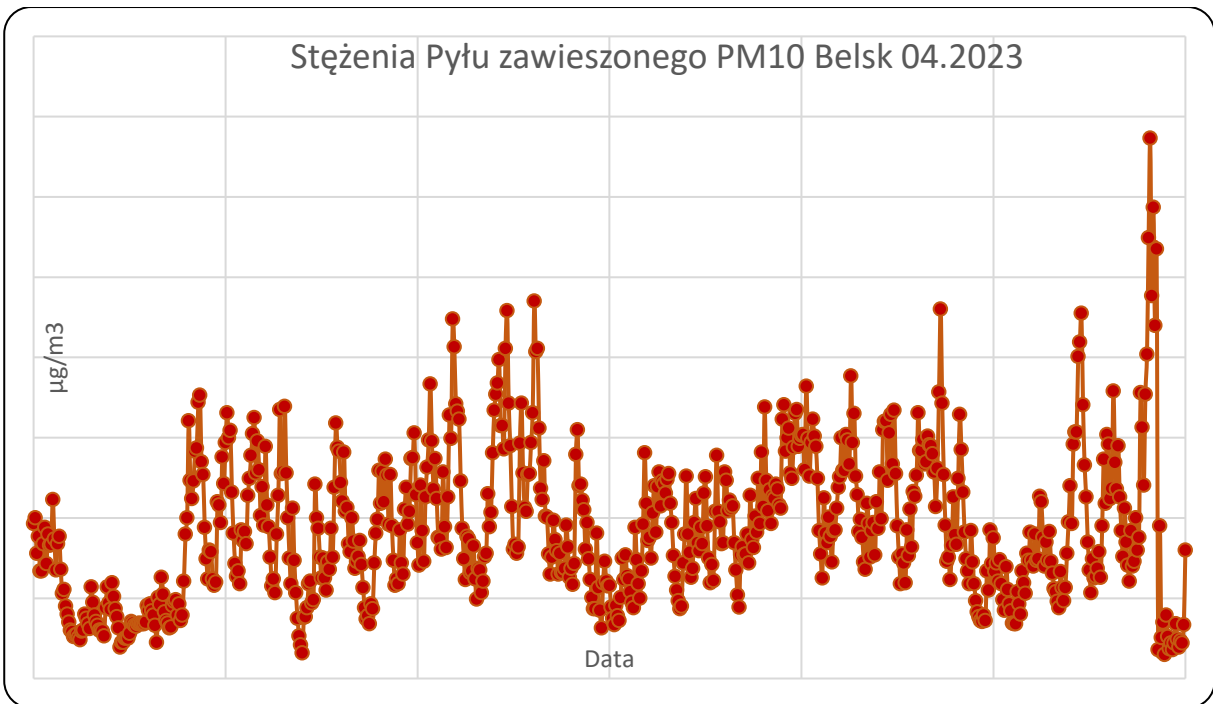
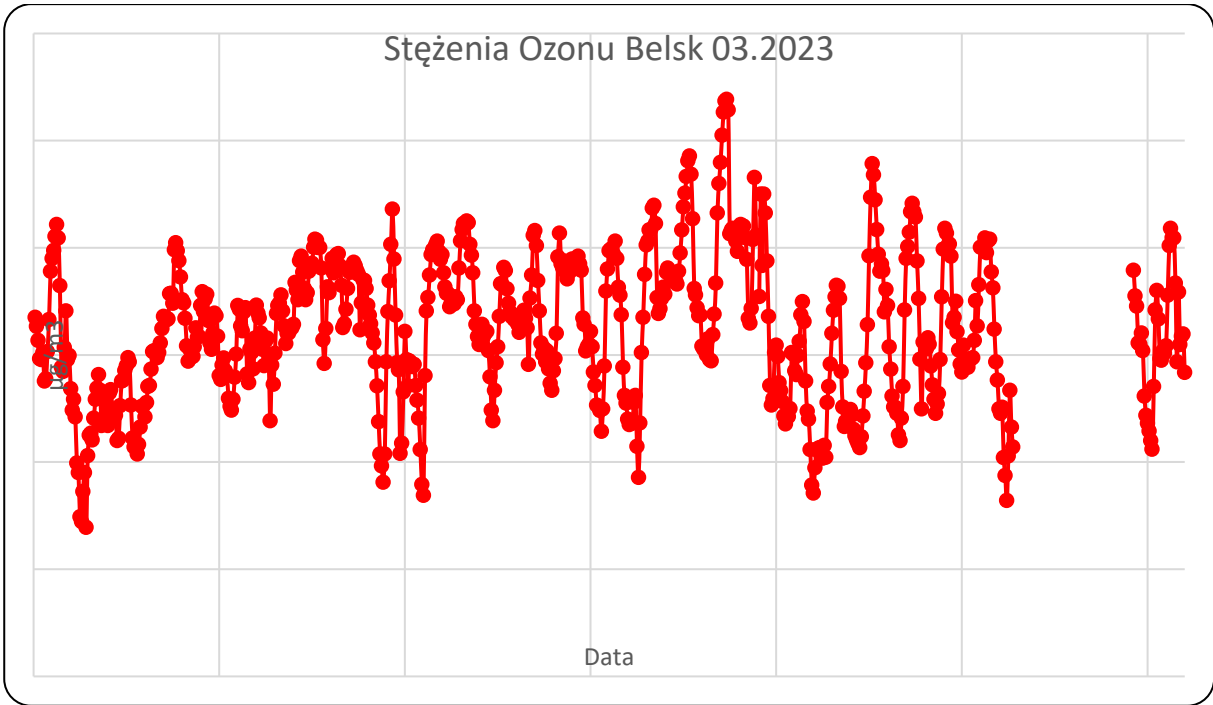


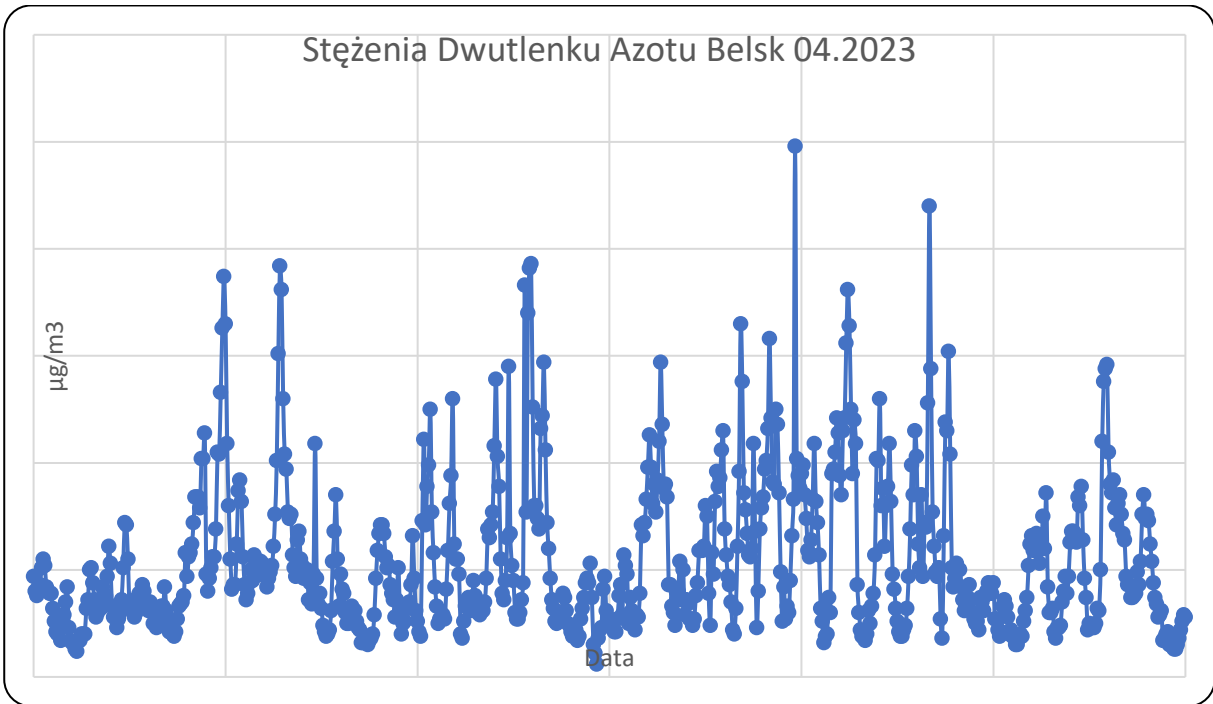
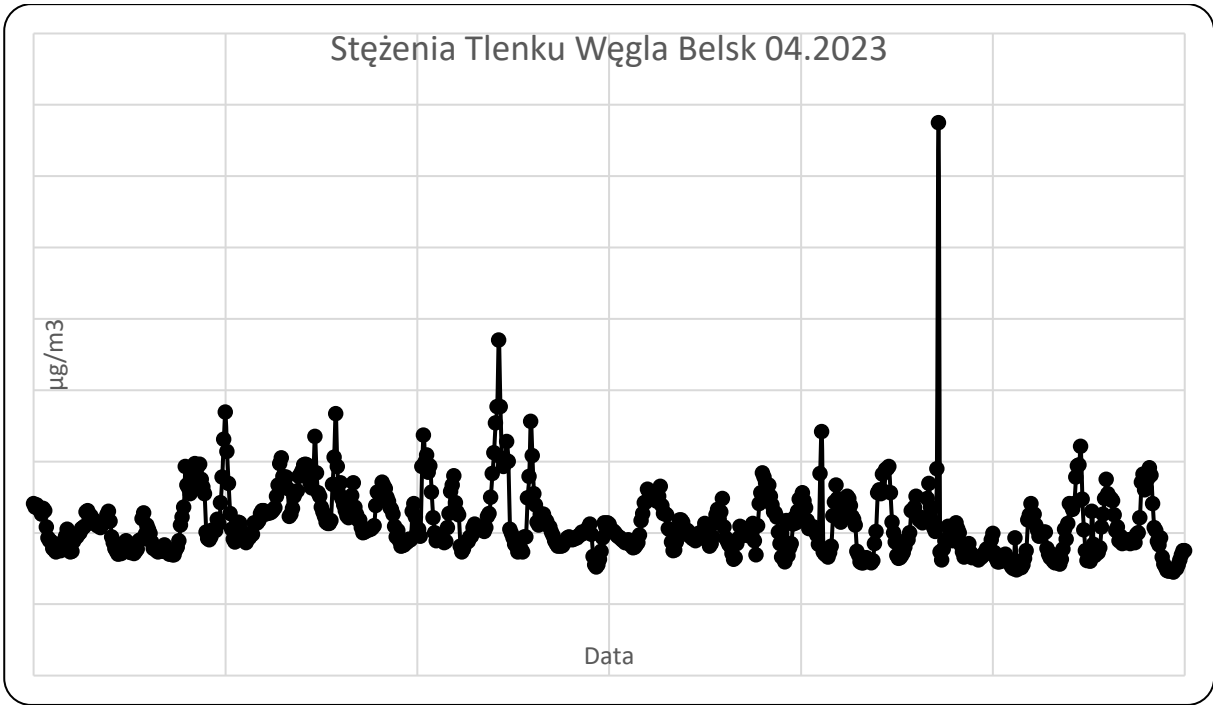
Stężenia Dwutlenku Azotu Belsk 03.2023



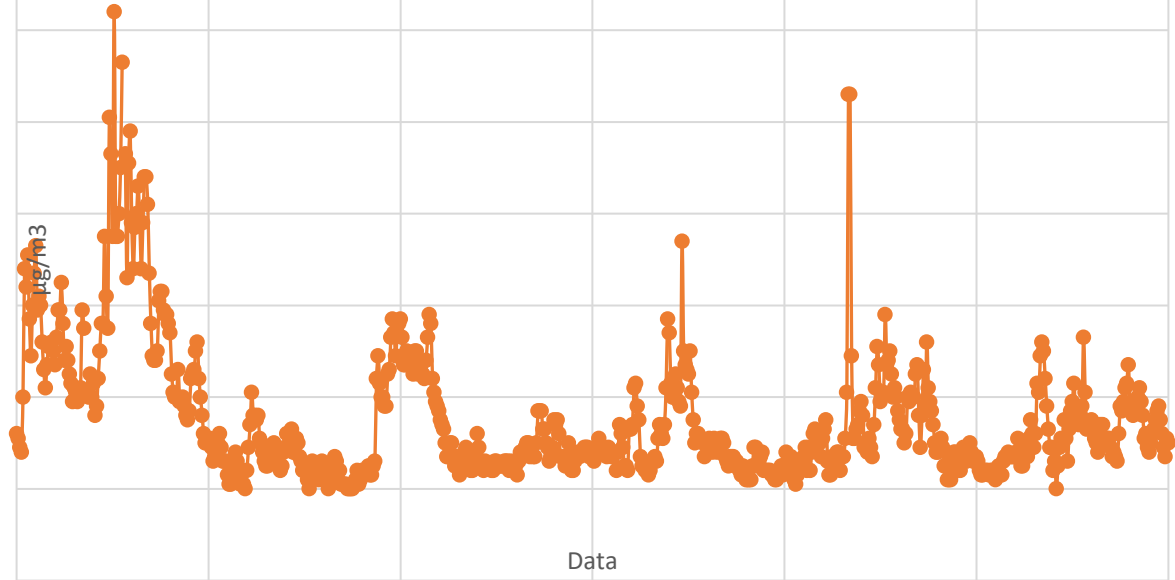
Stężenia Dwutlenku Siarki Belsk 03.2023



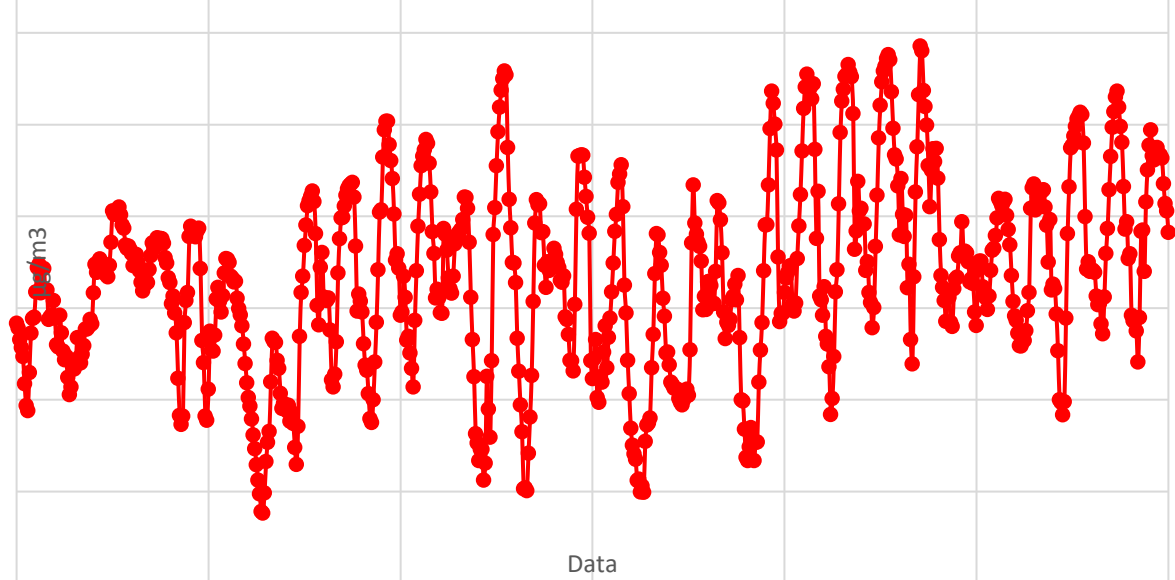




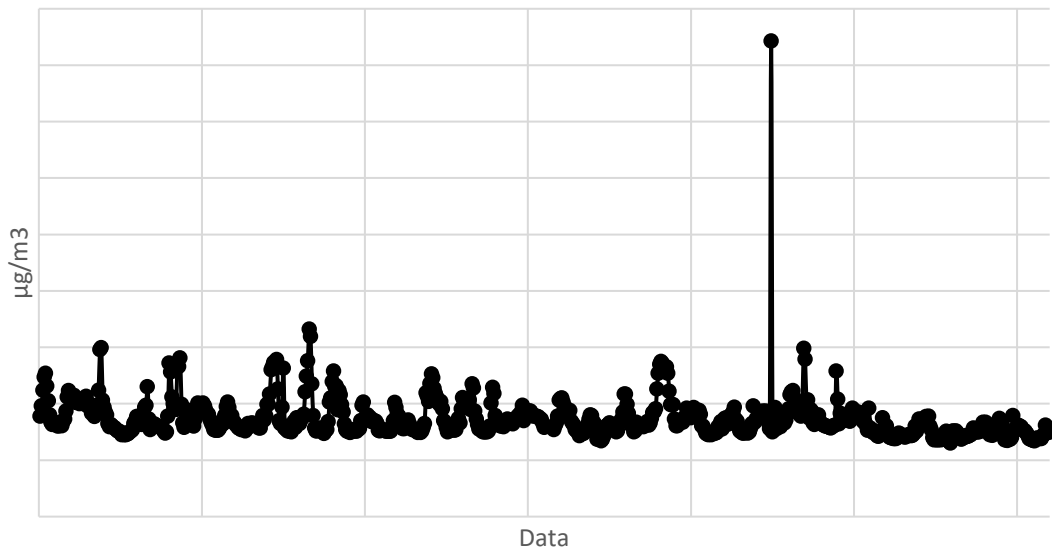
Stężenia Dwutlenku Siarki Belsk 04.2023



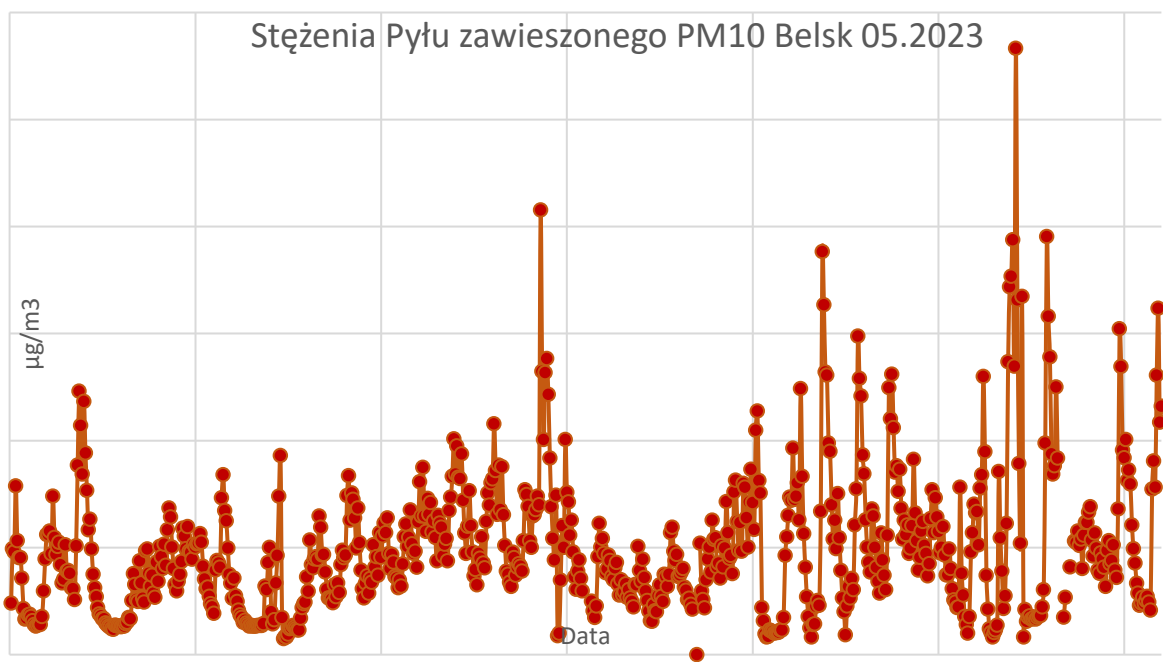
Stężenia Ozonu Belsk 04.2023

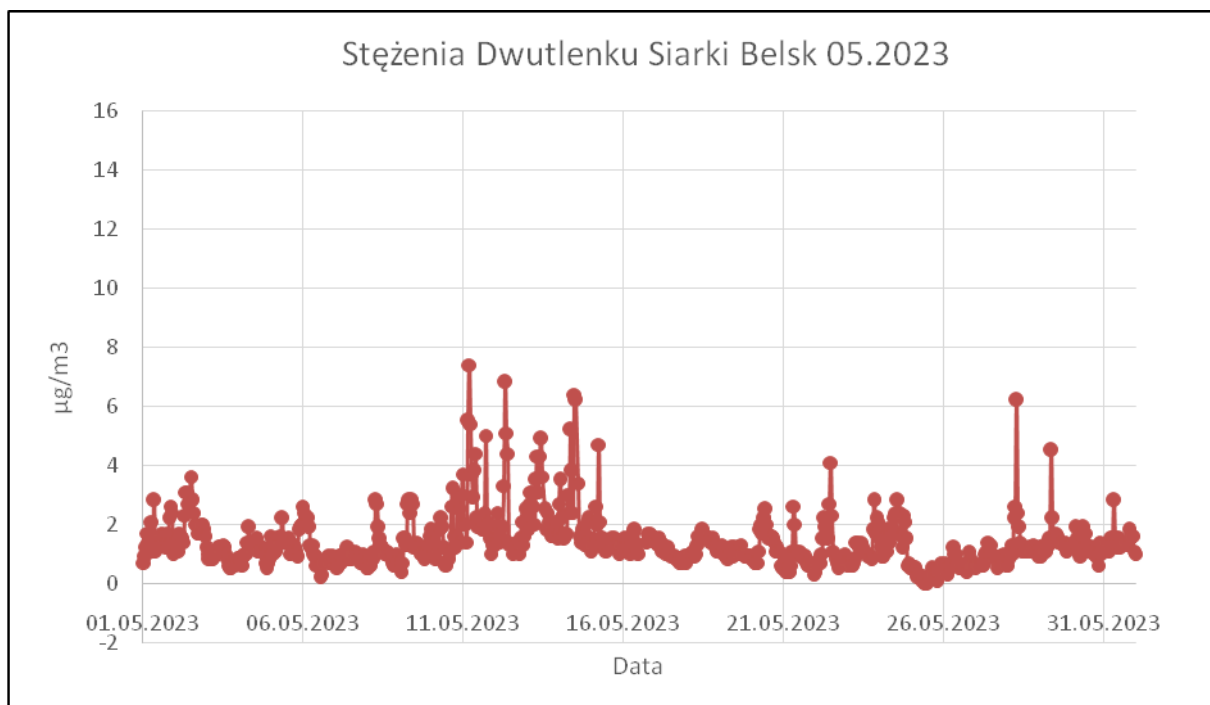
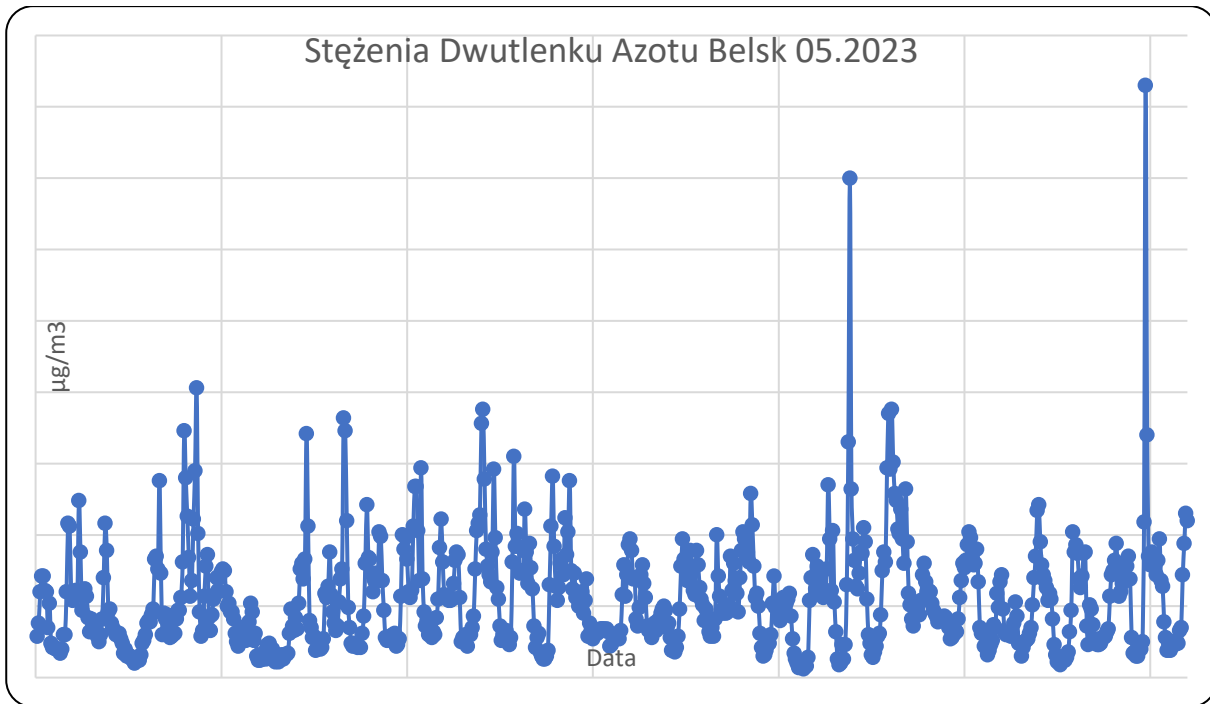


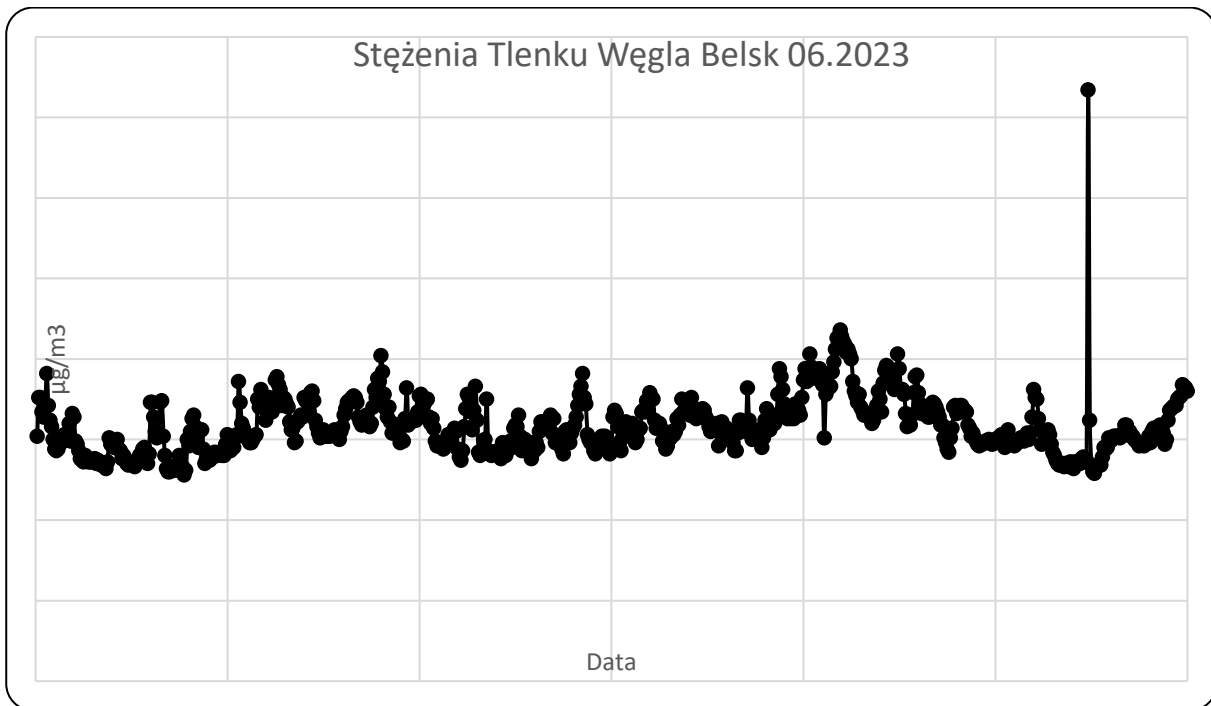
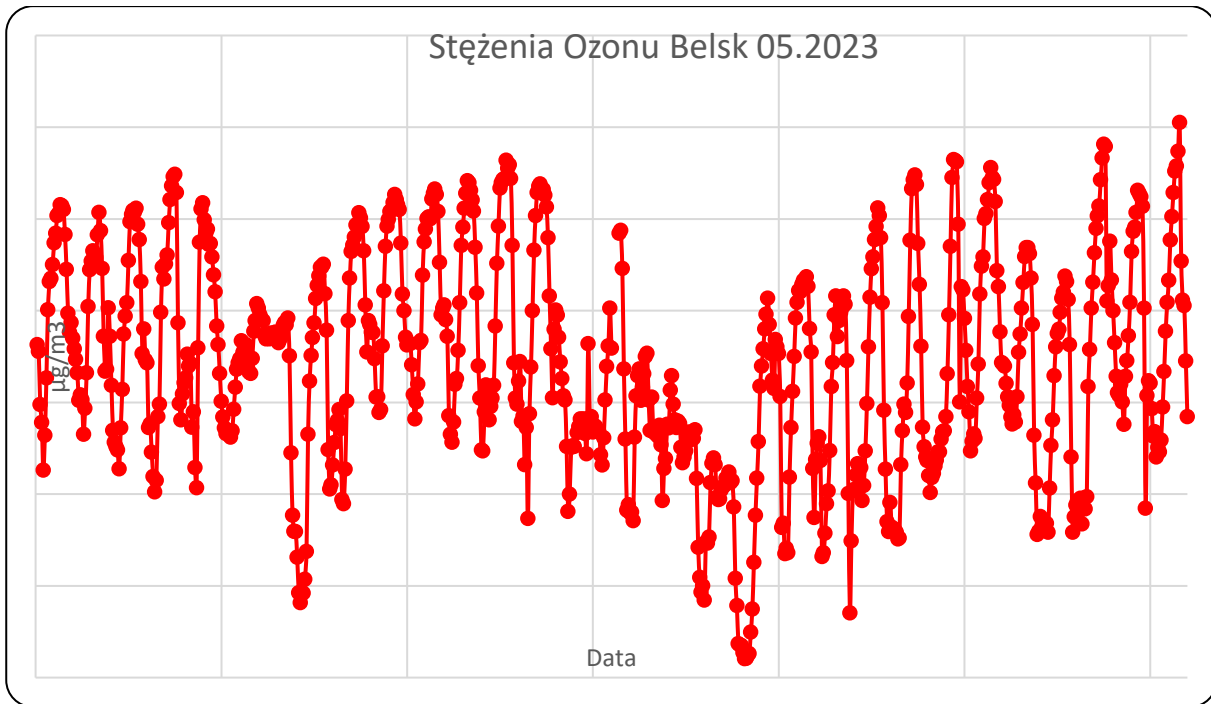
Stężenia Tlenku Węgla Belsk 05.2023



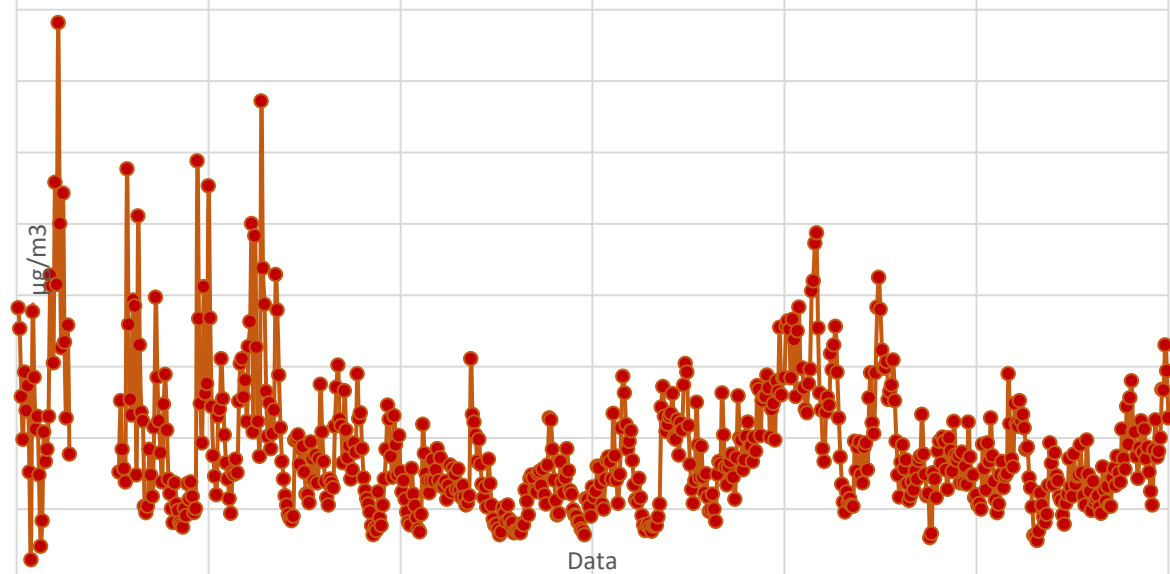
Stężenia Pyłu zawieszonego PM10 Belsk 05.2023



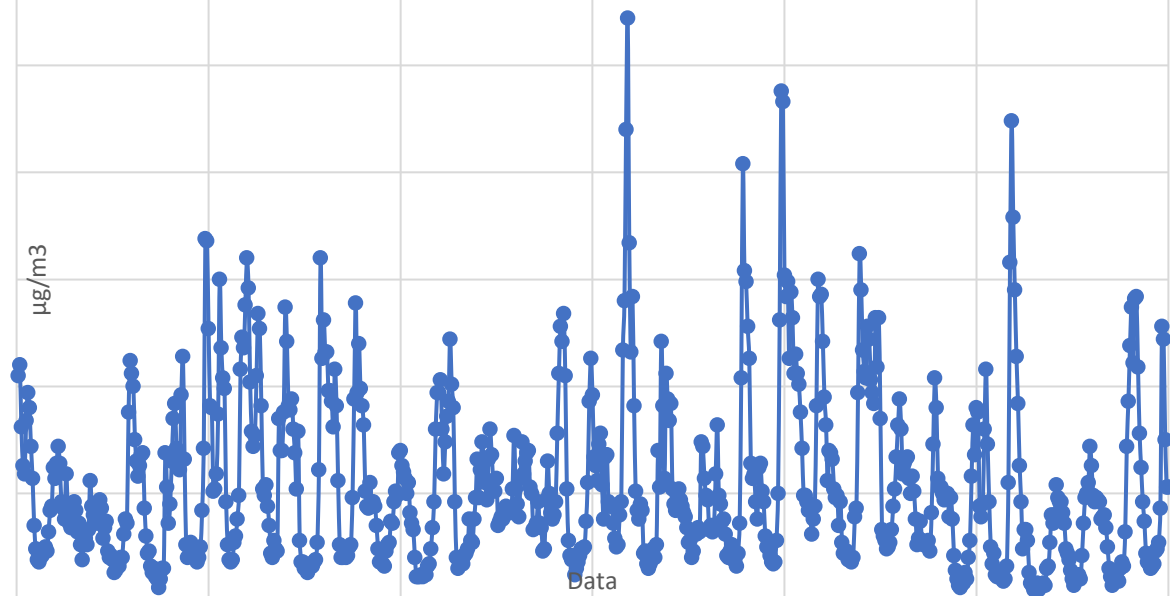


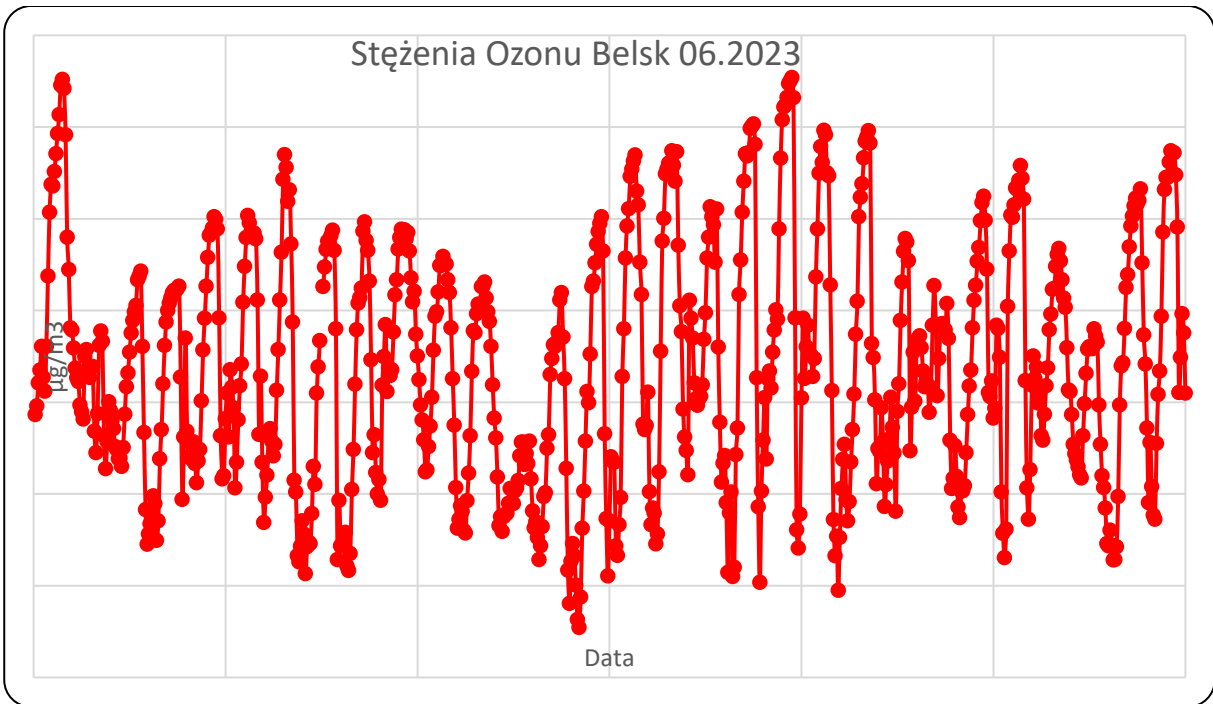
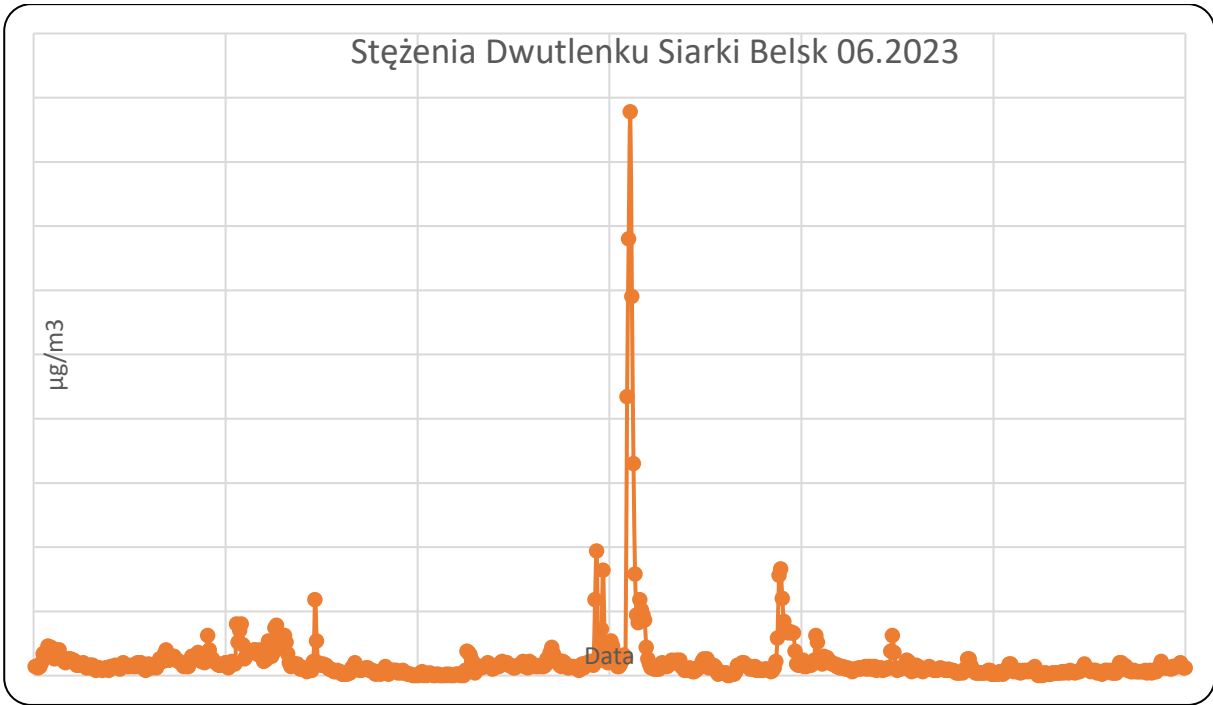


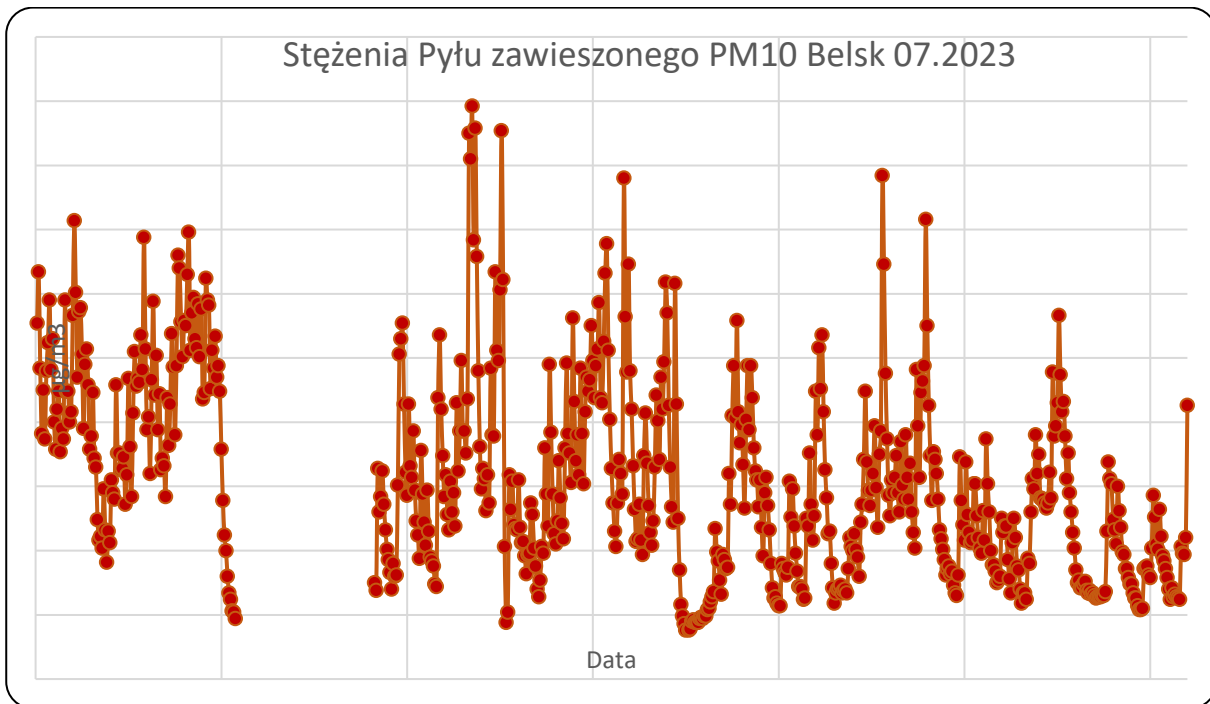
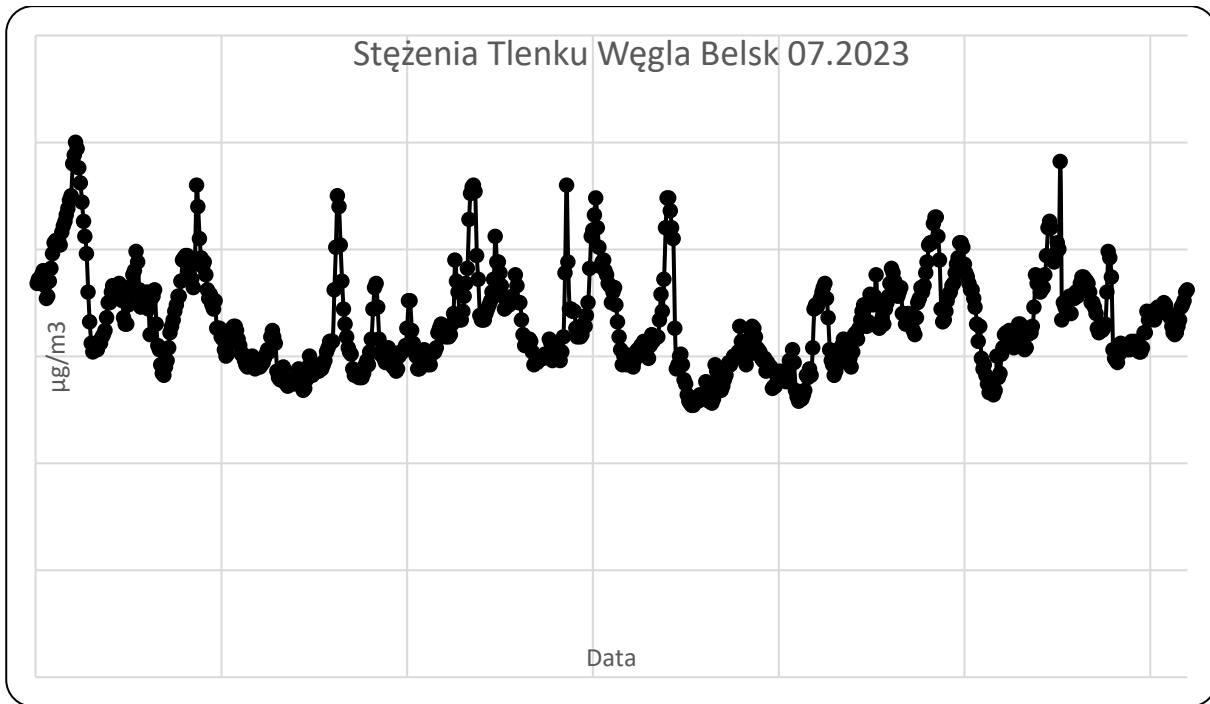
Stężenia Pyłu zawieszonego PM10 Belsk 06.2023

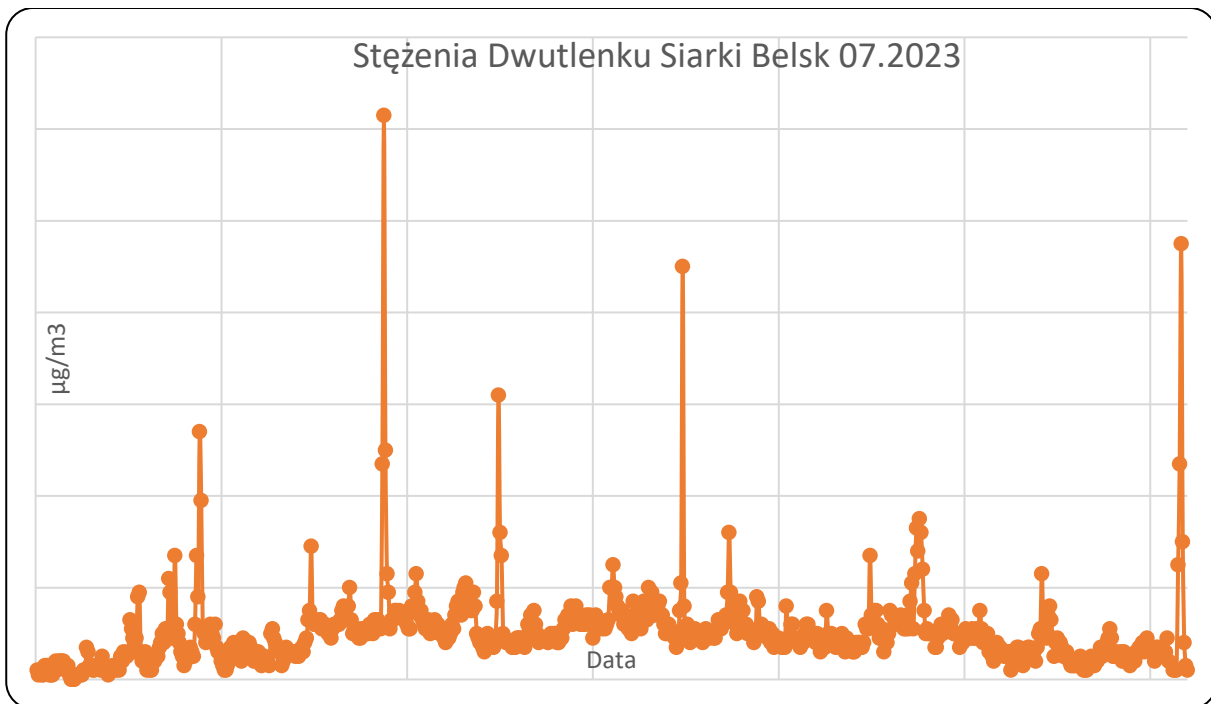
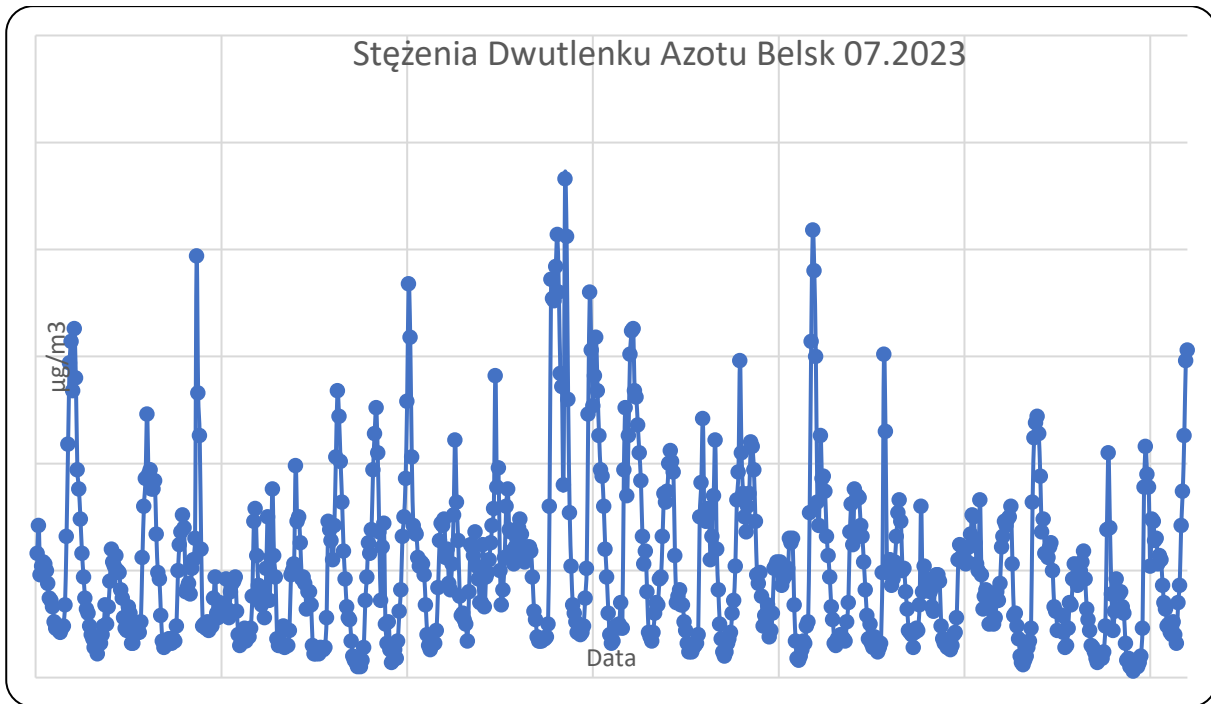


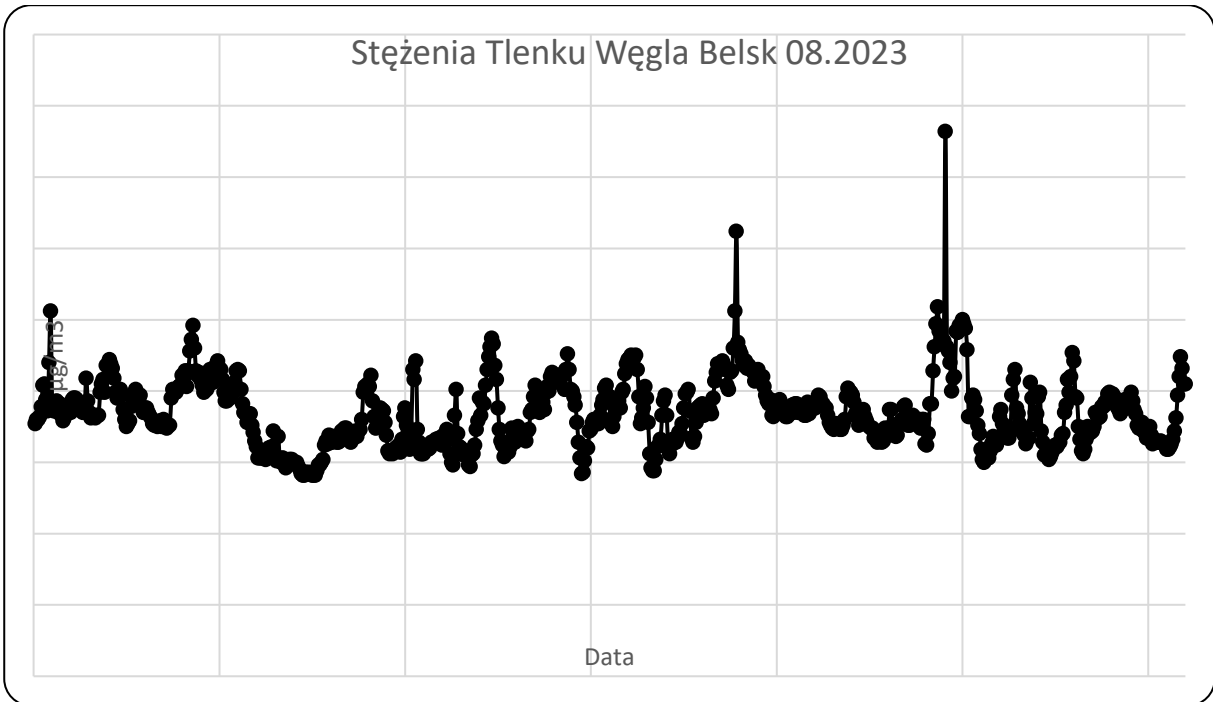
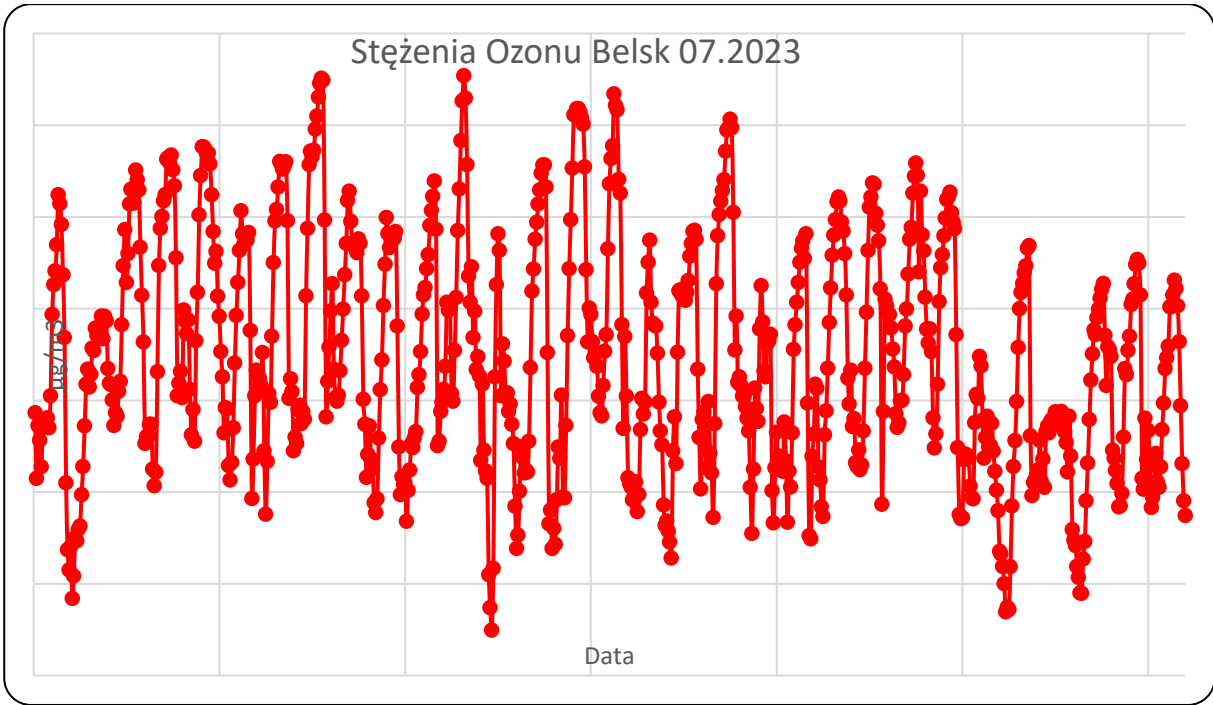
Stężenia Dwutlenku Azotu Belsk 06.2023

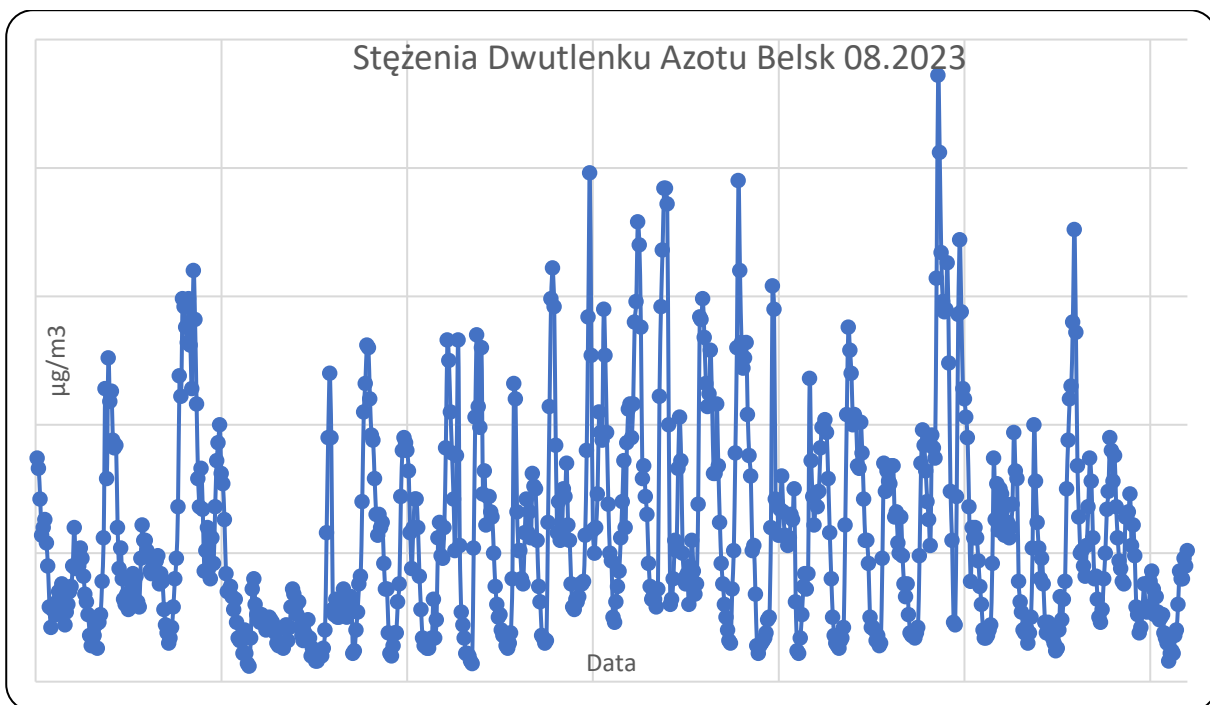
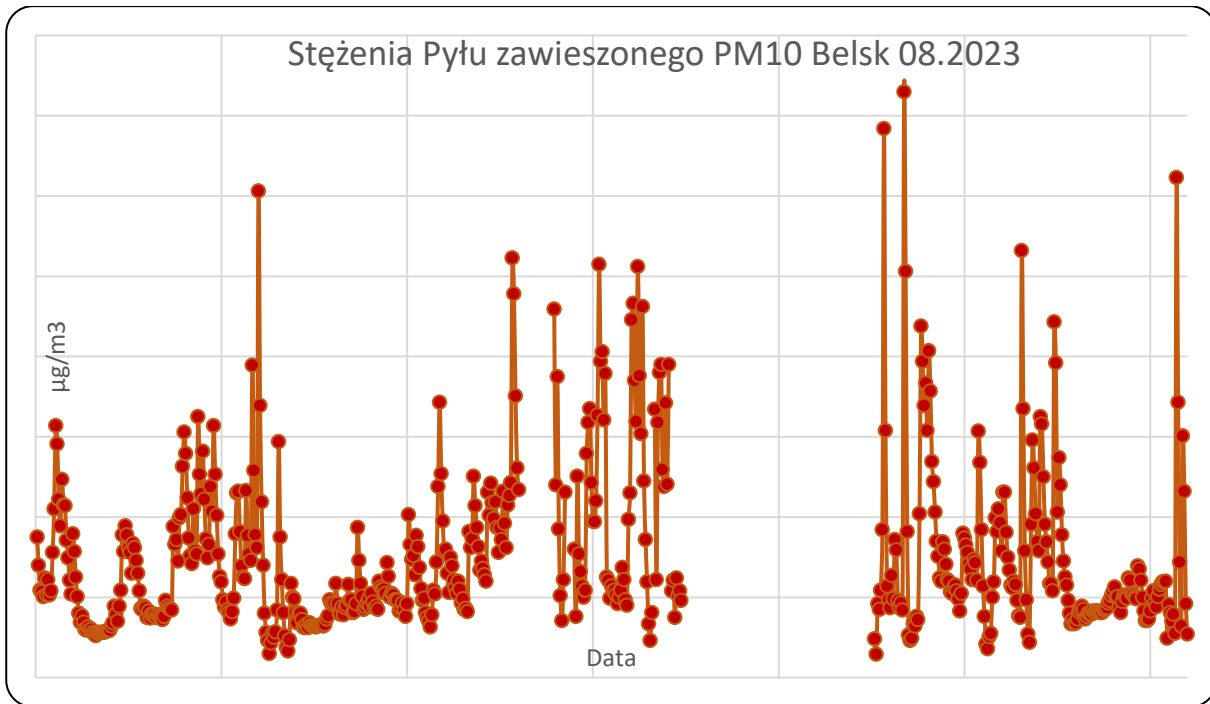


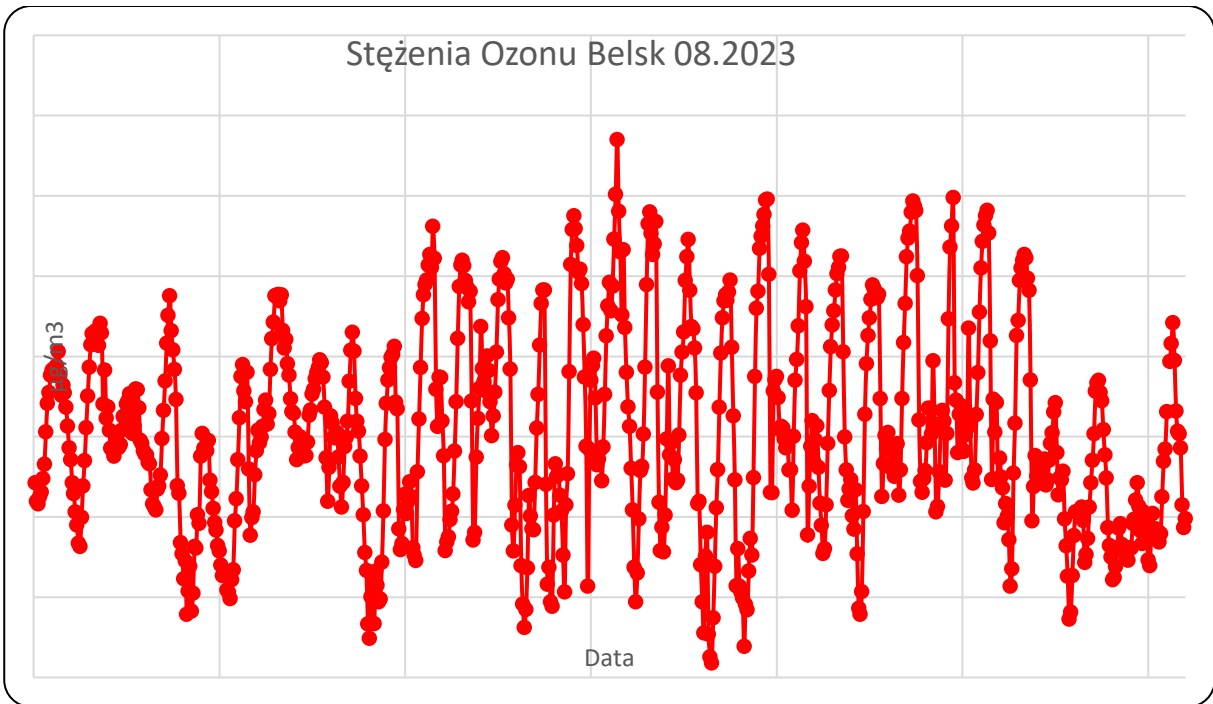
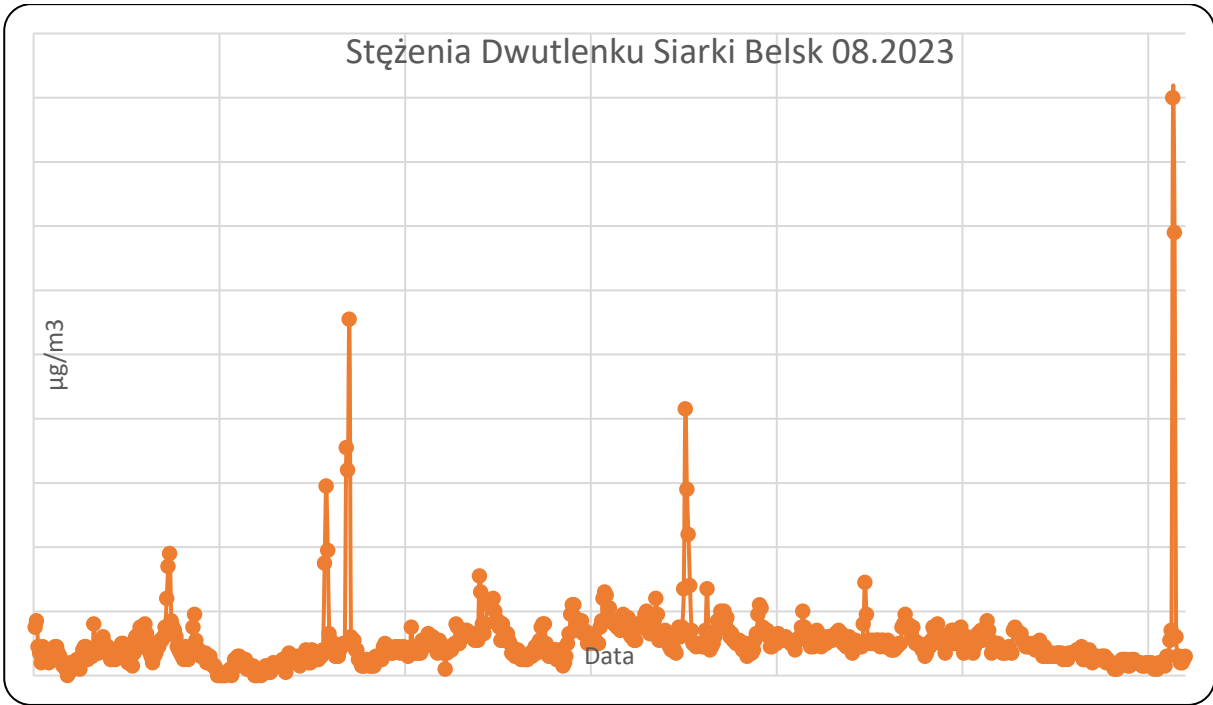


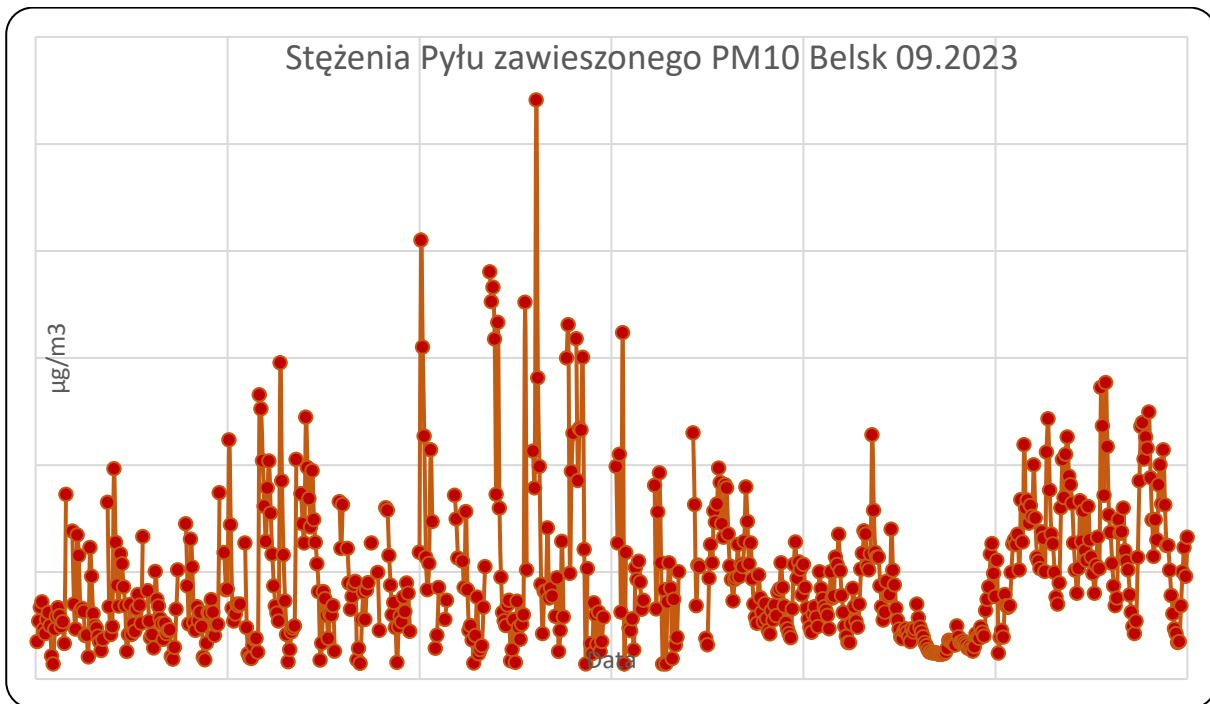
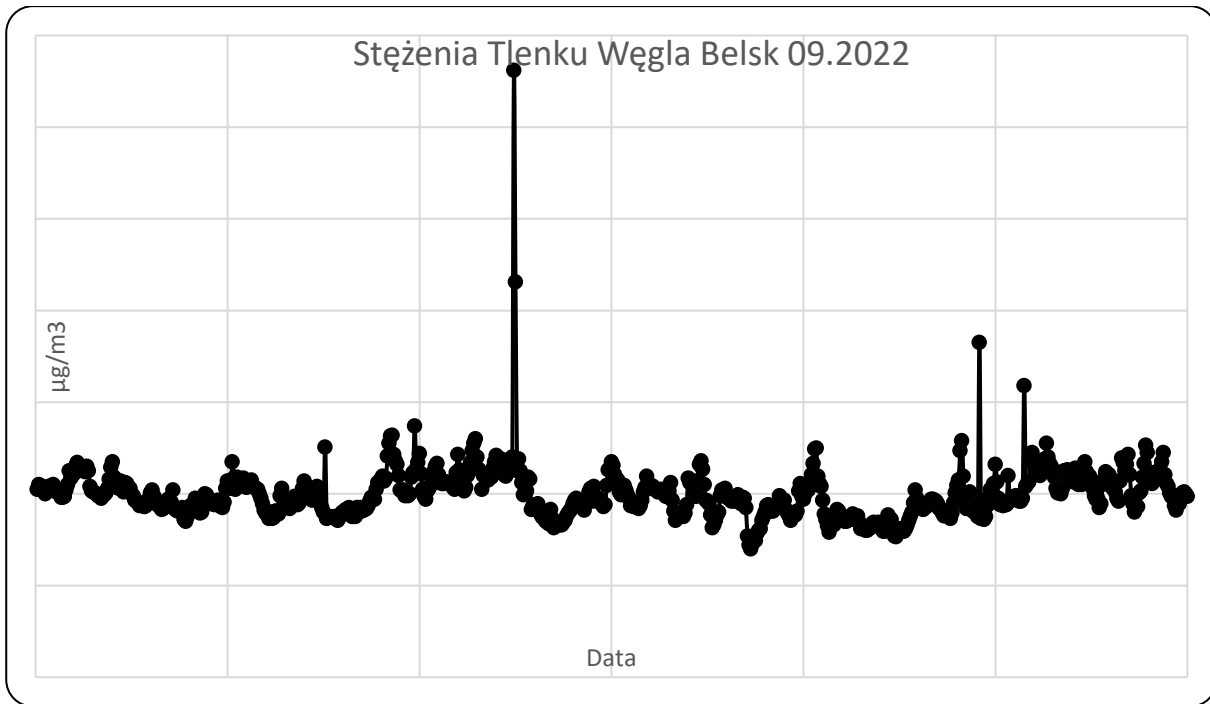


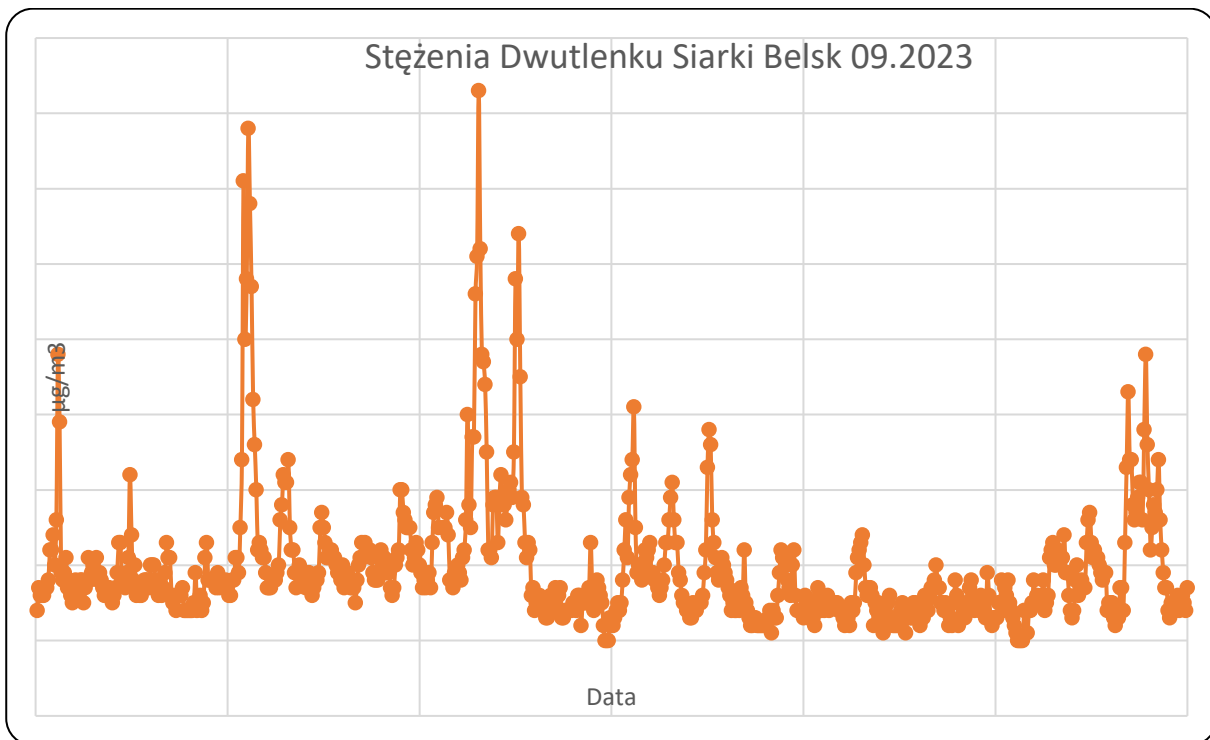
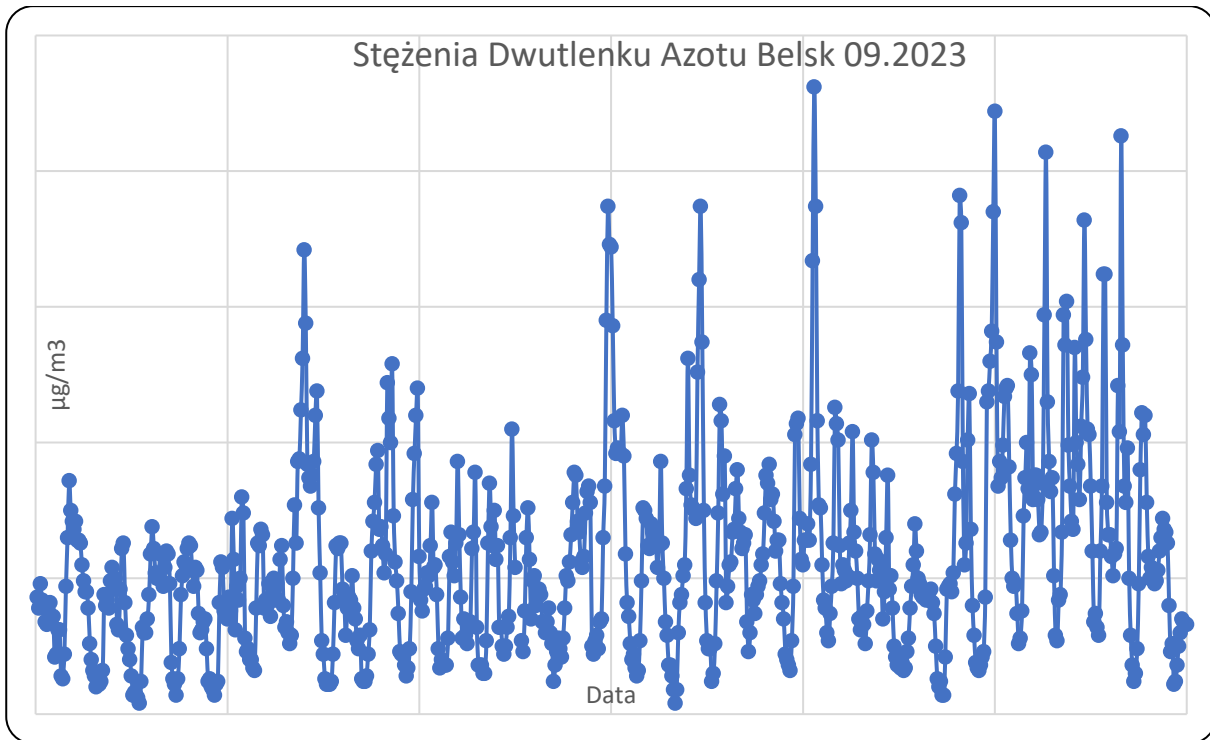


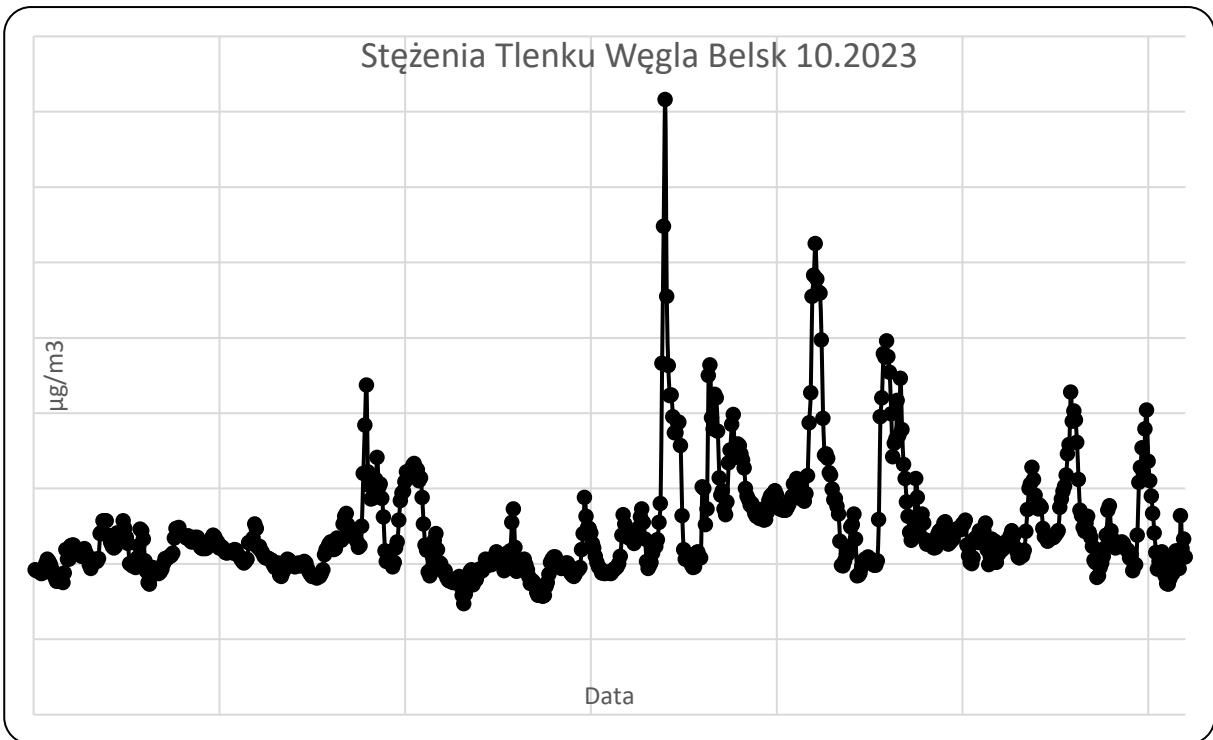
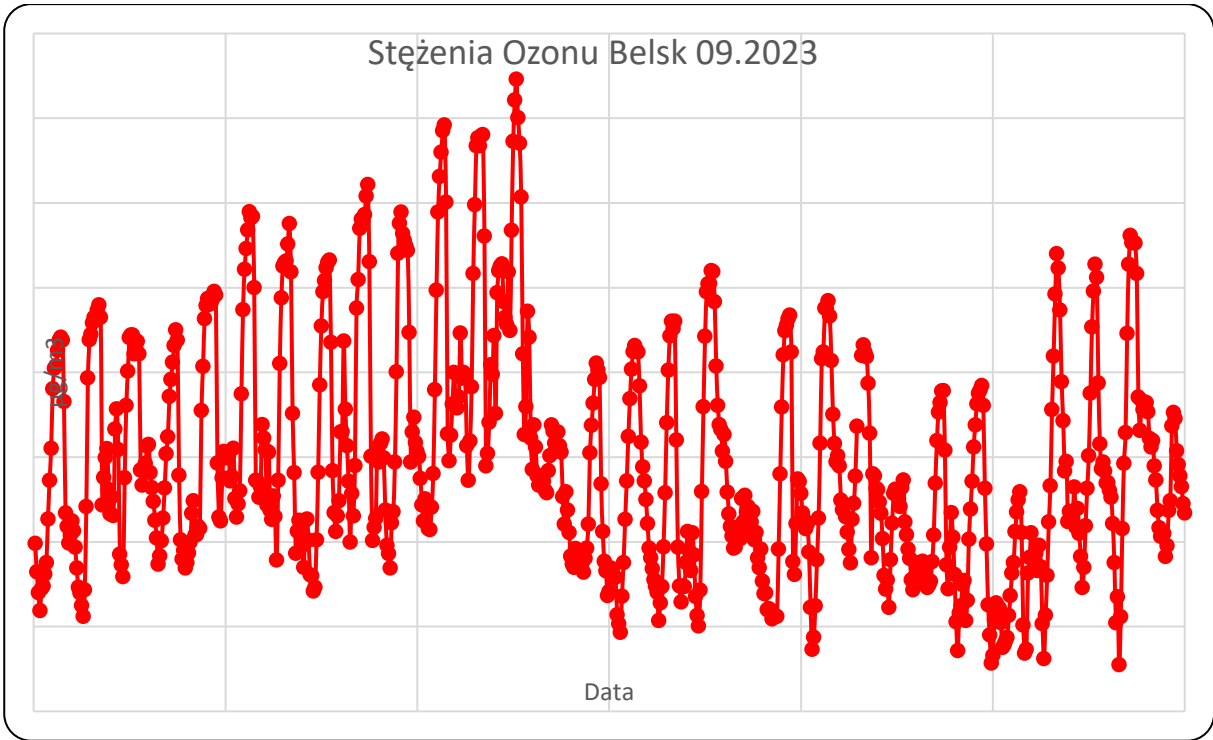




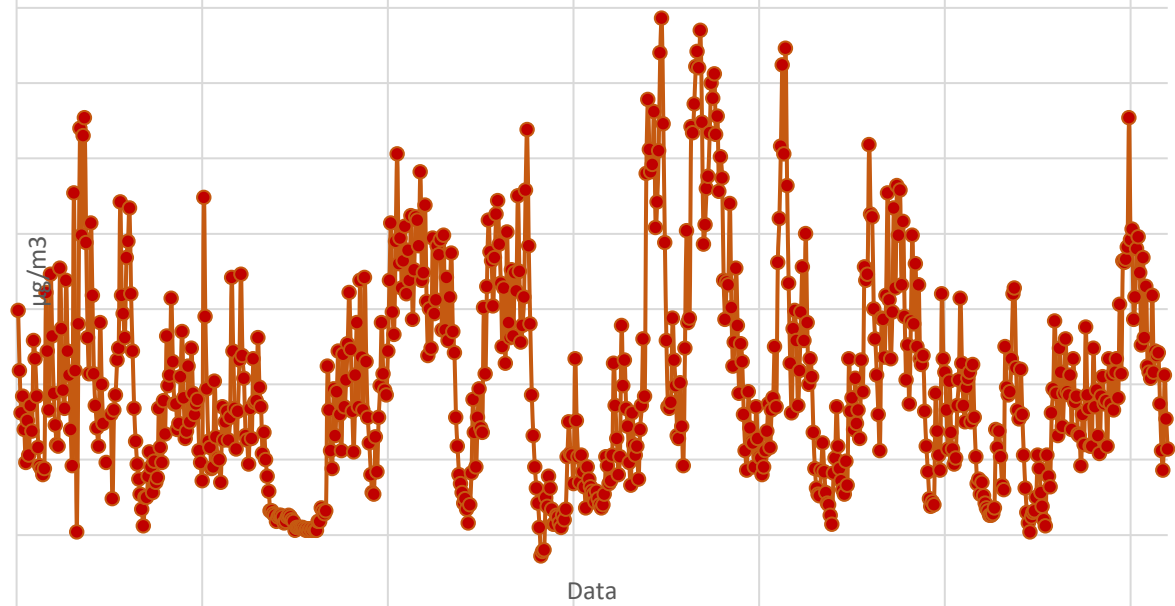




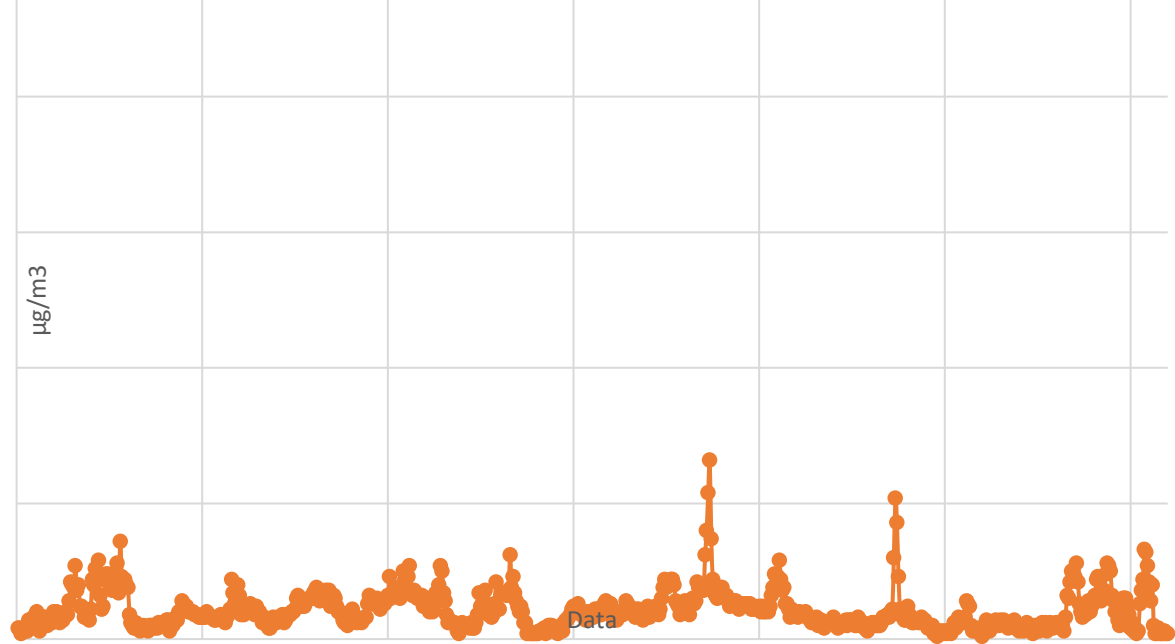


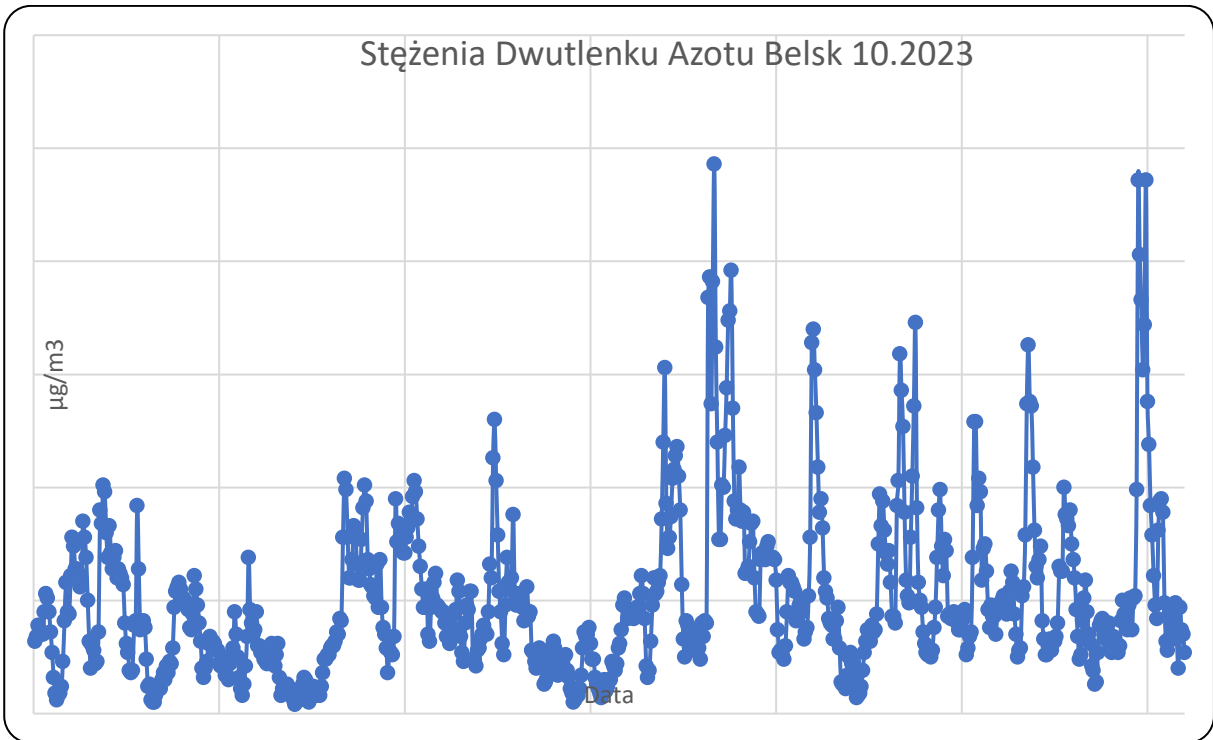
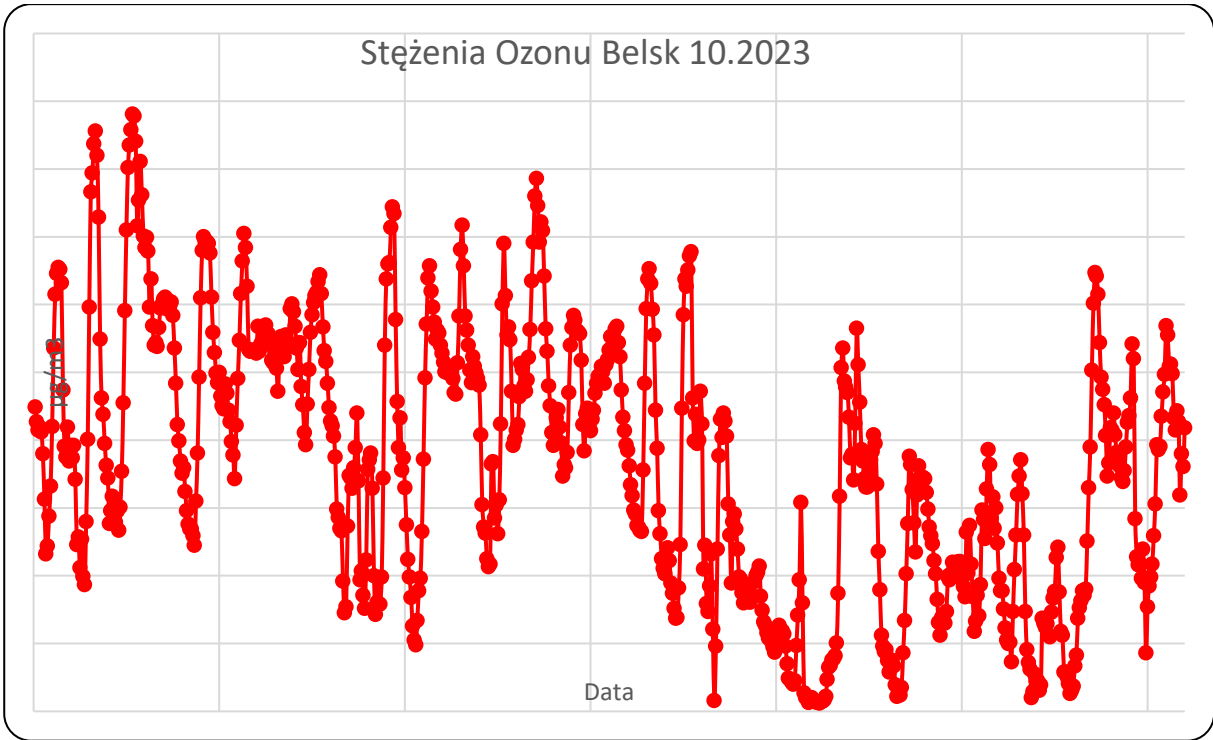


Stężenia Pyłu zawieszzonego PM10 Belsk 10.2023

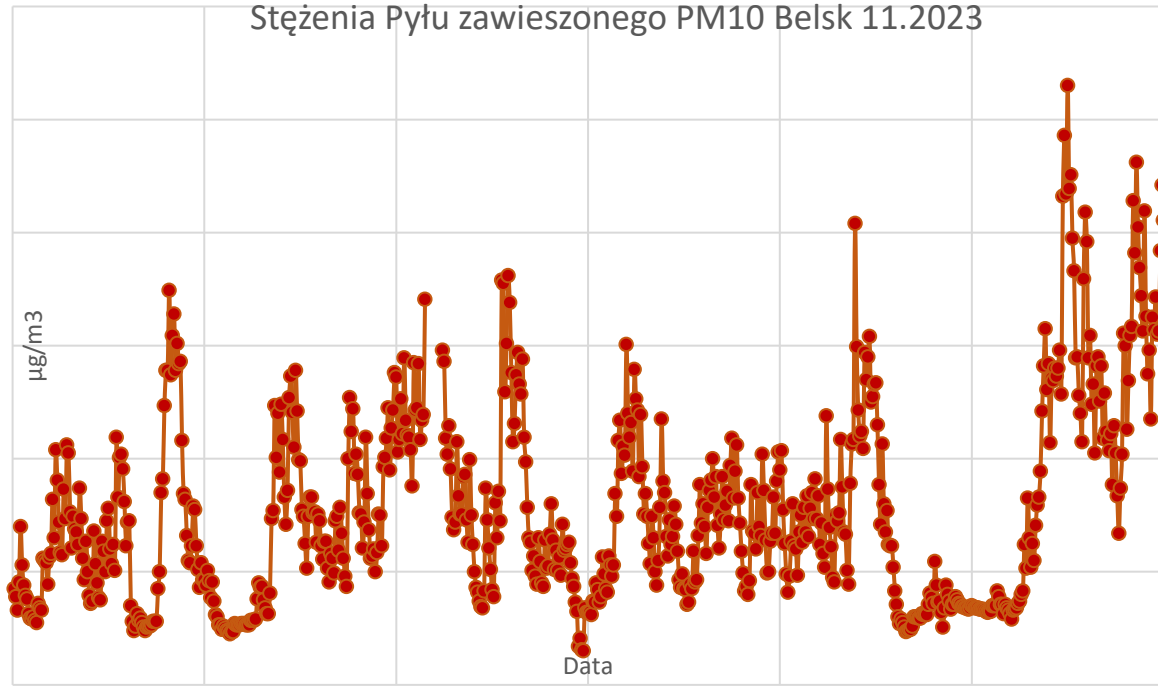


Stężenia Dwutlenku Siarki Belsk 10.2023

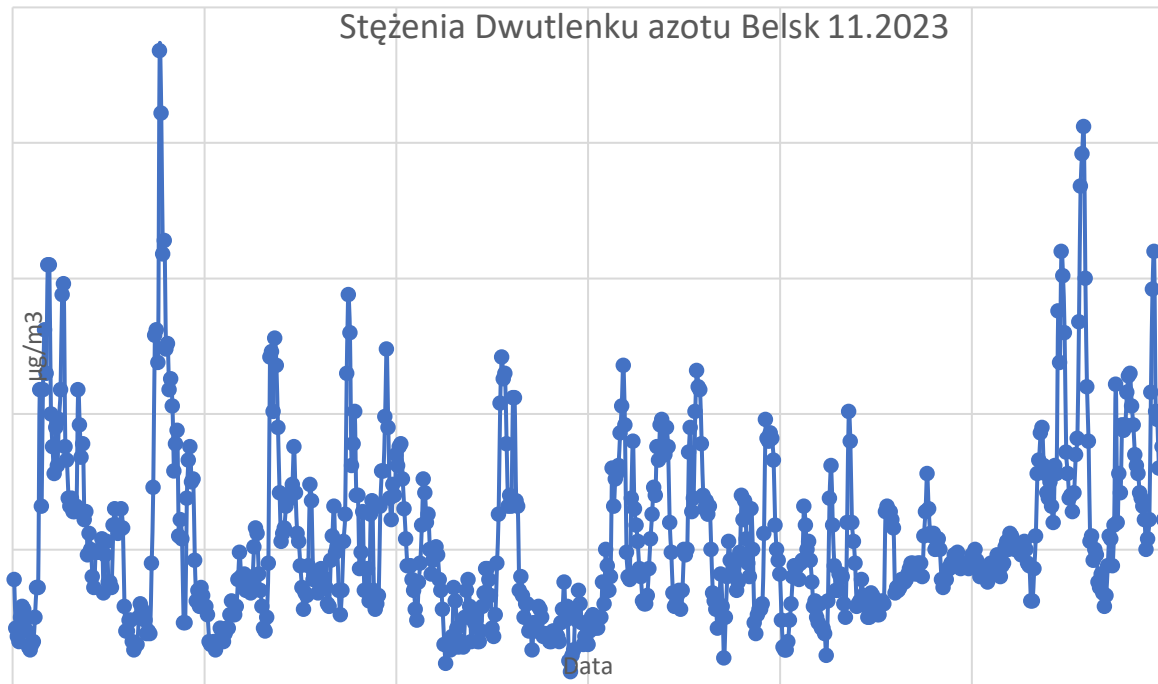


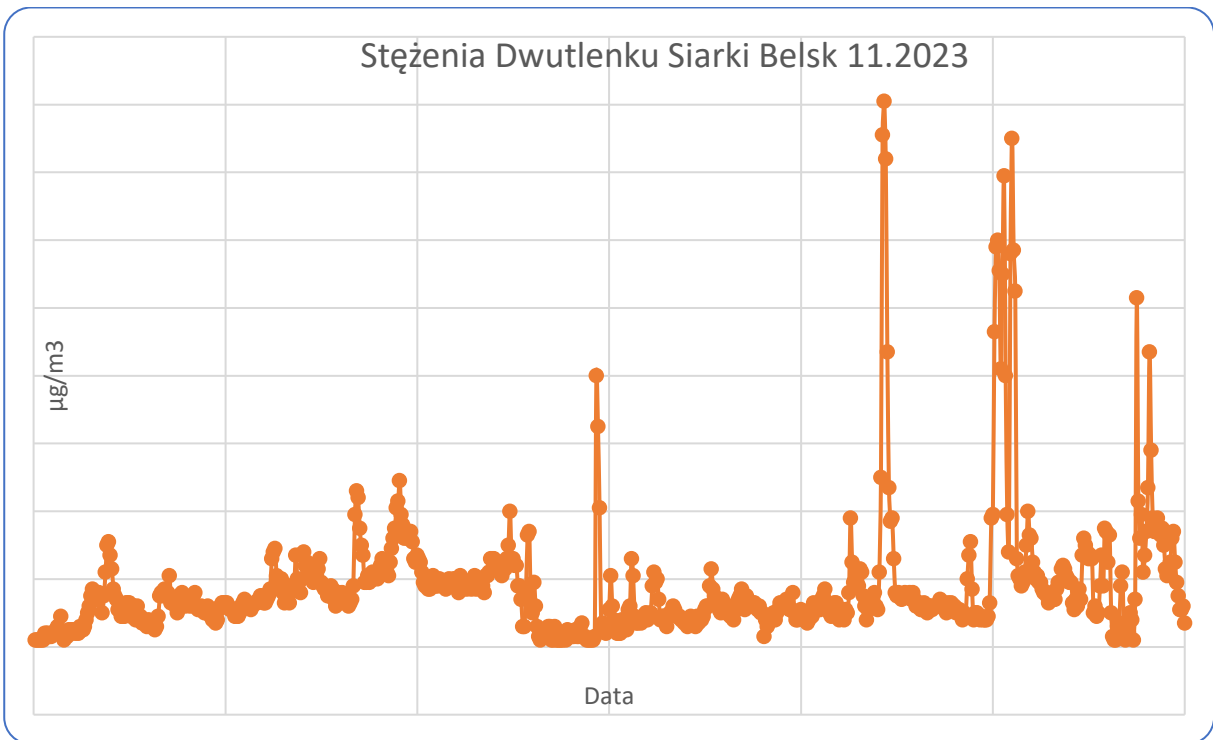
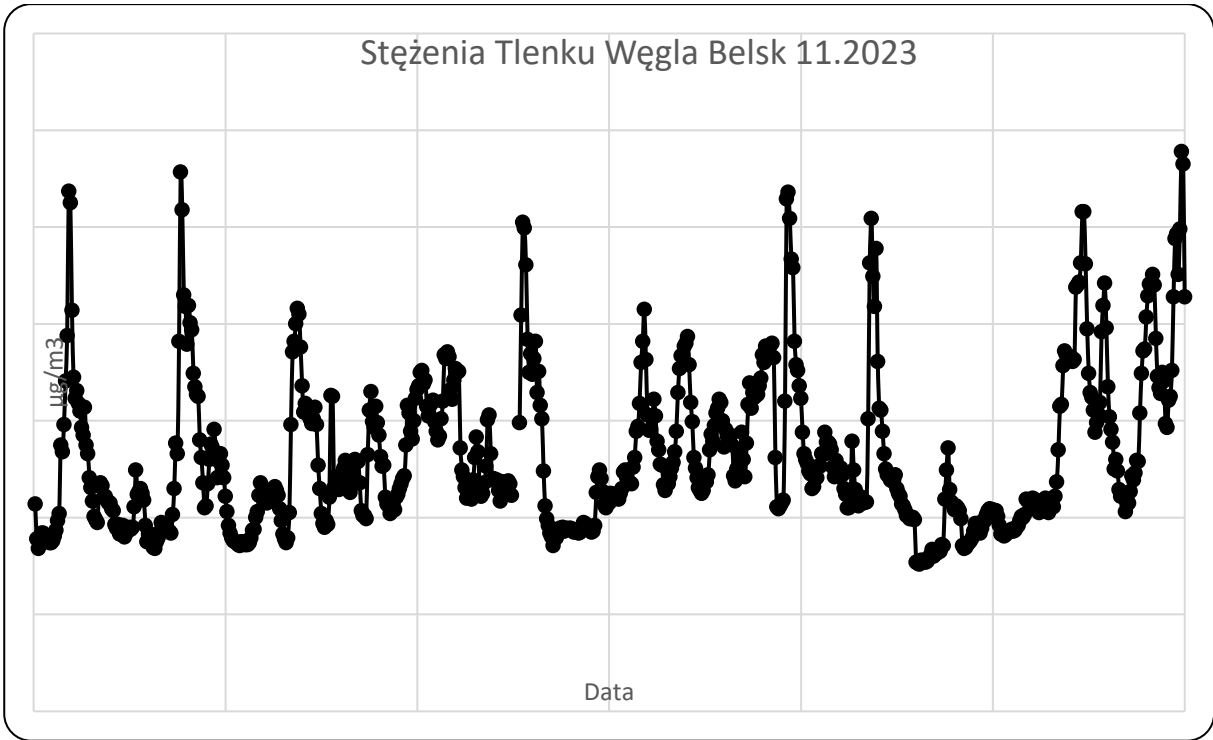


Stężenia Pyłu zawieszzonego PM10 Belsk 11.2023

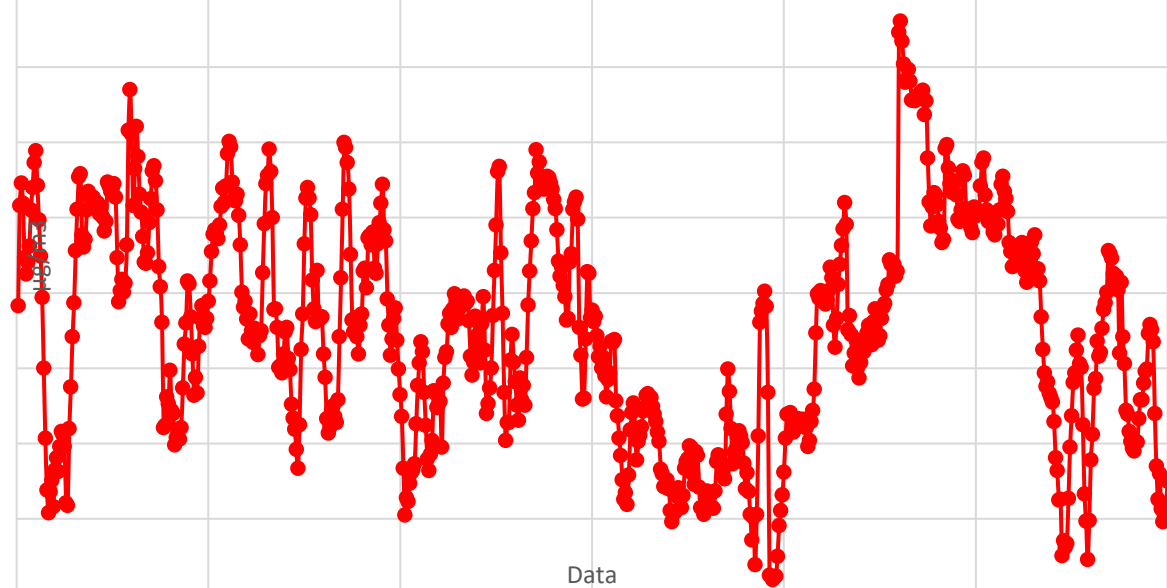


Stężenia Dwutlenku azotu Belsk 11.2023

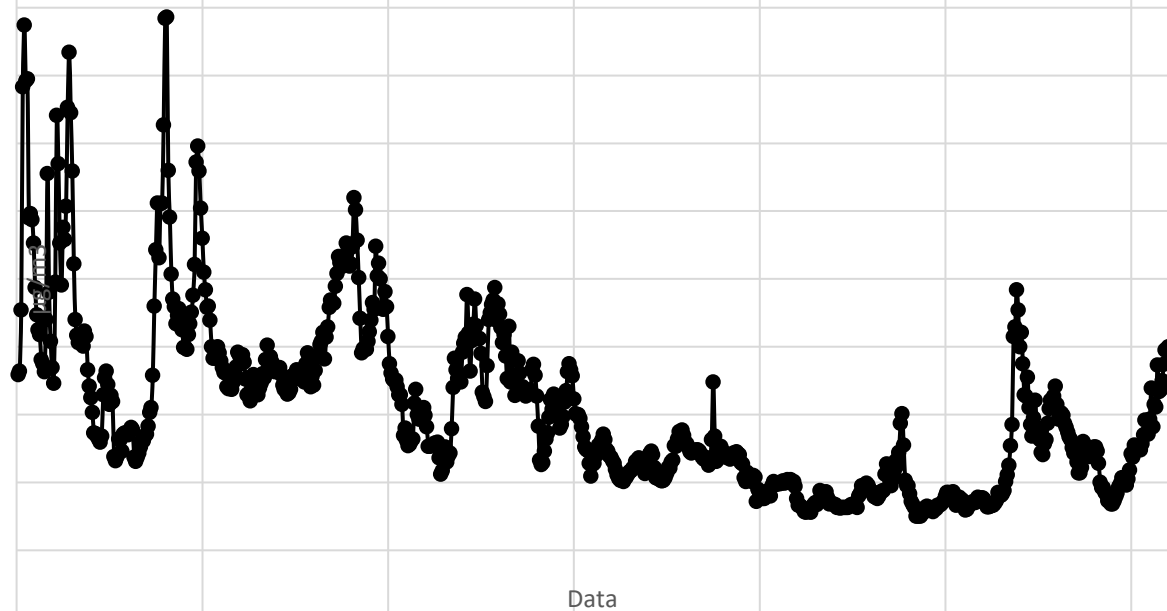




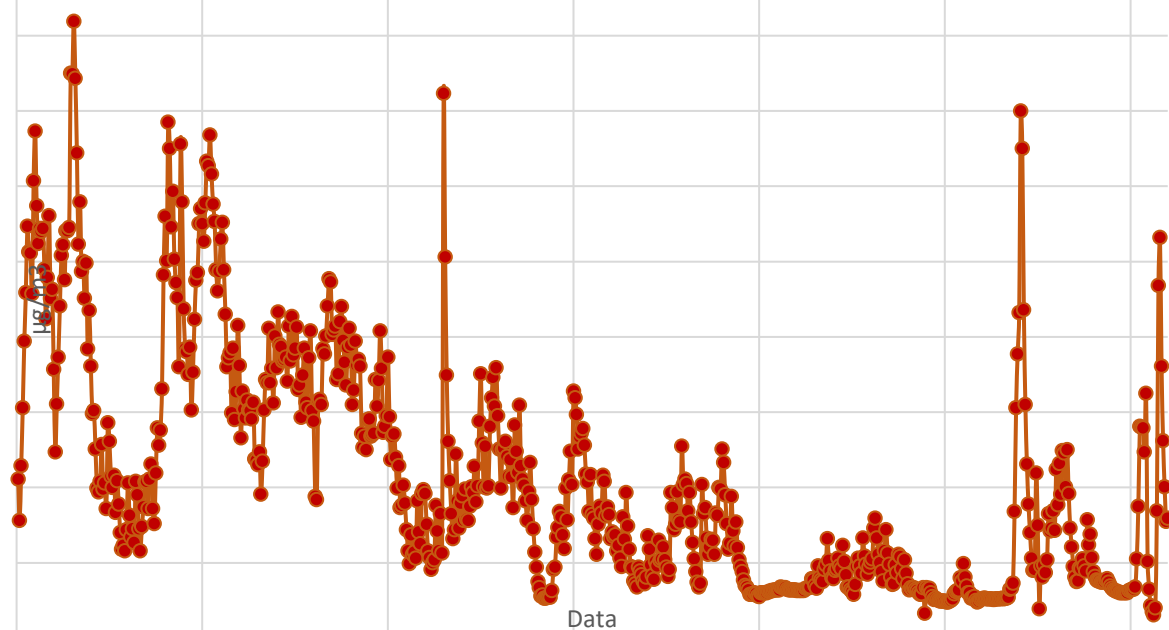
Stężenia Ozonu Belsk 11.2023



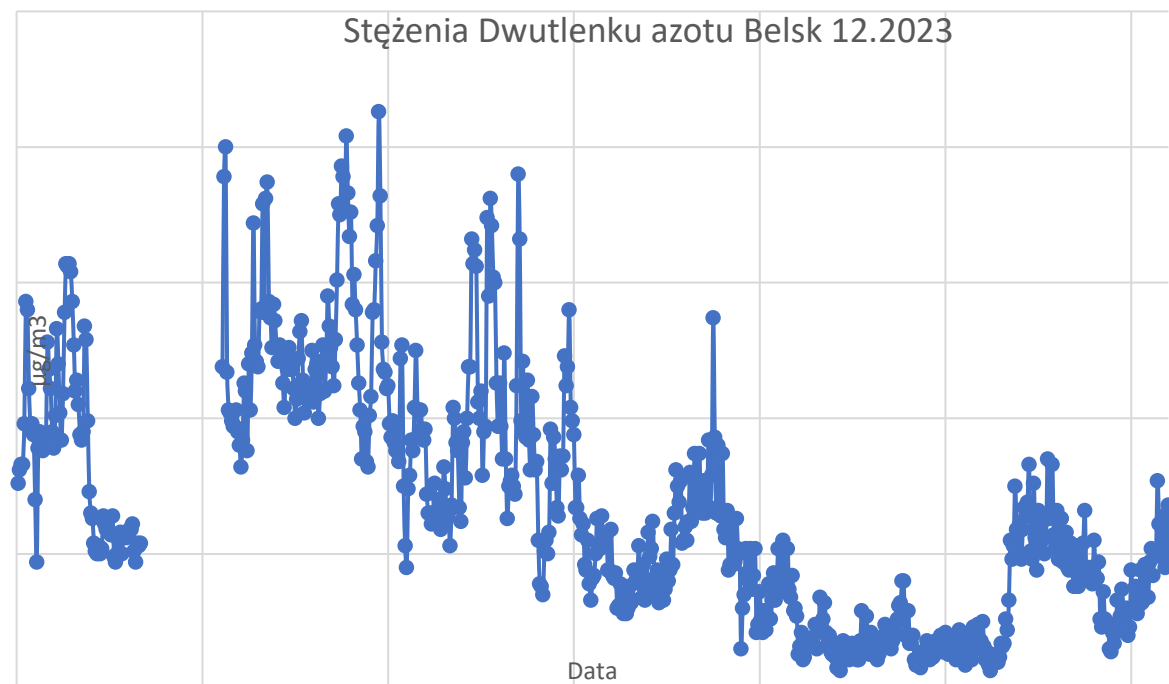
Stężenia Tlenku Węgla Belsk 12.2023

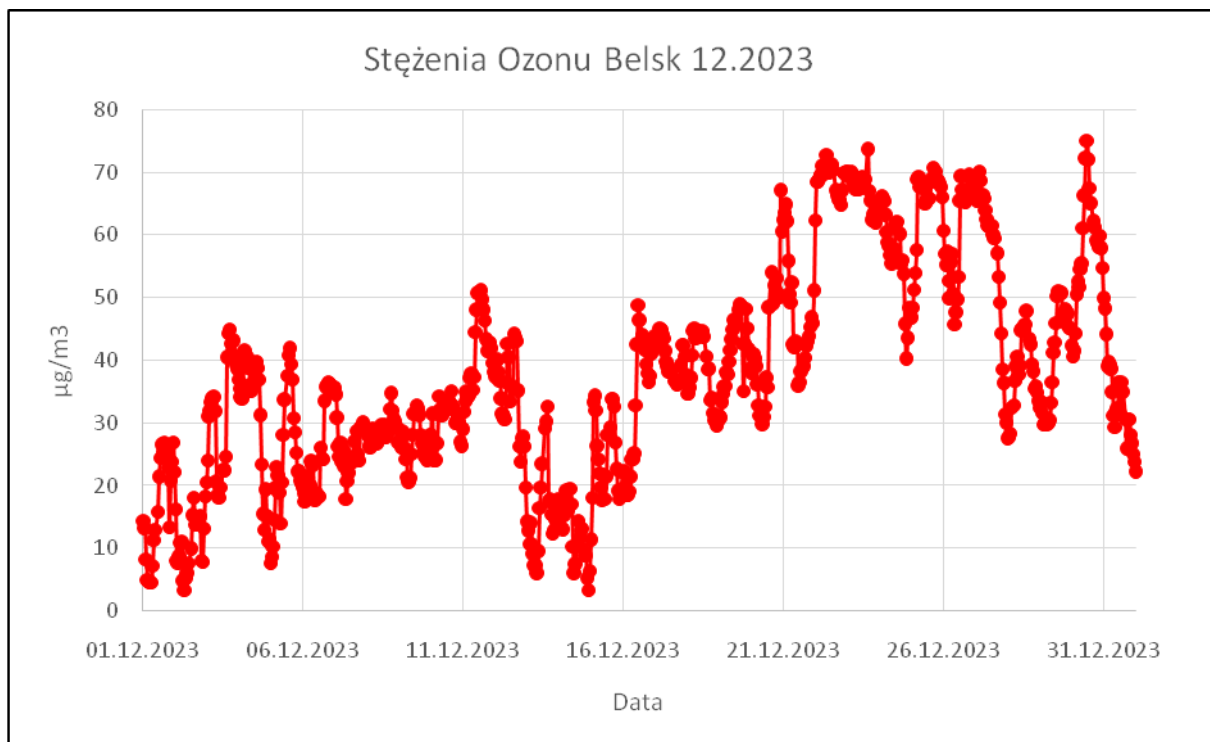
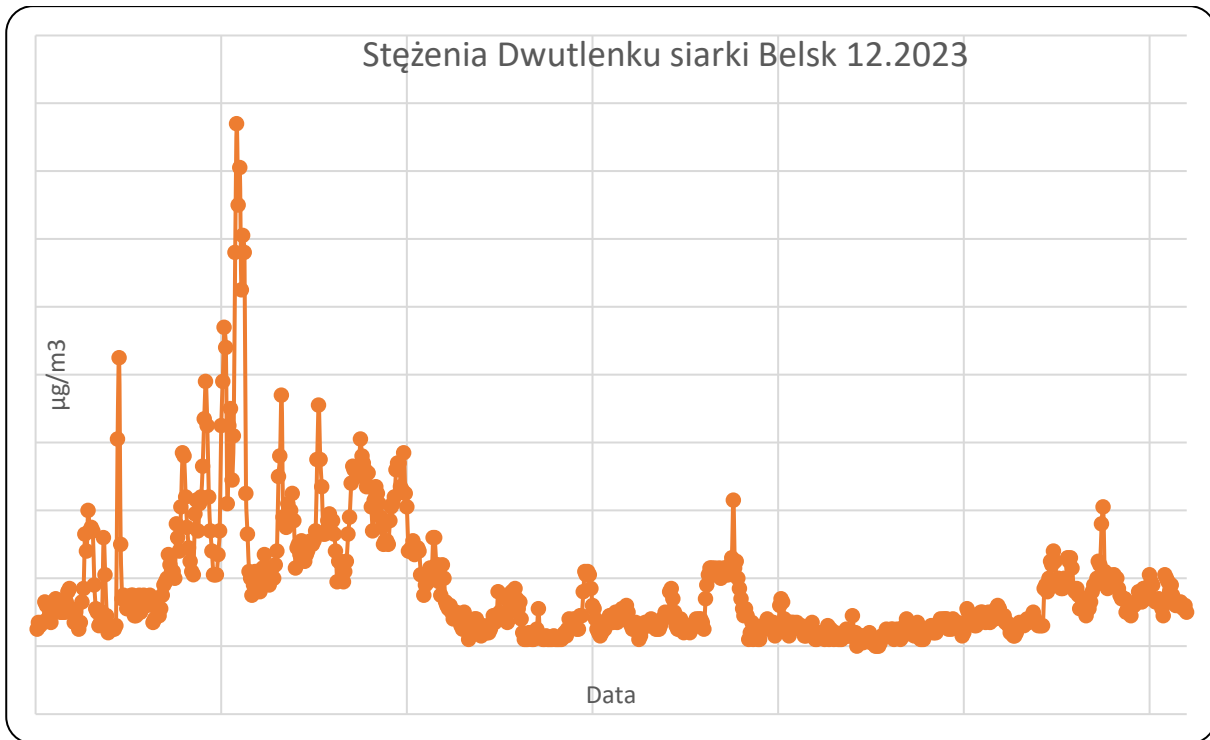


Stężenia Pyłu zawieszonego PM10 Belsk 12.2023



Stężenia Dwutlenku azotu Belsk 12.2023





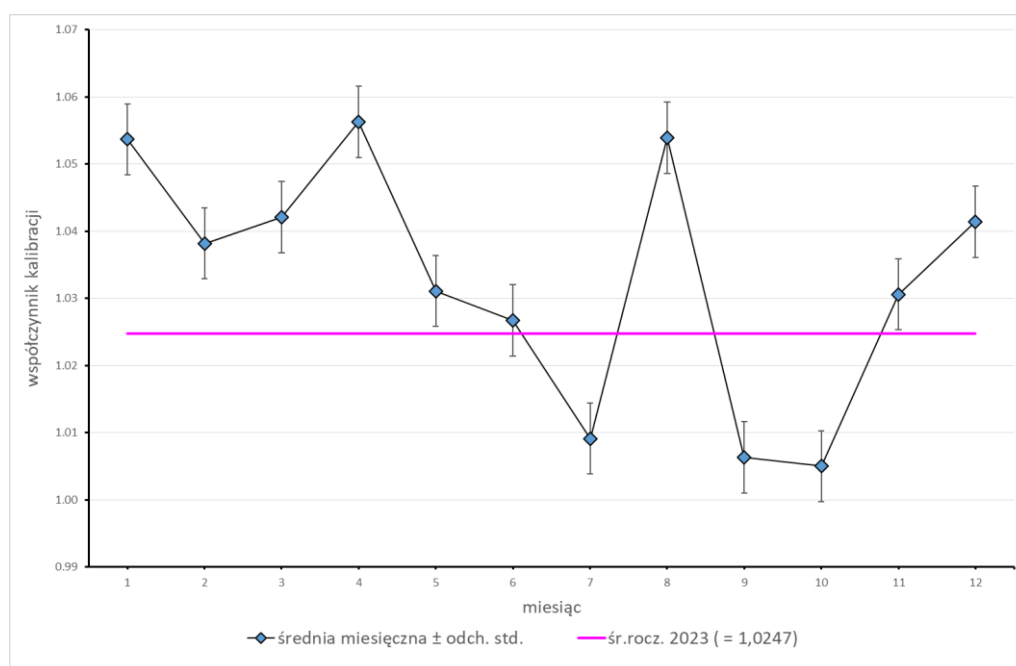
3. Nadfioletowe promieniowanie słoneczne UV-B

Aleksander Pietruczuk, Jakub Wink, Piotr Sobolewski

W roku 2023 w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Instytutu Geofizyki PAN (COG) w Belsku kontynuowano monitoring promieniowania ultrafioletowego Słońca w zakresie erytemalnym (UV-B) oraz czasu usłonecznienia. Wykonane pomiary były podstawą do wyznaczenia dawek dobowych napromienienia promieniowaniem o skuteczności erytemalnej (tzw. napromienienie erytemalne) oraz indeksu UV, który określa maksymalną moc napromienienia erytemalnego zarejestrowaną danego dnia.

Pomiary promieniowania słonecznego w zakresie ultrafioletu prowadzone są w obserwatorium w Belsku od połowy lat siedemdziesiątych. W latach 1976 – 1994 pomiary te wykonywane były przy pomocy miernika Robertsona-Bergera (R-B). Od roku 1993 monitoring promieniowania UV-B prowadzony jest przy pomocy mierników firmy Solar Light Co., Filadelfia, USA. Jeden rok wspólnej pracy miernika R-B i UV-biometru firmy Solar Light (SL) posłużył do zapewnienia ciągłości i homogeniczności serii pomiarowej. W sierpniu 2013 miernik SL 501A o numerze seryjnym 2011 zastąpiono identycznym urządzeniem o numerze seryjnym 20233. Równolegle do pomiarów miernikiem SL od 2006 r. używano miernika UVS-AE-T firmy Kipp & Zonen (K&Z). Pozwoliło to na wykorzystanie danych z tego miernika do sporządzenia niniejszego raportu zamiast danych z miernika SL, który uległ awarii w połowie roku 2015. Od tego roku miernik K&Z jest podstawowym miernikiem do monitoringu promieniowania UV w COG Belsk.

Przez cały rok wyniki uzyskiwane z detektora Kipp&Zonen poddawane są bieżącej kontroli, która polega na porównywaniu wartości chwilowych mocy promieniowania UVB uzyskiwanych z detektora Kipp & Zonen oraz ze spektrofotometru Brewera nr 064. Spektrofotometr Brewera jest regularnie wzorcowany przez standard światowy Brewer Nr. 17, co zapewnia wysoką dokładność pomiarów UV. W celu zapewnienia większej dokładności do porównań wybierano dni pogodne - całkowicie bądź częściowo bezchmurne. Jako kryterium wyboru dni do porównania wykorzystywano dane uzyskiwane z detektora usłonecznienia CSD-11. Współczynnik kalibracyjny wyznaczano metodą regresji liniowej zależności mocy promieniowania uzyskiwanego z miernika K&Z oraz spektrofotometru Brewera. Zmienność roczna współczynnika jest przedstawiona na Rys. 3.1, średnia wartość współczynnika kalibracyjnego dla 2023 wynosiła 1,025. Sezonowe wahania współczynnika kalibracyjnego wynosiły $\pm 5\%$.



Rys. 3.1. Zmienność roczna współczynnika kalibracyjnego miernika Kipp&Zonen w 2023 roku.

Wyniki pomiarów dokonanych w roku 2023, dla poszczególnych miesięcy, przedstawiono w Tabeli 3.1 w postaci dawek dobowych oraz indeksu UV. Dawki dobowe wyrażone są w SED (Standard Erytema Dose). 1 SED jest równy 100 J/m^2 promieniowania efektywnego erytemalnie (tj. wywołującego rumień na skórze). Jednostka SED jest proponowana przez *International Organization for Standardization* (ISO) zgodnie ze standardem ISO 17166:1999 w miejsce jednostki MED. Indeks UV jest iloczynem maksymalnej mocy promieniowania UV [W/m^2] zmierzonej danego dnia i czynnika $40 \text{ [m}^2/\text{W}]$. Jest to bezwymiarowy parametr

określający maksymalną zarejestrowaną moc promieniowania UV-B, a jego wartość zawiera się w przedziale od 0 do 16.

Tabela 3.1. Dawki dzienne napromienienia erytemalnego i indeks UV zmierzone w Belsku w 2023 roku

Month	I		II		III	
Day	UV - B [SED]	Indeks UV	UV - B [SED]	Indeks UV	UV - B [SED]	Indeks UV
1	1.5	0.4	1.7	0.7	7.1	1.5
2	1.4	0.4	1.0	0.4	2.3	0.5
3	1.0	0.3	1.8	0.6	3.2	1.1
4	1.3	0.4	3.0	0.8	1.8	0.5
5	1.0	0.4	2.9	0.8	2.5	0.6
6	0.5	0.1	3.7	0.9	4.2	1.0
7	1.1	0.4	2.7	0.7	6.0	1.7
8	0.7	0.2	4.0	1.2	7.4	1.9
9	0.6	0.2	5.1	1.2	4.4	1.3
10	0.6	0.2	3.1	0.8	6.7	1.9
11	1.4	0.4	1.6	0.5	2.0	0.5
12	1.6	0.5	6.2	1.6	7.6	2.1
13	0.9	0.3	3.3	1.1	6.3	2.0
14	1.2	0.4	3.1	0.8	6.9	2.0
15	0.4	0.1	1.9	0.4	7.0	1.8
16	1.1	0.3	5.7	1.4	7.2	2.2
17	1.0	0.2	1.9	0.6	10.0	2.2
18	0.4	0.1	3.6	1.1	11.2	2.3
19	0.4	0.1	3.2	1.0	10.7	2.4
20	0.6	0.2	1.9	0.6	8.1	2.1
21	0.6	0.2	4.1	1.4	5.3	1.6
22	0.7	0.2	3.2	0.7	7.8	1.8
23	0.7	0.2	5.5	1.3	10.9	3.2
24	1.1	0.3	1.7	0.7	8.8	2.6
25	0.6	0.2	3.0	1.0	10.2	2.9
26	1.0	0.3	1.7	0.4	8.9	2.9
27	1.9	0.7	5.5	1.5	7.3	2.5
28	0.5	0.2	8.4	1.8	6.6	2.5
29	2.3	0.8			14.1	2.7
30	1.3	0.5			8.3	2.9
31	2.3	0.6			10.7	3.3
Mean	1.03	0.3	3.38	0.9	7.14	2.0
Dev	-26%		4%		-7%	

Month	IV		V		VI	
Day	UV - B [SED]	Indeks UV	UV - B [SED]	Indeks UV	UV - B [SED]	Indeks UV
1	7.3	2.3	27.7	4.9	37.2	6.2
2	3.4	1.2	19.8	4.8	11.9	5.1
3	14.0	3.5	24.3	5.3	37.7	6.3
4	11.3	3.4	23.5	4.6	36.3	6.0
5	8.2	1.5	18.5	4.8	36.0	6.0
6	5.6	1.2	6.4	1.3	33.7	6.1
7	3.7	0.9	8.2	1.7	32.9	5.9
8	16.5	3.4	27.1	5.3	35.6	5.8
9	13.3	3.3	28.1	4.8	28.9	6.2
10	17.5	3.5	28.1	4.8	31.9	5.8
11	17.5	3.5	27.3	4.6	32.9	5.6
12	8.8	2.6	26.4	4.5	29.8	5.8
13	21.5	4.2	24.8	4.8	11.0	2.6
14	18.7	3.7	26.8	4.7	17.8	4.2
15	8.2	2.6	5.4	1.3	29.3	6.4
16	11.8	3.3	-	-	32.5	6.2
17	10.0	2.9	6.5	1.4	28.7	6.2
18	12.5	3.9	16.5	3.4	23.4	5.8
19	6.5	1.9	9.1	2.8	32.1	5.8
20	15.3	3.8	30.8	6.0	34.5	5.9
21	21.4	3.8	34.0	5.6	21.5	4.8
22	22.1	4.3	32.8	6.0	39.2	6.7
23	23.7	4.3	32.4	5.9	20.2	5.5
24	15.8	4.0	27.1	5.7	18.4	3.7
25	7.2	1.8	20.7	4.9	35.5	5.8
26	15.3	4.6	28.4	5.6	37.3	6.0
27	14.3	3.6	33.2	5.7	29.4	5.5
28	19.9	4.5	34.3	5.9	28.5	5.9
29	21.3	4.7	33.8	5.7	35.7	5.7
30	26.4	4.9	32.9	5.8	31.1	5.8
31			37.5	6.3		
Mean	13.96	3.2	24.41	4.6	29.69	5.6
Dev	-5%		4%		4%	

Month	VII		VIII		IX	
Day	UV - B [SED]	Indeks UV	UV - B [SED]	Indeks UV	UV - B [SED]	Indeks UV
1	23.6	5.4	14.5	3.8	20.1	4.2
2	22.4	6.2	26.7	6.0	19.5	4.2
3	34.4	7.0	10.8	2.0	19.0	3.9
4	37.2	6.4	30.0	7.0	22.8	5.5
5	35.6	6.3	8.4	5.3	26.6	5.1
6	27.4	6.0	25.3	6.4	24.3	4.6
7	33.5	6.8	24.1	6.2	20.6	4.3
8	39.3	6.9	28.9	6.3	21.0	4.3
9	39.8	6.7	21.7	5.7	19.7	4.0
10	34.0	7.1	29.4	5.9	21.9	4.4
11	29.7	7.5	31.6	6.2	21.4	4.2
12	28.1	6.4	35.8	6.4	19.0	3.8
13	20.1	5.8	32.2	6.2	18.0	3.7
14	34.9	5.8	27.3	7.0	9.8	3.8
15	37.5	6.4	34.7	6.2	20.8	4.1
16	38.8	7.1	30.1	6.1	20.8	4.2
17	25.0	8.0	29.0	5.8	19.1	3.9
18	39.7	6.8	26.4	5.6	17.8	3.7
19	34.3	6.4	26.8	5.4	4.7	1.4
20	15.1	6.5	27.6	5.8	18.5	3.8
21	30.7	6.1	27.4	6.0	18.4	3.7
22	30.5	6.0	31.7	6.1	14.7	3.4
23	28.5	6.5	31.3	5.7	5.5	1.7
24	27.6	6.5	27.2	5.5	12.6	3.2
25	30.0	6.2	15.3	5.0	15.0	3.1
26	11.0	3.5	24.5	5.8	7.7	2.3
27	29.8	5.7	25.0	5.7	14.5	3.0
28	16.8	5.7	11.4	4.1	14.5	2.9
29	31.4	6.1	18.7	5.3	13.2	2.7
30	29.1	6.0	6.4	2.2	4.4	1.3
31	25.7	6.1	18.7	4.5		
Mean	29.72	6.3	24.48	5.5	16.86	3.6
Dev	8%		10%		30%	

Month	X		XI		XII	
Day	UV - B [SED]	Indeks UV	UV - B [SED]	Indeks UV	UV - B [SED]	Indeks UV
1	8.6	2.4	3.8	1.2	1.8	0.6
2	11.8	2.7	5.5	1.3	1.2	0.4
3	13.4	2.9	2.2	0.9	-	-
4	6.3	2.0	3.9	1.1	2.5	0.7
5	8.1	2.3	2.0	0.6	2.9	0.7
6	8.9	2.6	4.1	1.3	0.8	0.3
7	3.3	1.8	2.9	0.9	0.9	0.3
8	10.1	2.2	2.0	0.6	1.0	0.4
9	4.3	1.1	3.4	0.9	0.8	0.3
10	10.1	2.2	2.8	0.8	1.2	0.4
11	8.0	2.0	1.3	0.5	0.7	0.3
12	4.8	2.0	1.8	0.5	0.4	0.1
13	6.9	2.2	2.8	0.7	0.7	0.2
14	6.4	2.0	2.1	0.7	0.3	0.1
15	4.4	1.3	1.8	0.7	1.0	0.4
16	4.1	1.4	2.2	0.6	0.6	0.4
17	7.2	1.7	0.7	0.2	0.4	0.1
18	7.1	1.6	1.5	0.5	0.7	0.3
19	4.2	1.2	1.4	0.5	1.1	0.4
20	1.4	0.5	1.3	0.6	0.5	0.2
21	4.3	1.7	0.9	0.4	0.4	0.2
22	1.6	0.5	2.7	0.7	0.9	0.3
23	3.7	1.2	0.6	0.2	0.8	0.3
24	4.8	1.4	1.4	0.4	1.2	0.4
25	1.3	0.5	0.9	0.3	1.1	0.5
26	2.1	1.0	1.8	0.5	0.8	0.3
27	4.4	1.1	1.3	0.5	1.2	0.4
28	1.7	0.6	1.2	0.3	1.0	0.3
29	4.9	1.2	0.8	0.2	1.3	0.4
30	4.4	1.0	1.0	0.3	1.0	0.3
31	2.4	1.1			1.5	0.4
Mean	5.63	1.6	2.07	0.6	0.97	0.3
Dev	-5%		8%		3%	

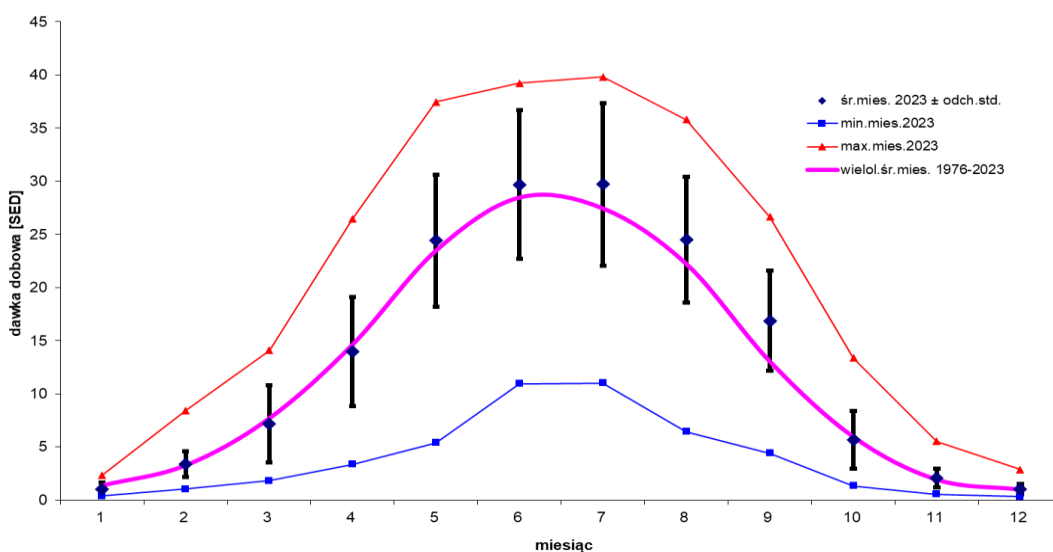
Tabela 3.2 zawiera średnie i ekstremalne wartości danych UV, usłonecznienia i ozonu

dla poszczególnych miesięcy. Kolumny 2 do 4 zawierają odpowiednio średnią, minimalną i maksymalną wartość dawek dobowych napromienienia erytemalnego, kolumna 5 zawiera średnią wartość indeksu UV, kolumna 6 - usłonecznienia, kolumna 7 - średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu, kolumna 8 - średnie wieloletnie (1976-2022) dawek napromienienia erytemalnego, kolumna 9 - odchylenie (w %) dawek napromienienia w bieżącym roku od średniej wieloletniej.

Tabela 3.2. Średnie miesięczne wartości dziennych natężenia UV, usłonecznienia i ozon

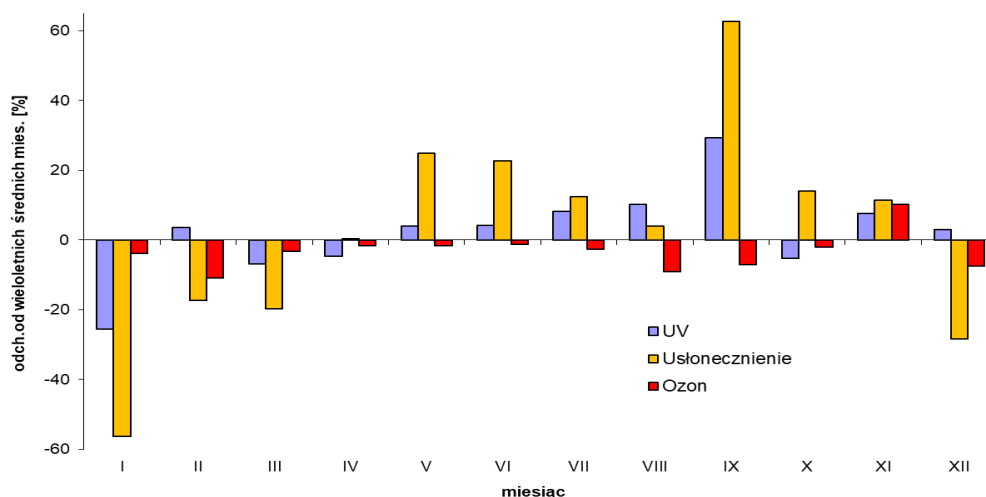
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	UV-B	UV-B	UV-B	Indeks UV	US	OZON	UV-B	odch.
							1976-2022	
2023	[SED]	[SED]	[SED]		[Godz.]	[D]	[SED]	
M	średnia	min.	max.	średnia	średnia	średnia	średnia	[%]
1	1,03	0,39	2,34	0,32	0,6	325	1,38	-25,47
2	3,38	1,03	8,44	0,93	1,8	329	3,27	3,55
3	7,14	1,81	14,09	1,95	2,9	368	7,67	-6,94
4	13,96	3,35	26,44	3,24	5,5	375	14,63	-4,59
5	24,41	5,40	37,45	4,63	9,2	361	23,48	3,94
6	29,69	10,95	39,24	5,64	9,6	347	28,47	4,26
7	29,72	11,01	39,81	6,32	8,8	328	27,45	8,27
8	24,48	6,42	35,80	5,52	7,8	288	22,21	10,22
9	16,86	4,39	26,63	3,61	7,8	278	13,04	29,29
10	5,63	1,33	13,35	1,59	3,8	280	5,95	-5,25
11	2,07	0,56	5,53	0,63	1,6	315	1,92	7,71
12	1,02	0,32	2,87	0,35	0,7	283	0,99	2,93

Na Rys. 3.2 przedstawiono średnie miesięczne dawki dobowe napromienienia erytemalnego w 2023 r. wraz z odchyleniami standardowymi w odniesieniu do średnich wieloletnich oraz maksymalne i minimalne wartości dawek dobowych, zarejestrowanych w kolejnych miesiącach roku. Na Rys. 3.3 przedstawione zostały odchylenia procentowe zarejestrowanych w 2023 roku średnich w miesiącu dawek dobowych napromienienia erytemalnego od średniej wieloletniej (1976-2022) w kolejnych miesiącach roku. Na tym samym rysunku przedstawiono także odchylenia procentowe zarejestrowanych w roku 2023 średnich miesięcznych wartości usłonecznienia i koncentracji ozonu od ich średnich wieloletnich.



Rys. 3.2. Średnie miesięczne dawki dobowe napromienienia erytemalnego oraz największe i najmniejsze wartości zarejestrowane dla danego miesiąca Belsk 2023.

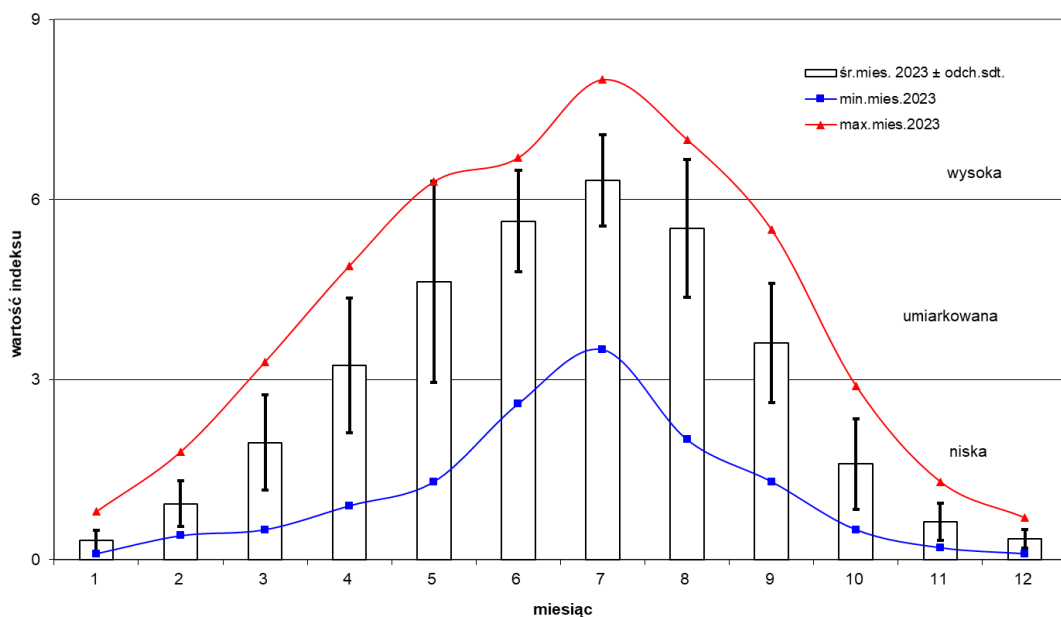
Rok 2023 w porównaniu z poprzednim, charakteryzował się mniejszą zmiennością odchyleń od średniej wieloletniej. Największe niedobory napromienienia erytemalnego w 2023 zanotowano w styczniu i wynosiły one ponad 25%, niedobór wynoszący 7% wystąpił w marcu a niedobory wynoszące blisko 5% zanotowano w kwietniu i październiku. Większość tych niedoborów wiąże się z wystąpieniem nadwyżek w średnich stężeniach ozonu w danych miesiącach jak i niskim usłonecznieniem. Natomiast większość nadwyżek promieniowania UV wiąże się głównie z nadwyżkami usłonecznienia, a we wrześniu z dość dużą nadwyżką usłonecznienia, wynoszącą blisko 30% oraz ze zmniejszoną zawartością ozonu, wynoszącą 7%.



Rys. 3.3. Odchylenie od średniej wieloletniej dawek miesięcznych napromienienia erytemalnego, usłonecznienia oraz koncentracji ozonu Belsk 2023.

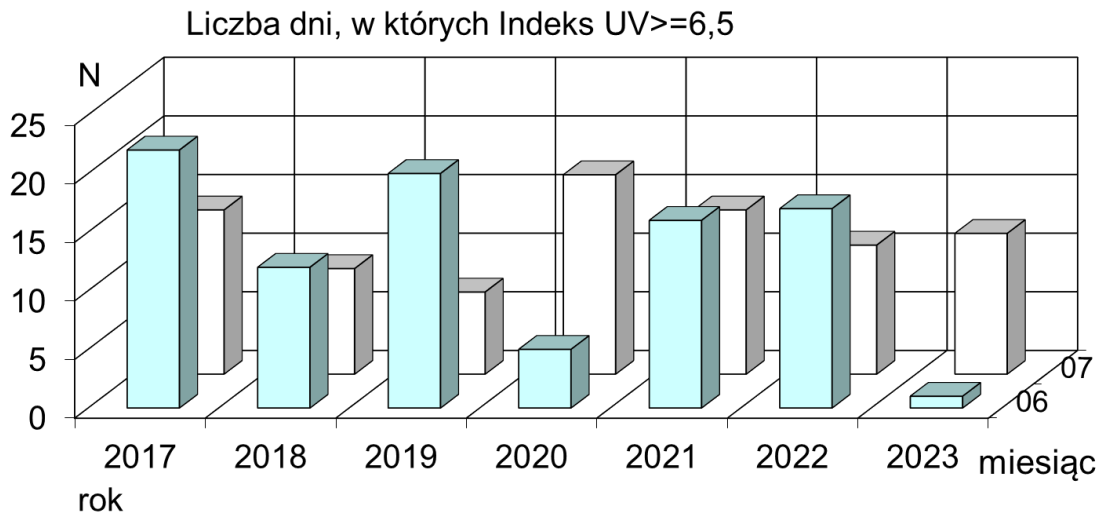
Na Rys. 3.4 przedstawiono średnie miesięczne indeksu UV wraz z odchyleniami standardowymi oraz wartości ekstremalne zarejestrowane w danym miesiącu. Największe wartości indeksu UV zanotowano w miesiącach letnich co wiąże się z małymi kątami zenitalnymi Słońca.

Warto zwrócić uwagę na prezentowane wartości maksymalne i minimalne. Na uwagę zasługuje czerwiec, z nieco mniejszą wartością maksymalną niż zwykle. Wartość minimalna dla lipca jest o ponad połowę wyższa niż w roku poprzednim a wartość minimalna dla sierpnia prawie o połowę niższa.



Rys. 3.4 Średnie miesięczne indeksu UV oraz największe i najmniejsze wartości zarejestrowane danego miesiąca Belsk 2023.

Największą wartość indeksu UV wynoszącą 8 zarejestrowano 17 lipca. Wartość indeksu większa lub równa 6,5 została przekroczona tylko 13 razy, w porównaniu do 28 razy w roku ubiegłym. Wartość indeksu 7 i więcej była zanotowana 5 razy, czyli o 4 razy mniej niż w roku ubiegłym. Liczba dni z indeksem równym lub większym od 6,5 jest więc sporo mniejsza niż w roku ubiegłym, a szczególnie w czerwcu, kiedy to zanotowano tylko jedno takie przekroczenie dnia 22 czerwca.



Rys.3.5 Liczba dni danego miesiąca, w których indeks UV przekracza wartość 6,5 Belsk 2023

Podsumowując, w roku 2023 kontynuowano monitoring promieniowania słonecznego z zakresu UV-B w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku. Prowadzono również stałą weryfikację pomiarów przy przez porównanie ich z wynikami ze spektrofotometru Brewera.

W miesiącach letnich, czyli w okresie z największymi rejestrowanymi wartościami indeksu UV i napromienienia erytemalnego, nie rejestrowano znaczących odchyłeń od średniej wieloletniej w lipcu, natomiast w czerwcu wystąpiło tylko jedno przekroczenie indeksu $UV \geq 6,5$. Stanowi to ewenement w historii tych pomiarów bo zazwyczaj takich przekroczeń, w latach ubiegłych, bywało w tym miesiącu co najmniej kilka.

Liczba dni z wysokim indeksem UV dla czerwca była znacznie niższa do tej z lat 2017-2022. Zarejestrowano tylko jeden taki dzień. Dla lipca liczba przekroczeń wyniosła tylko 12 razy i była sporo mniejsza niż w roku ubiegłym. Wartości Indeksu $UV \geq 6,5$ podaje się jedynie dla czerwca i lipca, ponieważ w innych miesiącach takie wartości praktycznie nie występują.

4. Zmiana zawartości ozonu w atmosferze nad Belskiem w 2023 r. **Janusz Krzyścin, Bonawentura Rajewska-Więch**

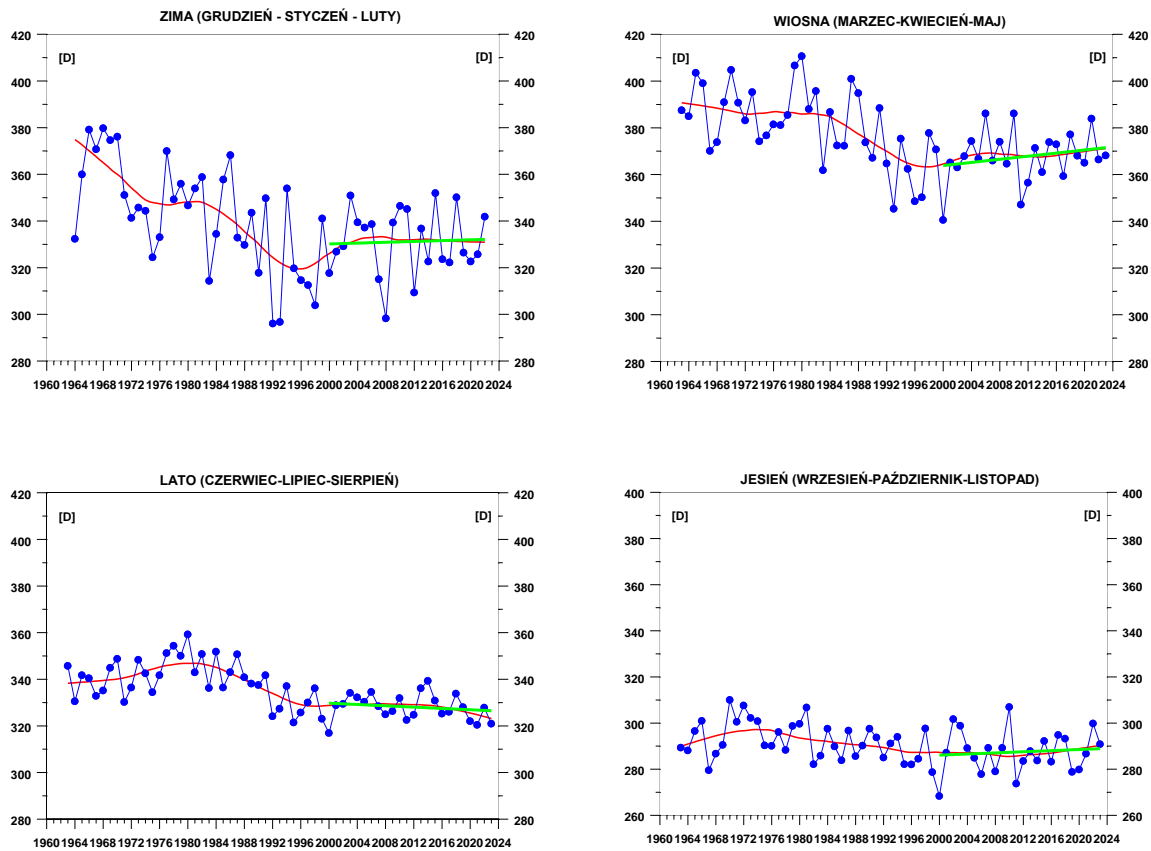
4.1. Całkowita zawartość ozonu w Belsku

W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku w ciągu całego 2023 r. wykonywano pomiary całkowitej zawartości ozonu (CZO₃). Wartości średnich (CZO₃) niższe od wieloletnich (1963–2022) średnich miesięcznych obserwowano w styczniu (3,8%), lutym (11,1%), marcu (3,2%), kwietniu (1,6%), maju (1,6%), czerwcu (1,1%), lipcu (2,7%), sierpniu (9,4%), wrześniu (7,0%), październiku (2,1%) i grudniu (7,5%) (Rys. 1.1.1a). Tylko w listopadzie średnia miesięczna odchyłka CZO₃ od wieloletniej średniej (1963–2022) była dodatnia i wynosiła 10,1%. Wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich przekraczały –10%, zwłaszcza w sezonie zimowym (Rys. 1.1.1). Niskie dzienne wartości CZO₃ w stosunku do średnich wieloletnich pojawiły się lutym, sierpniu, wrześniu i grudniu.

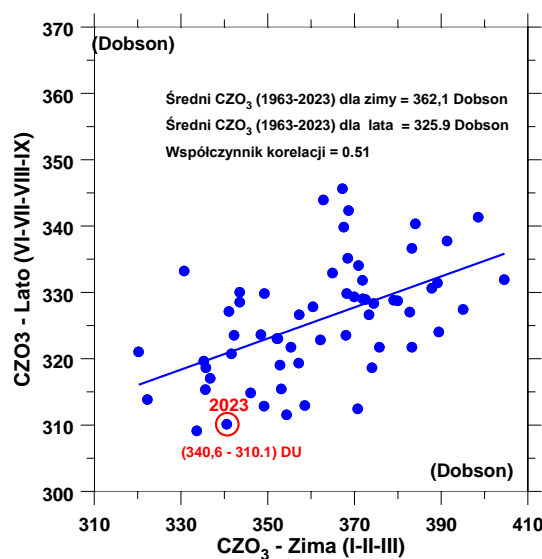
Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO₃ w Belsku (krzywe w kolorze czerwonym na Rys. 4.1.1 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) stwierdzamy, że od połowy lat 90-tych XX wieku następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej rocznej CZO₃. Wyraźna spadkowa tendencja, która pojawiła się z końcem lat 70-tych została zatrzymana około 1996 r. Od tego momentu obserwujemy wzrostową tendencję w średnich rocznych CZO₃, a także w zimowych i wiosennych średnich wartościach CZO₃. Na początku XXI wieku powyższa tendencja zostaje zahamowana i średnie wartości CZO₃ oscylują wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu. Liniowe trendy (proste w kolorze zielonym na Rys. 4.1.1) w danych sezonowych i rocznych CZO₃ są nie istotne statystycznie w okresie 2000–2023. Natomiast stabilizację wartości ozonu na poziomie minimum z połowy lat 90-tych XX wieku obserwujemy w sezonach letnim i jesiennym po 1996 r.

W 2023 r. średnia CZO₃ w okresie czerwiec – wrzesień (310,1 D) była około 4,8% poniżej wieloletniej normy (325,9 D) z okresu 1963–2023. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV przy powierzchni ziemi powinien być wyższy o około 5,3% w stosunku do wieloletniej normy. Wartości CZO₃ w sezonie letnim 2023 wskazują, że wcześniej w sezonie zimowym (styczeń–luty–marzec) poziom CZO₃ był także poniżej średniej wieloletniej (Rys. 4.1.2). W 2023 r. powyższa zimowa średnia wynosiła 340,6 D około 5,9% poniżej wieloletniej normy (362,1 D). Wystąpienie zimą wartości CZO₃ znacznie poniżej wieloletniej normy jest sygnałem osłabienia wielkoskalowej komórki cyrkulacyjnej w stratosferze prowadzącej do wymiany masy między równikiem a biegunem północnym (tzw. cyrkulacja Brewera-Dobsona), która w zimie powoduje akumulację ozonu

w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. Niedobory CZO_3 , które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w całej północnej półkuli poza strefą równikową.



Rys. 4.1.1. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963–2023. Krzywa czerwona przedstawia wygładzone dane, a zielona liniowy trend w okresie 2000–2023.



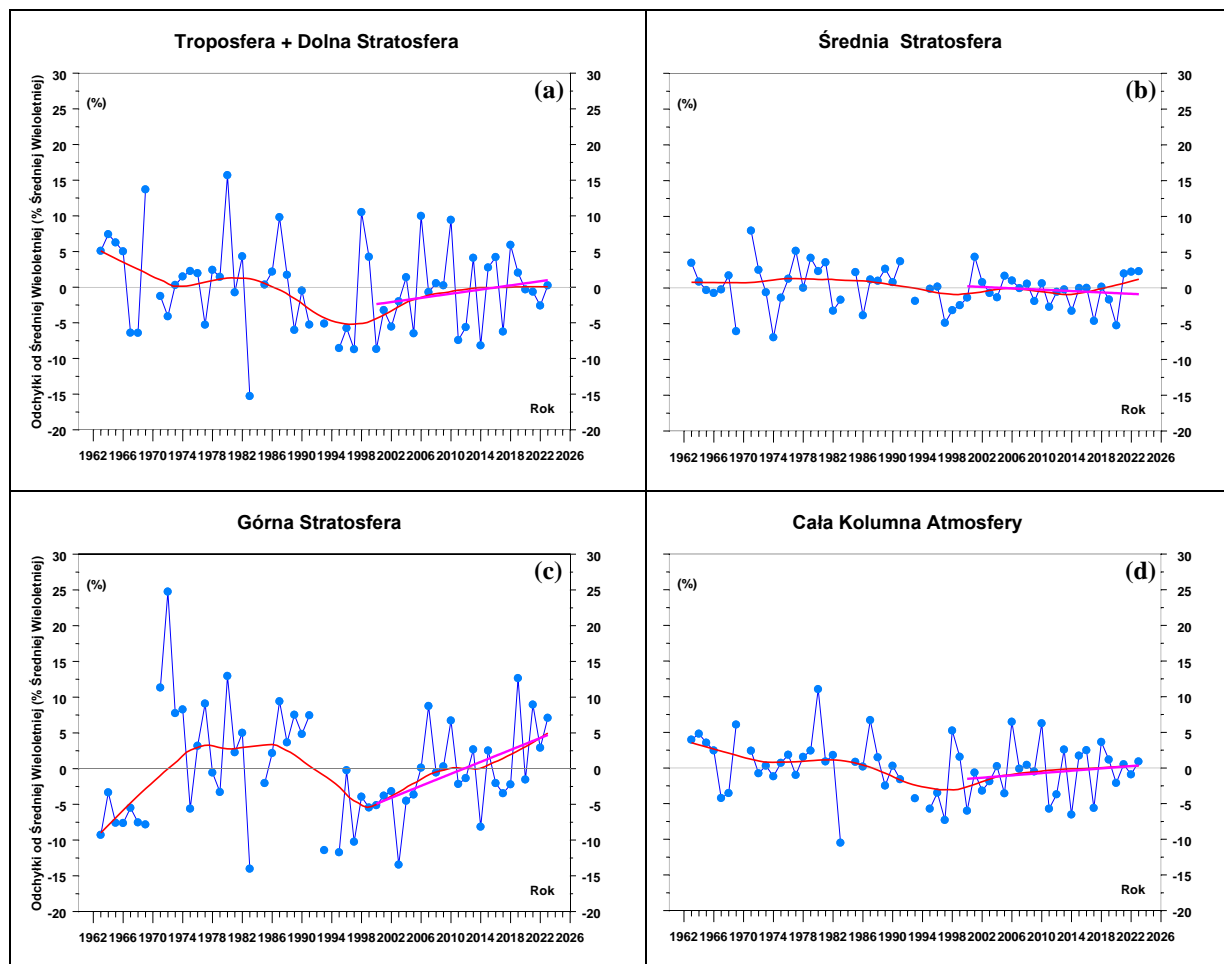
Rys. 4.1.2. Średnia całkowitej zawartości ozonu w Belsku w sezonie letnim (czerwiec–wrzesień) w funkcji średniej w poprzedzającym sezonie zimowym (styczeń–luty–marzec). Czerwony okrąg oznacza wartości w 2023 r.

Zmiany w warstwie ozonowej nad Belskiem obserwowane od połowy lat 90-tych XX wieku potwierdzają skuteczność ustaleń Protokołu Montrealskiego z 1987 r. Protokół Montrealski i jego późniejsze poprawki wprowadziły szereg ograniczeń w produkcji i stosowaniu substancji niszczących warstwę ozonową. Od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku koncentracja takich substancji w stratosferze zaczyna maleć (Rys. 4.5.1). W związku z tym oczekiwano zatrzymania, a następnie odwrócenia spadkowej tendencji w zawartości ozonu w atmosferze. Zatrzymanie spadkowej tendencji w ozonie atmosferycznym w połowie lat 90-tych ubiegłego wieku zostało potwierdzone w licznych pracach między innymi także w ostatnich pracach zespołu z IGF PAN (Krzyścin, Rajewska-Więch, 2009a, 2009b; Rajewska i Krzyścin, 2010; Krzyścin i inni, 2013; Krzyścin, 2015; Krzyścin i Rajewska, 2016, Krzyścin i Baranowski, 2019, Krzyścin i inni, 2020). Jednak regeneracja warstwy ozonowej nad Belskiem przebiega powoli i w ostatnich 10 latach raczej widać stabilizację poziomu CZO₃ niż jego stopniowy wzrost, który byłby oczekiwany w związku z systematycznie malejącą koncentracją substancji niszczących warstwę ozonową.

4.2. Profil pionowy ozonu w Belsku

Obecnie w literaturze światowej toczy się dyskusja nad tempem powrotu warstwy ozonowej do stanu nie zaburzonego działalnością człowieka. W seriach czasowych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze i na wybranych poziomach w stratosferze poszukiwana jest zmiana kierunku trendu z ujemnego na dodatni, którą należałoby oczekiwać wraz z obserwowanym spadkiem zawartości w troposferze i stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową. Badanie zmienności trendu w profilu pionowym ozonu jest szczególnie

interesujące bowiem uważa się, że naprawa warstwy ozonowej rozpocznie się od obszarów w wysokiej stratosferze, gdzie zmiany w procesach chemicznej destrukcji ozonu są najłatwiejsze do zaobserwowania, wobec ograniczonego wpływu zmian w dynamice atmosfery i jej składzie chemicznym (np. wzrost CO_2) na koncentrację ozonu na tych wysokościach (Newchurch i inni, 2003).



Rys. 4.2.1. Odchyłki średnich wiosennych (marzec–kwiecień–maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu (1963–2023) w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona (1963–2020) i spektrofotometrem Brewera (w latach 2021–2023) w Belsku. Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm *UMK04*. (a) troposfera i dolna stratosfera 0–23,5 km, (b) średnia stratosfera 23,5–37,5 km, (c) wysoka stratosfera >37,5 km, (d) cała kolumna atmosfery. Krzywa w kolorze czerwonym przedstawia wygładzone dane, a prosta w kolorze fioletowym trend w okresie 2000–2023.

Na Rys. 4.2.1 przedstawiono przebiegi średnich sezonowych (marzec–kwiecień–maj) zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery (troposfera + dolna stratosfera, środkowa stratosfera, górna stratosfera, cała kolumna atmosfery) z pomiarów Umkehr w Belsku z zastosowaniem spektrofotometru Dobsona w latach 1963–2020 oraz spektrofotometru Brewera w 2021–2023 r. Profile ozonu w latach 1963–2020 uzyskano

stosując procedurę wyznaczania rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, *UMK04*, która zalecana była przez Centrum Danych Ozonowych w Toronto (Kanada). Następnie stosowano procedurę obliczeniową stosowaną w europejskiej sieci spektrofotometrów Brewera – EUBREWNET. W sezonie wiosennym 2023 r. obserwowano zawartość ozonu w trzech wybranych warstwach atmosfery w pobliżu normy tj. odchyłki od średnich wartości (1963–2023) były w przedziale $\pm 5\%$.

Wstępne porównanie profili pionowych ozonu z obu spektrofotometrów w okresie 2011–2016 pokazało różnice między profilami mieszczące się w granicach dokładności pomiarowej profilu (poster E-337 Jarosławski i inni przedstawiony na Quadrennial Ozone Symposium 2021 w Korei Południowej). Dla każdego spektrofotometru, dokładność pomiaru profilu ozonu w pionowych warstwach atmosfery określono porównując przedpołudniowe i popołudniowe wartości profilu ozonu zmierzone w tym samym dniu w sytuacji, gdy odpowiadająca zmiana całkowitej zawartości ozonu była mniejsza o 1%. Wtedy należało oczekiwać zbliżonych dziennych (przed- i popołudniowych) przebiegów profili pionowych zawartości ozonu w atmosferze.

W celach porównawczych w 2023 r. wykonano 20 profili ozonu stosując spektrofotometr Dobsona i algorytm obliczeniowy *UMK04*, który obowiązywał w latach 1963-2020. Terminy pomiarów Umkehr spektrofotometrem Brewera i Dobsona były zgodne w 18 przypadkach. Średnie różnice między profilami pionowymi ozonu wynosiły poniżej 5% w warstwach: 10–14,5 km, 19–23,5 km, 23,5–28 km, 33–38,5 km, 38,5–43 km, 43–48 km, 48 km – górna granica atmosfery. Średnia różnica między zawartościami ozonu w warstwach 0–10 km i 28–33 km wynosiła około 7%, najwyższą różnicę, 11,5%, znaleziono w warstwie 14,5–19 km. Współczynnik korelacji między zawartością ozonu w kolejnych 10 warstwach Umkehr wynosił odpowiednio 0,66, 0,98, 0,97, 0,96, 0,79, 0,87, 0,70, 0,60, 0,84, 0,27. Należy kontynuować pomiary profilu ozonu stosując oba spektrofotometry, aby w przyszłości ujednoczyć serię czasową profili ozonowych.

Liniowe trendy zmian ozonu w sezonie wiosennym (marzec–kwiecień–maj) w latach 2020–2023 wskazują na stabilizację zawartości ozonu w troposferze i dolnej stratosferze (Rys. 4.2.1a), w środkowej stratosferze (Rys. 4.2.1b) i w całej kolumnie atmosfery (Rys. 4.2.1.d). W górnej stratosferze (Rys. 4.2.1c) wyznaczono istotnie statystycznie wzrostowy trend, $4,2\% \pm 1,5\%$ (1σ) na 10 lat. Podobną sytuację stwierdzono w sezonie letnim (czerwiec–lipiec–sierpień) i jesiennym (wrzesień–październik–listopad). Trendy wynosiły $2,5\% \pm 1,5\%$ (2σ) na 10 lat latem i $1,4\% \pm 1,0\%$ (1σ) na 10 lat jesienią. Przez znaczną część sezonu zimowego z przyczyn technicznych (Słońce zbyt nisko nad horyzontem) nie można wyznaczać profilu pionowego ozonu metodą Umkehr.

W ostatnich latach obserwowana jest stabilizacja poziomu ozonu za wyjątkiem górnej stratosfery. Taka tendencja nie jest jeszcze dobrze utrwalona w niższych warstwach atmosfery

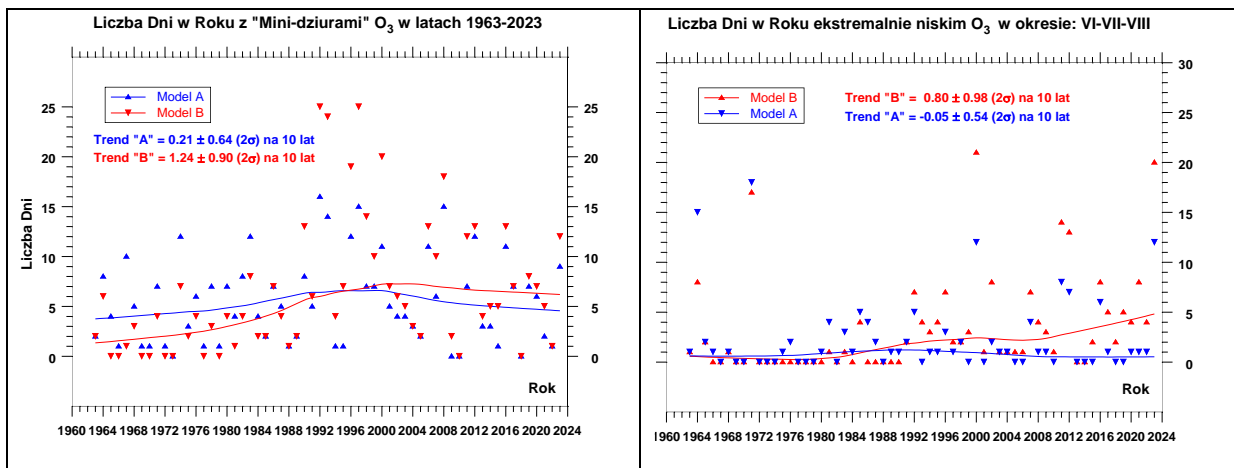
i dodanie kolejnych lat może zmienić kierunek trendu. W sprawozdaniu z 2016 r. wyznaczono dodatni trend (od 1995 r.) w warstwie obejmującej dolną stratosferę. Na zmiany ozonu w tej warstwie atmosfery dodatkowo wpływają procesy dynamiczne i dodanie kolejnych lat (2017–2023) zatrzymało wzrostowy trend ozonu w tej warstwie. Natomiast dodatni trend w wysokiej stratosferze (Rys. 4.2.1c), gdzie dominują procesy chemiczne, jest wynikiem zmniejszającej się koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową (freony, halony) zaobserwowanym w średnich szerokościach geograficznych od połowy lat 90-tych XX wieku w związku z funkcjonowaniem ustaleń Montrealskiego Protokołu z 1987 (i jego późniejszych poprawek) o ochronie warstwy ozonowej. Tendencję wzrostową w tej warstwie raportowano w każdym sprawozdaniu od początku XXI wieku.

Zaskakujące negatywne trendy w latach 2000-2023 znaleziono w warstwie 23,5–28,0 km (tj. warstwie Umkehr numer 5) w sezonie letnim, $-2,2 \% \pm 0,8 \% (1\sigma)$, oraz danych całorocznych, $-1,8 \% \pm 0,7 \% (1\sigma)$. Występowanie ujemnych trendów w tej warstwie atmosfery w średnich szerokościach geograficznych na półkuli północnej było sygnalizowane przez wielu autorów (np. Ball i inni, 2018; Szelaąg i inni, 2020) na podstawie danych satelitarnych. Jednak przyczyna takiej zmienności ozonu nie jest obecnie znana.

4.3. Ekstremalne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku

Głębokie lokalne zmniejszenie wartości CZO_3 w średnich szerokościach geograficznych trwające zwykle kilka dni i związane ze zmianami cyrkulacji atmosfery w górnej troposferze i dolnej stratosferze zwane jest „mini-dziurą” ozonową. Nie należy jej mylić ze rozległą „dziurą ozonową” nad Antarktydą, która od połowy lat 1980-tych pojawia się corocznie wczesną wiosną nad tym kontynentem (patrz Roz. 4.5). W 2002 r. opublikowano w *International Journal of Climatology* artykuł na temat długookresowych zmian częstości występowania „mini-dziur” na półkuli północnej (Krzyścin, 2002). Zastosowano dwa modele (oznaczone dalej jako **A** i **B**) do wyznaczenia dni z „mini-dziurami”. Poziom CZO_3 w tych dniach z założenia powinien być co najmniej o 20% poniżej ważonej średniej kroczącej (model **A**) lub wieloletniej 1963–2023 średniej dziennej (model **B**).

W nawiązaniu do tej pracy przeprowadzono analizę liczby dni z „mini-dziurami” nad Belskiem w latach 1963–2023, której wyniki przedstawia Rys. 4.3.1 (lewa strona). W serii obserwacji w 2023 r. znaleziono 9 dni (Model **A**) i 12 dni (Model **B**) z wartościami CZO_3 przekraczającymi wartość progową dla pojawienia się „mini-dziury”. Średnia wieloletnia (1963–2021) liczby dni z „mini-dziurami” ozonowymi wynosi 6 i 7 odpowiednio dla Modelu **A** i **B**. Liczba dni z „mini-dziurami” znacznie zmienia się z roku na rok. Wyjątkowo w pewnych latach obie metody wskazują na brak „mini-dziur”. Taka sytuacja miała miejsce w latach 1973, 2010 i 2018.



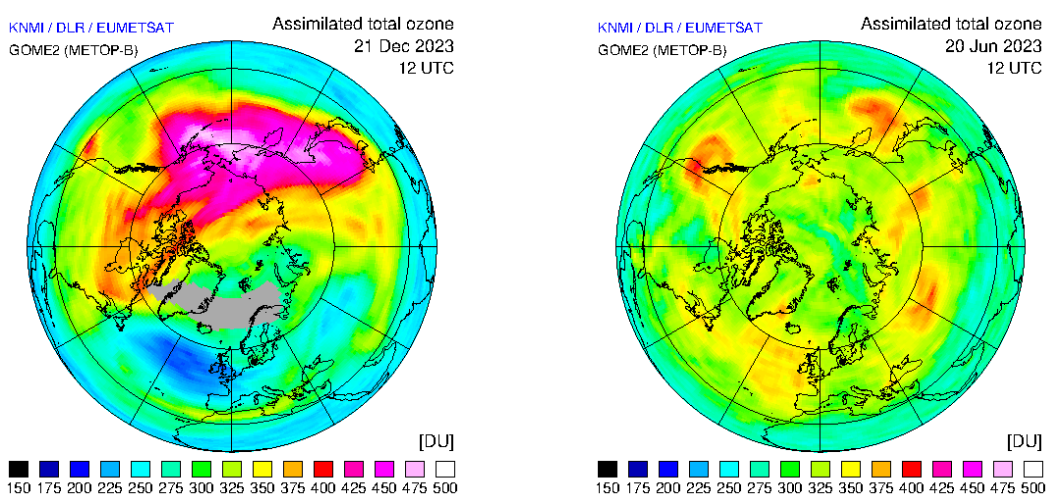
Rys. 4.3.1. Liczba dni w roku z „mini-dziurami” ozonowymi nad Belskiem w latach 1963–2023 (lewa strona) i liczba dni w okresie czerwiec–sierpień z deficytem całkowitej zawartości ozonu >10% normy (prawa strona)

Wyglądzone przebiegi czasowe (1963-2023) liczby dni z „mini-dziurami” ozonowymi (Rys. 4.3.1 – lewa strona) wskazują, że obecnie znajdujemy się w fazie ustalonej częstotliwości pojawiania się „mini-dziur”, która wystąpiła po okresie wzrostu liczby dni z „mini-dziurami” trwającym do połowy lat 90-tych. Dla całego okresu pomiarów w Belsku 1963–2023 model **B** przewiduje stopniowy wzrost liczby dni z „mini-dziurami”. Istotnie statystycznie (na poziomie ufności 2σ) wzrostowa tendencja wynosi około 1-2 dni na 10 lat (patrz wartość trendu na Rys. 4.3.1 – lewa strona). Natomiast wyniki modelu **A** sugerują, że liczba „mini-dziur” jest na niezmiennym poziomie w okresie 1963-2023. Modele **A** i **B** w różny sposób klasyfikują „mini-dziury”. Model **A** wyznacza odchylenia od biegnącej średniej, która jest niższa od średniej dla całego okresu (model **B**) w sekwencji lat z obniżonym poziomem ozonu np. w połowie lat 90-tych XX wieku. Wyniki, uzyskane z zastosowaniem modelu **A** sugerują, że krótkookresowe procesy w dynamice atmosfery prowadzące do pojawiania się dni z ekstremalnie małymi zawartościami ozonu nie uległy zasadniczo zmianie w całym okresie pomiarów CZO₃ w Belsku. Wyniki modelu **B** sugerują wzrastającą częstotliwość pojawiania się „mini-dziur” w całym okresie pomiarowym w Belsku, ale może to być efektem nałożenia się krótkookresowych dynamicznych spadków ozonu na obniżoną już średnią strefową i przekroczenia bariery –20% normy (wartość progowa pojawiania się „mini-dziury”) są tym samym częstsze. „Mini-dziury” występują nad Belskiem w okresie od początku listopada do końca marca. W tym czasie codzienne dawki promieniowania UV mierzone przy powierzchni Ziemi są z natury niewielkie (niska wysokość Słońca) i spodziewany duży procentowo wzrost poziomu UV w stosunku do typowych wartości napromienienia UV nie jest szczególnie niebezpieczny. W dodatku, w tym okresie ludzie zwykle krótko przebywają na wolnym powietrzu.

Wyznaczenie zmian w częstotliwości pojawienia się ekstremalnie niskich wartości CZO₃ jest szczególnie ważne w sezonie letnim, kiedy wysoki poziom promieniowania UV może stanowić zagrożenie dla zdrowia. W tym sezonie odchyłki CZO₃ od normy większe niż 20% nie występują. Arbitralnie przyjęto próg 10% deficytu CZO₃ do wyznaczenia okresów z ekstremalnie niskimi wartościami ozonu. W tej sytuacji rumieniowa dawka napromienienia UV byłaby ~10% wyższa od normy napromienienia dla bezchmurnego nieba.

Przeprowadzono obliczenia analogicznie do sytuacji dotyczącej „mini-dziur”, ale zastosowano 10% wartość progową. Wyniki przedstawiono na Rys. 4.3.1 (prawa strona). Model **B** wskazuje niewielki dodatni trend w ilości ekstremalnych dni tj. około 1 dzień na 10 lat. Według modelu **A** trend ten jest nieistotny statystycznie (patrz wartości trendu na Rys. 4.3.1 – prawa strona). W 2023 r. w okresie letnim (czerwiec-lipiec-sierpień) znaleziono 5 dni i 1 dzień z wartościami CZO₃ poniżej progu –10%, odpowiednio według modelu **B** and **A**. Takich dni bywa średnio zaledwie kilka w sezonie letnim (znaleziono maksymalnie 22 takich dni w 2000 r.), wtedy bezwzględnie należało ograniczyć czas przebywania w nasłonecznionych miejscach.

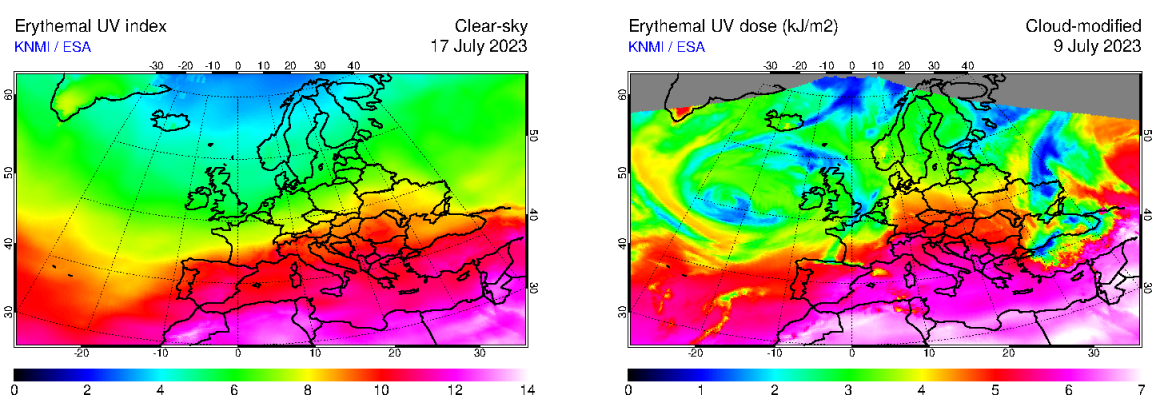
Rys. 4.3.2 (lewa strona) ilustruje przestrzenny rozkład CZO₃ na półkuli północnej na podstawie obserwacji satelitarnych w dniu 21.12.2023 tj. w dniu ekstremalnego niedoboru ozonu w Belsku w 2023 r. Pomiar CZO₃ spektrofotometrem Dobsona pokazał 231 D, czyli ~26% poniżej wieloletniej dziennej normy. Rys. 4.3.2 (prawa strona) przedstawia sytuację w dniu 20.06.2023, kiedy zanotowano w Belsku 303 D (~13% poniżej wieloletniej normy w sezonie letnim), co było największym procentowym niedoborem ozonu w tym sezonie w 2023 r. Późną wiosną i latem niedobory ozonu rzadko przekraczają poziom 10% normy. W obu przypadkach obszar z ekstremalnym CZO₃ obejmował znaczną część centralnej Europy.



Rys. 4.3.2. Rozkład CZO₃ nad półkulą północną z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej Eumetsat w dniu 21.12.2023 (lewa strona) oraz 20.06.2023 (prawa strona). Pomiar spektrofotometrem Dobsona w tych dniach pokazały odpowiednio 25,6% i 13,2% ubytek ozonu w stosunku do średniej wieloletniej dla

4.4. Promieniowanie UVB w Belsku

Pomiary natężenia napromienienia o skuteczności rumieniowej z użyciem biometru Kipp & Zonen pokazały w dniu 17.07.2023 najwyższą w roku wartość tj. 8,0 indeksu UV (1 Index = 25mW/m²). Powyższą wartość potwierdziły pomiary widm UV z zastosowaniem spektrofotometru Brewera. Wysoka wartości indeksu w tym dniu była wynikiem niskich wartości CZO₃ (301 D, czyli 6,8% poniżej normy). Tego dnia dzienna dawka rumieniowa (2500 J/m²) nie była rekordowo wysoka w tym roku. Najwyższą w 2023 r. dzienną dawkę rumieniową równą 3981 J/m² zanotowano 09.07.2023, wtedy indeks UV wynosił 6,4. Satelitarne pomiary (Rys. 4.4.1) pokazały zbliżone wartości indeksu i dziennej dawki.

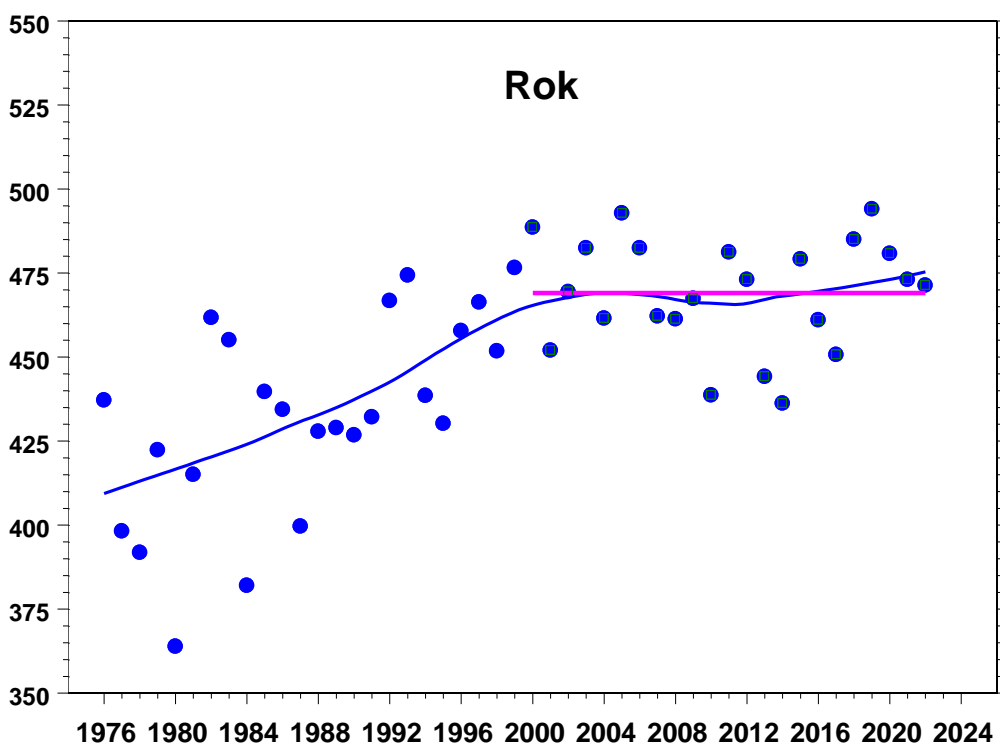


Rys. 4.4.1. Indeks UV i dzienna dawka rumieniowa nad Europą z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej MetOp-A w dniach 17.07.2023 (lewa strona) i 09.07.2023 (prawa strona), odpowiednio, kiedy w Belsku zmierzono maksymalną w roku 2023 wartość indeksu UV (8,0) i dziennej dawki erytemalnej (3981 J/m²).

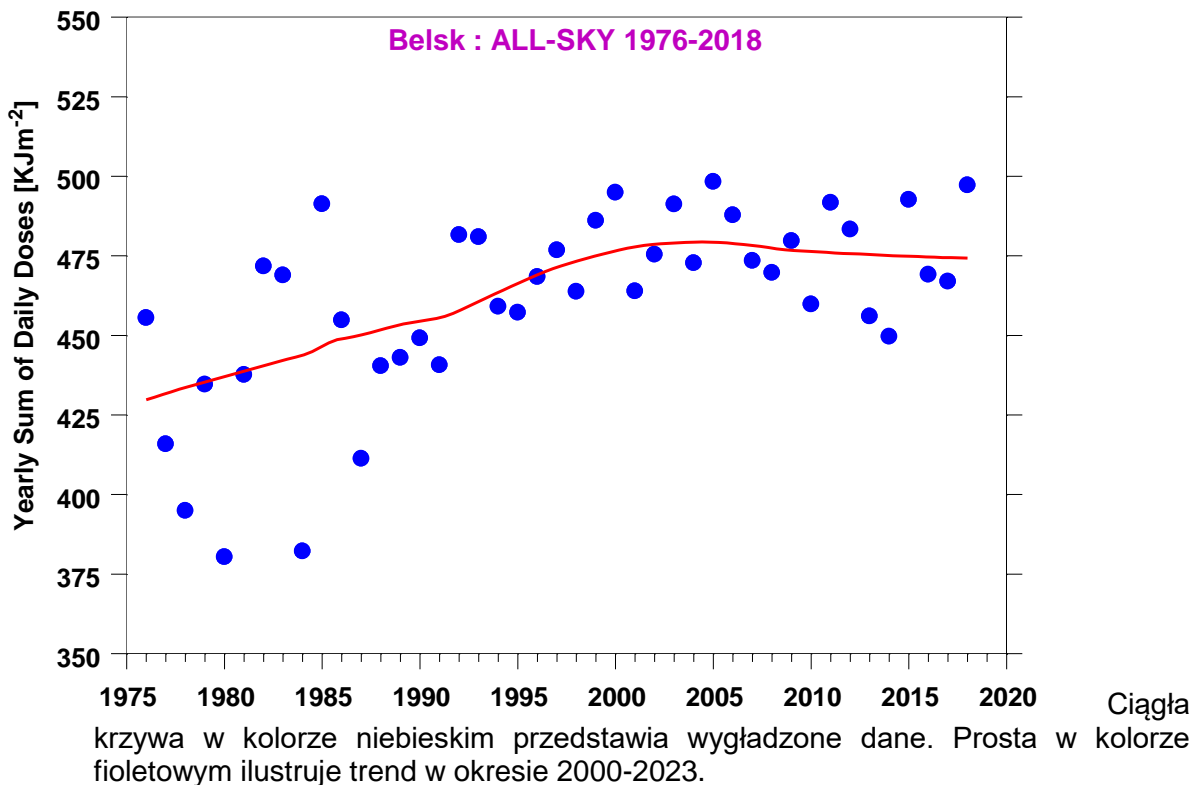
W związku z pojawieniem się niskich wartości ozonu nad Polska w kwietniu 2023 r. wielokrotnie rejestrowano w Belsku wartości indeksu UV powyżej 4 tj. około 15% powyżej wieloletniej normy dla tego miesiąca. W całym miesiącu w sumie takich dni było 8. Maksymalna dawka rumieniowa w tym okresie wynosiła 2644 J/m² (27.04), co w przybliżeniu stanowi 11 krotność minimalnej dawki wywołującej rumień skóry (tzw. MED) u osoby z fototypem 2. Największa wartość indeksu UV w tym miesiącu wynosiła 4,9 (30.04). Wysokie wartości indeksu UV o tej porze roku są szczególnie niebezpieczne dla zdrowia, gdyż organizm nie jest jeszcze zaadaptowany do długotrwałych ekspozycji na promieniowanie UV, a umiarkowane temperatury (~20° C) zachęcają do nadmiernego opalania bez zastosowania kremów z filtrem ochronnych. Czerwińska i Krzyścin (2020) stwierdzili, że nadmierne napromienienie w kwietniu może być przyczyną gwałtownie wzrastającej zapadalności na czerniaka w Europie.

W Belsku monitoring promieniowania UV o skuteczności rumieniowej prowadzony jest od 1976 r. z zastosowaniem różnych modeli szerokopasmowych biometrów: Robertson-Berger (1976–1994), Solar Light (1992–2014), Kipp @ Zonen (2006–2023). Seria czasowa w

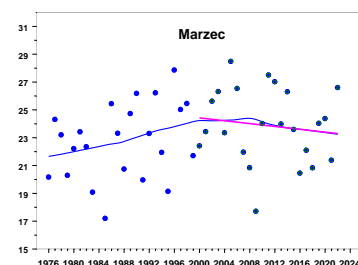
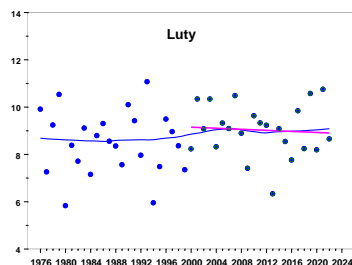
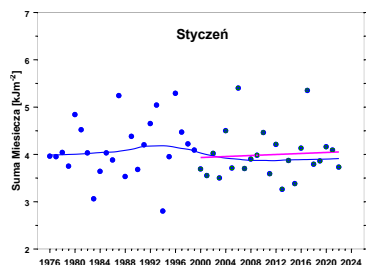
ubiegłych latach, także i w 2023 r., została poddana procedurze homogenizacyjnej, która polegała na zastosowaniu poprawek wynikających z porównania wyników pomiarów szerokopasmowymi miernikami dla dni bezchmurnych z wynikami modelu transferu promieniowania (metoda stosowana w latach 1976–1994) lub z jednoczesnymi pomiarami natężenia promieniowania UV o skuteczności rumieniowej z zastosowanie spektrofotometru Brewera nr. 64 (metoda stosowana od 1995 r.). Jakość pomiarów ozonu i promieniowania UV belskiego Brewera jest zapewniona przez regularne porównania (od lata 1995 r.) ze światowym standardem – spektrofotometrem Brewera nr. 17. Przebieg sum rocznych dziennych dawek rumieniowych wskazuje na wzrost napromienienia UV w Belsku w latach 1976-1999 i późniejszą stabilizację (brak trendu). W XXI wieku sumy roczne dziennych dawek rumieniowych oscylują wokół poziomu $\sim 470 \text{ kJ/m}^2$ (Rys. 4.4.2). Trend w sumie rocznej w latach 1976-1999 wynosił $5,9 \% \pm 1,6 \%$ na 10 lat. W tym okresie suma roczna wzrosła więc o 14,2%. W 2023 r. suma roczna wyniosła $471,3 \text{ kJ/m}^2$ i była typowa dla wartości w XXI w. W ostatnich latach (od ~ 2010 r.) pojawiła się lekka tendencja wzrostowa, która w okresie 2010-2023 r. była jeszcze nie istotna statystycznie (Rys. 4.4.2).

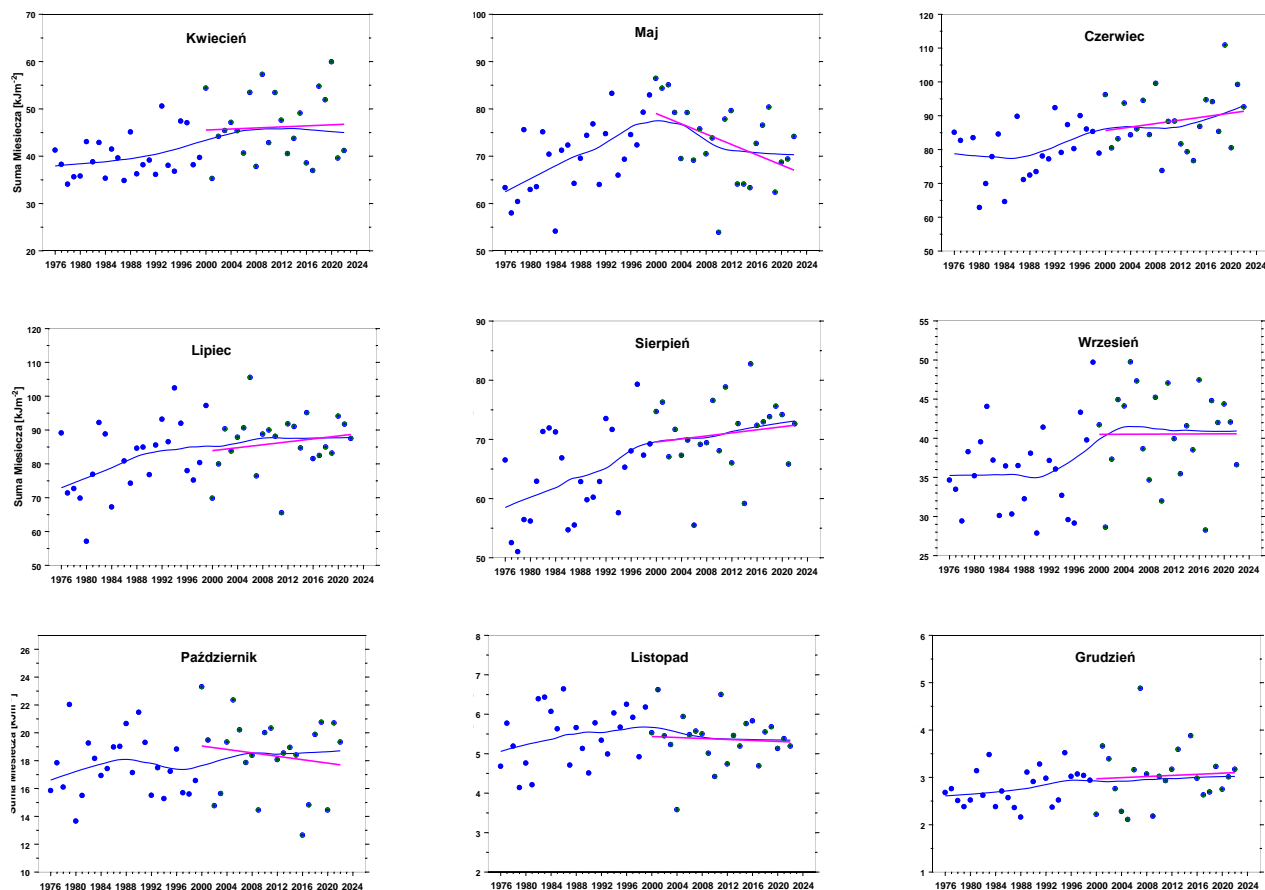


Rys.4.4.2. Roczna suma dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2023 (punkty).

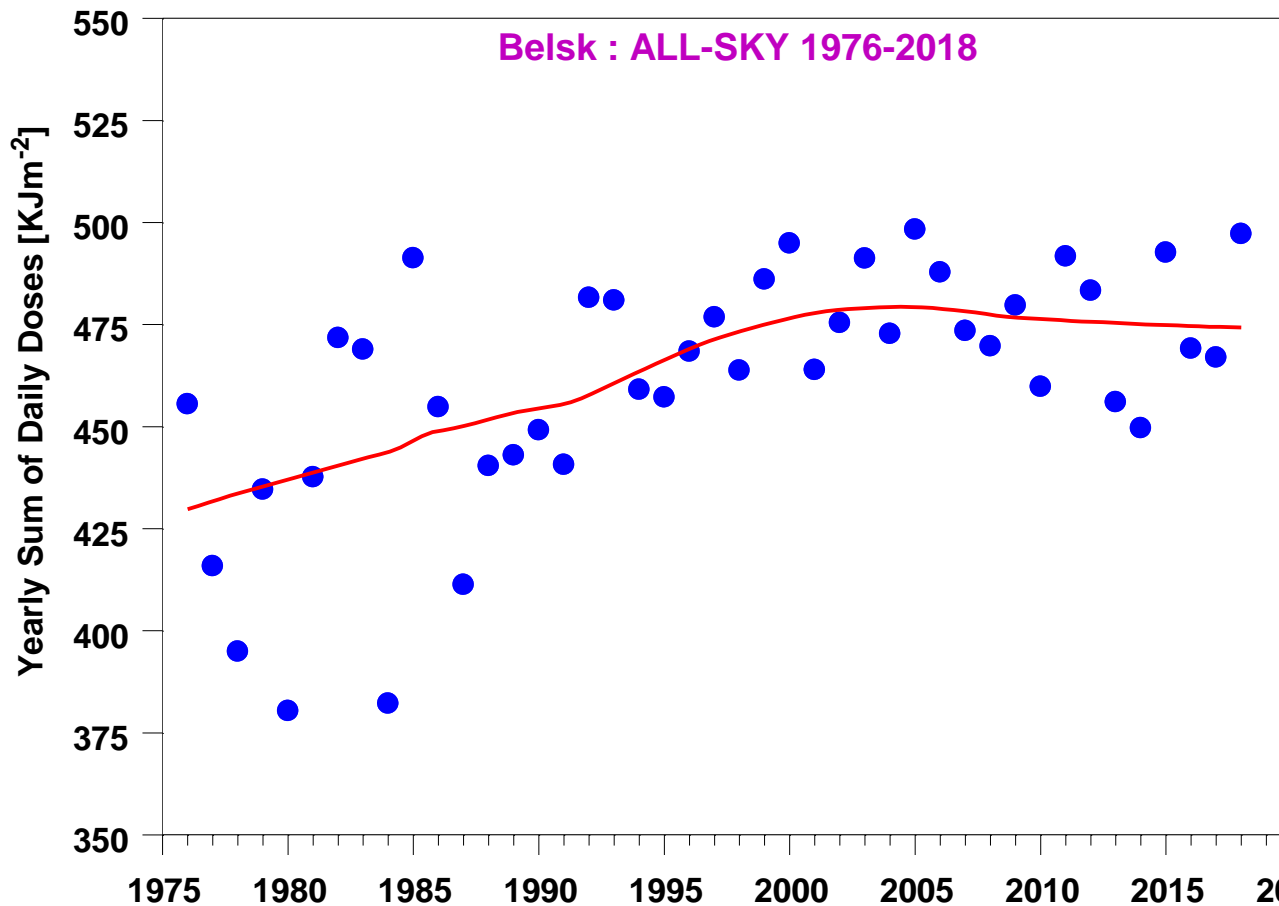


Rysunki 4.4.3 przedstawiają serie czasowe sum miesięcznych dziennych dawek rumieniowych. W niektórych miesiącach przebieg długookresowych zmian w sumach miesięcznych różni się od tego w sumie rocznej. Ale jedynie w maju stwierdzono istotnie statystycznie trend, $-7,5 \% \pm 6,4 \% (2\sigma)$, w sumach miesięcznych po 2000. Przed 2000 r. wzrostowy trend w tym miesiącu wynosił $9,1 \% \pm 6,4\% (2\sigma)$. W sezonie letnim (czerwiec, lipiec, sierpień) po 1999 r. wyznaczono wzrostową tendencję w sumach miesięcznych $\sim 2\%$ na 10 lat, jednak duże zmiany sum miesięcznych z roku na rok nie pozwoliły stwierdzić, że zmiana ta jest istotna statystycznie. Wzrost sum miesięcznych promieniowania rumieniowego w okresie letnim prowadzi do wzrostu zagrożenia nadmiernym napromienieniem, gdyż w okresie wakacyjnym czas pobytu na wolnym powietrzu jest zwykle dłuższy niż w innych miesiącach.





Rys.4.4.3. Sumy miesięczne (od stycznia do grudnia) dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976–2023 (punkty).



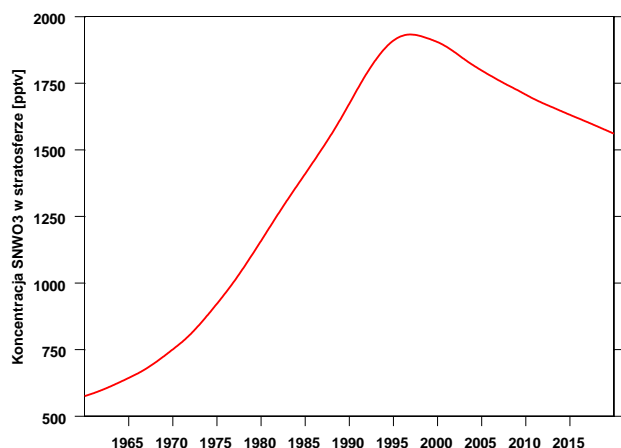
Ciągła krzywa w kolorze niebieskim przedstawia wygładzone dane. Prosta w kolorze czerwonym ilustruje trend w okresie 2000–2023 wyznaczony standardową regresją liniową z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów.

4.5. Globalne zmiany całkowitej zawartości ozonu

„Naprawa” warstwy ozonowej w średnich szerokościach geograficznych na półkuli północnej

Zwykle długookresowe zmiany ozonu wiąże się ze zmianami koncentracji w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO₃). Koncentracja SNWO₃ w stratosferze w średnich szerokościach geograficznych zaczyna maleć w drugiej połowie lat 90-tych XX wieku (Rys.4.5.1) w wyniku ograniczeń w produkcji SNWO₃ wprowadzonych przez Protokół Montrealski (PM) z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. Natomiast początek zmniejszania koncentracji SNWO₃ obserwowany jest w wysokich szerokościach geograficznych (Arktyka i Antarktyda) od początku XXI wieku. W tej sytuacji w globalnych danych ozonowych w XXI powinien pojawić się dodatni trend związany ze stopniowym zmniejszaniem się koncentracji substancji niszczących ozon w stratosferze, którego identyfikacja może być jednak utrudniona ze względu na występowanie naturalnych oscylacji CZO₃ związanych z globalnymi i lokalnymi procesami transportu ozonu i jego prekursorów w atmosferze. Zmiany klimatu mogą modyfikować naturalne procesy redystrybucji ozonu (np. intensywność komórki Brewera-

Dobson, patrz rozdział 4.1), co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia (lub zwiększenia) CZO₃ w pewnych obszarach na kuli ziemskiej, czyli odpowiednio do wolniejszej (lub szybszej) regeneracji warstwy ozonowej.

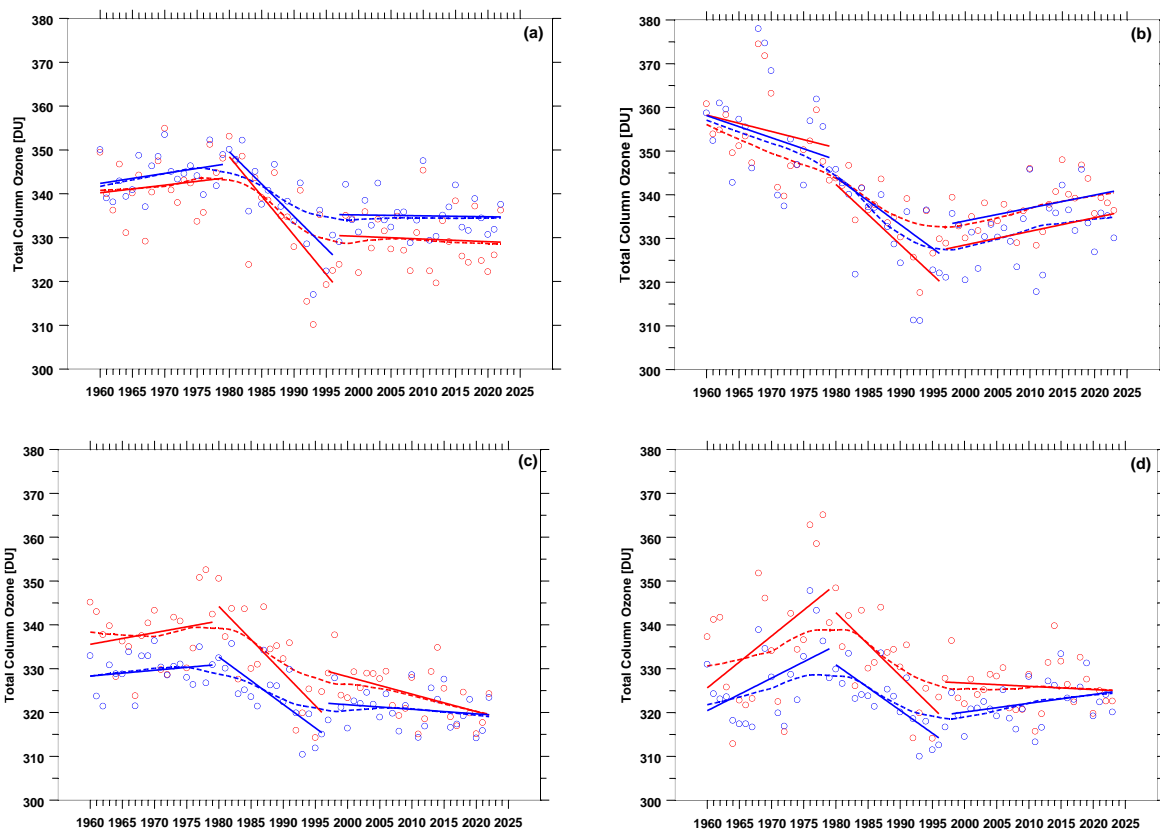


Rys. 4.5.1. Zawartość substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO₃) w stratosferze (1960-2020) w średnich szerokościach geograficznych według obliczeń modelowych (krzywa czerwona)

Weber i inni (2023) analizując dane pomiarowe (z sieci naziemnej i obserwacji satelitarnych) i symulacje numeryczne (z zastosowaniem globalnych chemiczno-transportowych modeli) ocenili, że tempo regeneracji CZO₃ w średnich szerokościach geograficznych (35–60° N) wynosiło $0,5 \pm 0,5 \%$ (2σ) na 10 lat w okresie 1996–2020. Wydaje się, że tempo regeneracji jest w rzeczywistości mniejsze, gdyż w okresie 1996–2000 wystąpiła silna wzrostowa tendencja CZO₃ nie związana ze zmianami SNWO₃, która wpłynęła na wielkość szacowanych trendów w okresie po 1995 r. Fazę przyspieszonego wzrostu w latach 1996–2000 widać wyraźnie w średnich rocznych CZO₃ dla Belska (Rys. 4.1.1).

W dalszej części tego podrozdziału będą analizowane liniowe trendy CZO₃ po 1960 r. w średnich szerokościach geograficznych (35–60°N) na półkuli północnej i w wybranych obszarach w tej strefie tj. Belsk [51,5–52°N; 20,5–21°E], Polska [49–54,5°N; 14–21°E], Centralna Europa [45–55°N; 12–24°E], Europa [35–65°N; 10°W–45°E], Północna Ameryka [35–60°N; 125–70°W] i wschodnia Azja [35–60°N; 90–145°E]. W obliczeniach trendu wykorzystano dwie bazy danych CZO₃ z symulacji numerycznych z zastosowaniem globalnych chemiczno-dynamicznych modeli pozwalających odtworzyć zmiany w cyrkulację atmosfery i jej składzie chemicznym tzw. reanaliz. Reanaliza ERA5 prowadzona jest na bieżąco przez Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody – ECMWF i dostarcza danych od 1940 r. Reanaliza MSR-2 dla okresu 1960–2022 została opracowana przez Królewski Holenderski Instytut Meteorologiczny – KNMI. Trendy wyznaczono zwykłą regresją liniową dla 3 okresów 1960–1979, 1980–1996 i 1997–2022/2023 (2022 dla MSR-2

i 2023 dla ERA5). Wybór tych okresów odpowiada różnym fazom zmian SNWO₃ w średnich szerokościach geograficznych (Rys. 4.5.1), tj. powolny i szybki wzrost odpowiednio w pierwszym i drugim okresie, natomiast spadkowa tendencja po 1996 r., czyli zmniejszenie zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi ozon prowadzące do stopniowej regeneracji CZO₃ tj. powrotu stratosferycznego ozonu do stanu z lat 80-tych ubiegłego wieku. Rysunek 4.5.2 przedstawia liniowe trendy nad Polską (wyniki w kolorze czerwonym) i w całej strefie średnich szerokości 35-60°N (kolor niebieski). Górne i dolne stronie rysunki przedstawiają odpowiednio wyniki dla średnich rocznych i letnich (czerwiec-lipiec) z ERA5. Tabela 4.5.1 przedstawia całoroczne i letnie trendy (w jednostkach Dobsona na 10 lat sierpień) CZO₃. Rysunki po lewej stronie wykorzystują dane z reanalizy MSR-2, a po prawej) dla wszystkich analizowanych stref geograficznych. Przedstawiony na Rys. 4.5.2 obraz zmian CZO₃ uzyskany z dwóch reanaliz jest spójny jedynie dla okresu 1980-1996. Obie reanalizy, zarówno dla średnich rocznych i letnich, wskazują ujemne trendy w tym okresie, które są istotne statystycznie, jak przedstawia Tabela 4.5.1. Wyraźną wzrostową tendencję CZO₃ wyznaczono w średnich rocznych i letnich w bazie danych ERA5 w okresie 1997-2023 (jest ona istotna statystycznie w strefie 35-60°N w średnich rocznych). Natomiast „naprawa warstwy ozonowej” w latach 1997-2022 nie jest widoczna, zarówno w średnich rocznych i letnich, w trendach wyznaczonych z bazy danych MSR-2. W dodatku, kontynuacja spadkowej tendencji CZO₃ jest widoczna w Polsce sezonach letnich 1997-2023 (Rys.4.5.2c – kolor czerwony). Taka tendencja (około -4 Dobsony na 10 lat) jest istotna statystycznie także dla Belska w Centralnej Europie (patrz Tabela 4.5.1). W okresie 1960-1979 stwierdzono szczególnie duże różnice między trendami wyznaczonymi z obu reanaliz. Na spadkową tendencję w średnich rocznych (około-4 Dobsony na 10 lat, trend istotny statystycznie na poziomie 1 sigma) wskazuje ERA5 (Rys. 4.5.2b), a przeciwną tendencję (nieistotną statystycznie) MSR-2 (Rys. 4.5.2a). ERA5 dostarcza znacznego wzrostowego trendu CZO₃ (~10 Dobsonów na 10 lat, trend istotny statystycznie na poziomie 2 sigma) nad Polską w średnich letnich z okresu 1960-1979 (Rys. 4.5.2d – prosta w kolorze czerwonym). Tak silnej wzrostowej tendencji nie widać w danych MRS-2 (Rys. 4.5.2c – prosta w kolorze czerwonym).



Rys. 4.5.2. Średnie roczne (górne rysunki) i średnie sezonowe z okresu czerwiec–lipiec–sierpień (dolne rysunki) CZO₃ dla Polski (okręgi w kolorze czerwonym) i w średnich szerokościach geograficznych (okręgi w kolorze niebieskim): Rys. 4.5.2a – średnie roczne na podstawie bazy danych MSR-2, Rys. 4.5.2b – średnie roczne z ERA5, Rys. 4.5.2c – średnie letnie z MSR-2, Rys. 4.5.2d – średnie letnie z ERA5. Na rysunkach przedstawiono proste regresji (w kolorze czerwonym dla Polski i niebieskim dla średnich szerokości geograficznych) otrzymane metodą najmniejszych kwadratów do okresów 1960–1979, 1980–1996 i 1997–2022/2023 (2022 dla MSR-2, 2023 dla ERA5). Przerwane gładkie krzywe przedstawiają wygładzone średnie metodą lokalnej regresji typu LOWESS.

Tabela 4.5.1. Liniowy trend w serii czasowej średnich rocznych i letnich CZO₃ (w Dobsonach na 10 lat) i jego standardowe odchylenie w strefie 35–65°N i w wybranych regionach w tej strefie na podstawie danych z reanaliz ERA5 i MSR-2. Pogrubione wyniki oznaczają wartości istotne na poziomie 2σ.

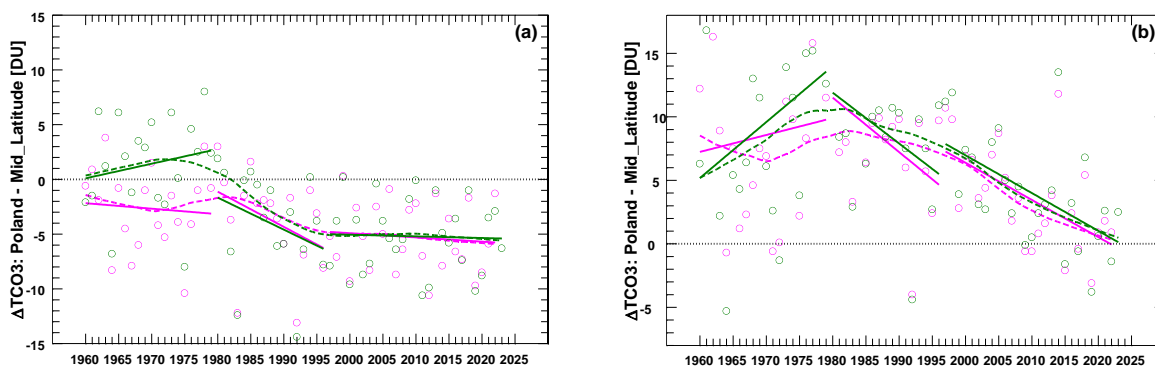
Region	1960-1979		1980-1996		1997-2023	
	ERA5	MSR-2	ERA5	MSR-2	ERA5	MSR-2
Lato						
Belsk	13 ± 4	3 ± 3	-15 ± 5	-16 ± 3	-1 ± 2	-4 ± 2
Polska	12 ± 4	3 ± 3	-14 ± 5	-15 ± 3	-1 ± 2	-4 ± 2
Centralna Europa	13 ± 3	5 ± 2	-14 ± 4	-15 ± 3	-1 ± 2	-4 ± 2
Europa	11 ± 3	3 ± 2	-10 ± 4	-11 ± 2	1 ± 2	-2 ± 1
Północna Ameryka	8 ± 2	6 ± 2	-10 ± 3	-10 ± 2	2 ± 1	-1 ± 1
Wschodnia Azja	5 ± 3	-5 ± 2	-11 ± 3	-11 ± 2	3 ± 2	-0 ± 1

Średnie Szerokości	7 ± 2	1 ± 2	-10 ± 3	-11 ± 2	2 ± 1	-1 ± 1
Rok						
Belsk	-4 ± 3	2 ± 3	-14 ± 4	-18 ± 4	3 ± 2	-1 ± 2
Polska	-4 ± 3	2 ± 3	-14 ± 4	-18 ± 4	3 ± 2	-1 ± 2
Centralna Europa	-3 ± 3	3 ± 3	-13 ± 4	-17 ± 4	3 ± 2	-1 ± 2
Europa	-3 ± 3	4 ± 2	-11 ± 3	-15 ± 3	4 ± 2	-0 ± 2
Północna Ameryka	-6 ± 2	3 ± 2	-8 ± 3	-12 ± 3	4 ± 1	1 ± 1
Wschodnia Azja	-7 ± 3	1 ± 2	-13 ± 4	-17 ± 3	3 ± 2	-0 ± 2
Średnie Szerokości	-5 ± 3	2 ± 2	-11 ± 3	-15 ± 3	3 ± 2	-0 ± 1

Podsumowując, należy stwierdzić, że obie obecnie szeroko stosowane reanalizy dostarczają odmiennego obrazu zmian w warstwie ozonowej w średnich szerokościach geograficznych przed i po okresie silnego wzrostu koncentracji w stratosferze substancji niszczącej warstwę ozonową w latach 80-tych i początku lat 90-tych ubiegłego wieku. Uzgodnienie danych CZO₃ między różnymi bazami nie jest prostym zagadnieniem i obecnie nie można wskazać bazy, która najdokładniej reprezentuje ozon atmosferyczny. Wydaje się, że porównanie danych z reanaliz z wynikami obserwacji ozonu z naziemnej sieci spektrofotometrów Dobsona i Brewera może prowadzić do ujednoczenia syntetycznych serii czasowych CZO₃.

Średnie miesięczne CZO₃ z reanaliz ERA5 i MSR-2 posłużyły także do oceny regionalnego zróżnicowania trendów w średnich szerokościach półkuli północnej. Analiza wartości trendów w średnich rocznych i letnich dla siedmiu wybranych rejonów nie pozwala bezpośrednio wyznaczyć (ze względu na dużą niepewność szacowania wartości trendów – Tabela 4.5.1) występowania obszarów z anomalnymi wartościami trendów. Przedmiotem analizy były więc nie same średnie wartości CZO₃ w poszczególnych obszarach, ale odchyłki średnich rocznych i sezonowych CZO₃ w danym obszarze od odpowiednich średnich reprezentatywnych dla całej strefy średnich szerokości (35–60°N). W ten sposób można wyznaczyć anomalne regiony, w których długookresowe zmiany CZO₃ są wolniejsze (lub szybsze) w odniesieniu do tych uśrednionych po całej strefie średnich szerokości geograficznych półkuli północnej.

Rysunek 4.5.3 przedstawia liniowe trendy w odchyłkach (w jednostkach Dobsona) między średnimi rocznymi (Rys. 4.5.3a) i letnimi (Rys. 4.5.3b) dla Polski i w średnich szerokościach geograficznych. Dane w kolorze zielonym dotyczą wyników z bazy ERA5, a w kolorze różowym z bazy MSR-2. W Tabeli 4.5.2 zamieszczono liniowe trendy (1960–1979, 1980–1996, 1997–2023) dla różnic między regionalnymi średnimi wartościami CZO₃ i odpowiednimi średnimi w całej strefie 35–60°N.



Rys. 4.5.3. Odchyłki między średnimi wartościami CZO_3 dla Polski i w średnich szerokościach geograficznych według bazy MSR2 (okręgi w kolorze różowym) i ERA5 (okręgi w kolorze zielonym): Rys. 4.5.3a – średnie roczne: Rys. 4.5.3b – średnie w sezonie letnim (czerwiec–lipiec–sierpień). Proste regresji wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów dla okresów 1960–1979, 1980–1996 i 1997–2022/2023 (2022 dla MSR-2, 2023 dla ERA5). Przerywane gładkie krzywe przedstawiają wygładzone średnie stosując lokalną regresję typu LOWESS.

Przebiegi serii czasowych na Rys. 4.5.3 wskazują, że w okresach (1980-1996) i (1997-2022/2023) kierunki zmian w odchyłkach średnich rocznych (Rys. 4.5.3a) i letnich (Rys. 4.5.3b) nad Polską w odniesieniu do referencyjnego poziomu w średnich szerokościach geograficznych (1980-1996 i 1997-2022/2023) są praktycznie takie same w obu bazach danych. W okresie letnim nad Polska od 1980 r. formuje się ujemna anomalia (statystycznie istotna odpowiednio na poziomie 1σ i 2σ w okresie 1980-1996 i 1997-2022/2023, Tabela 4.5.2). W przebiegu średnich rocznych CZO_3 jest to widoczne tylko w okresie 1980-1996 (ujemny trend jest istotny statystycznie na poziomie 1σ). Podobną sytuację znaleziono także nad Belskiem, Centralna Europą i Wschodnią Azją, a przeciwną (formowanie dodatniej anomalii) nad Północną Ameryką. Średnie letnie CZO_3 z reanalizy ERA5 dla okresu 1960-1979 wskazują na formowanie się dodatniej anomalii nad Polską, Centralna Europa i Europą, co jednak nie potwierdzają wyniki z bazy MSR-2.

Tabela 4.5.2. Liniowe trendy (w Dobsonach na 10 lat) i ich standardowe odchylenie w serii czasowej różnic między regionalnymi średnimi CZO_3 (całorocznymi i dla sezonu letniego) i odpowiednimi średnimi w całej strefie $35\text{-}60^\circ\text{N}$ dla wybranych regionów w okresach odpowiadającym trzem fazom zmian koncentracji substancji niszczącej stratosferyczny ozon w średnich szerokościach geograficznych. Pogrubione wyniki oznaczają wartości istotne na poziomie 2σ

Region	1960-1979		1980-1996		1997-2023	
	ERA5	MSR-2	ERA5	MSR-2	ERA5	MSR-2
Lato						

Belsk	5.4 ± 2.2	1.9 ± 2.1	-4.4 ± 2.8	-4.7 ± 2.7	-3.4 ± 1.4	-3.0 ± 1.4
Polska	4.4 ± 2.2	1.3 ± 2.0	-4.0 ± 2.7	-4.3 ± 2.6	-3.0 ± 1.4	-2.9 ± 1.4
Centr. Europa	5.2 ± 1.9	3.5 ± 1.9	-3.6 ± 2.5	-3.8 ± 2.4	-3.0 ± 1.2	-2.5 ± 1.3
Europa	3.3 ± 1.1	1.8 ± 0.9	-0.0 ± 1.3	-0.1 ± 1.1	-1.0 ± 0.7	-1.0 ± 0.6
Płn. Ameryka	1.0 ± 1.0	4.6 ± 0.8	0.3 ± 1.2	0.9 ± 1.1	-0.3 ± 0.6	-0.4 ± 0.6
Wsch. Azja	-3.0 ± 1.0	-5.8 ± 1.1	-0.5 ± 1.3	-0.4 ± 1.4	1.0 ± 0.6	0.6 ± 0.7
Rok						
Belsk	1.4 ± 1.6	-0.5 ± 1.5	-2.7 ± 2.0	-3.1 ± 1.8	-0.7 ± 1.0	-0.7 ± 1.0
Polska	1.3 ± 1.6	-0.5 ± 1.4	-2.9 ± 2.0	-3.2 ± 1.8	-0.2 ± 1.0	-0.4 ± 1.0
Centr. Europa	1.9 ± 1.4	0.6 ± 1.3	-2.3 ± 1.8	-2.5 ± 1.7	-0.4 ± 0.9	-0.4 ± 0.9
Europa	2.3 ± 0.8	2.0 ± 0.8	0.1 ± 1.0	0.2 ± 1.0	0.3 ± 0.5	0.1 ± 0.5
Płn. Ameryka	-1.0 ± 0.8	0.5 ± 0.9	2.4 ± 1.1	2.7 ± 1.1	0.9 ± 0.5	0.7 ± 0.6
Wsch. Azja	-2.0 ± 1.0	-0.9 ± 1.0	-2.3 ± 1.3	-2.5 ± 1.2	-0.1 ± 0.6	-0.3 ± 0.7

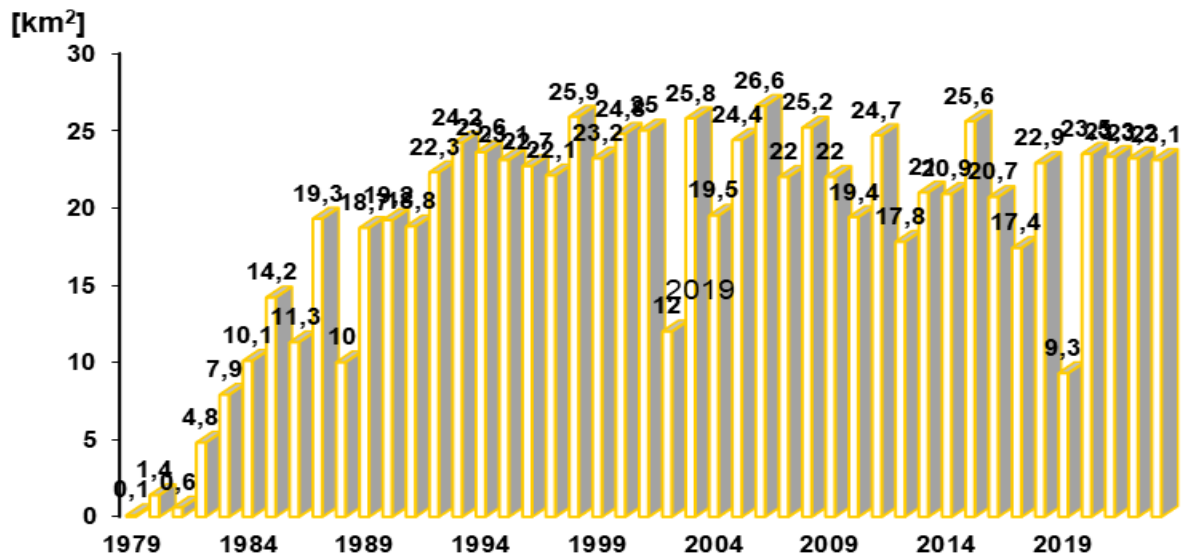
Mechanizmem różnicującym tempo zmian w warstwie ozonowej w średnich szerokościach geograficznych na półkuli północnej mogą być np. lokalne zmiany w dynamice atmosfery powiązane ze zmianami klimatu, prowadzące np. do wzrostu napływu powietrza ubogiego w ozon ze stratosfery równikowej do wybranych obszarów poza równikowych, co maskuje regenerację warstwy ozonowej w XXI wieku związaną ze stopniowym usuwaniem ze stratosfery związków chemicznych niszczących ozon.

Zmienność ozonu w wysokich warstwach atmosfery jest wynikiem procesów chemicznych, więc statystycznie istotny wzrostowy trend w wysokiej stratosferze nad Belskiem (Rys. 4.2.1c) jest potwierdzeniem skuteczności ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową na tych wysokościach w atmosferze, które wprowadził Protokół Montrealski z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. Dodatni trend w tej warstwie został stwierdzony na całym globie (Szeląg i inni, 2020).

Zmiany całkowitej zawartości ozonu nad Antarktydą i Arktyką

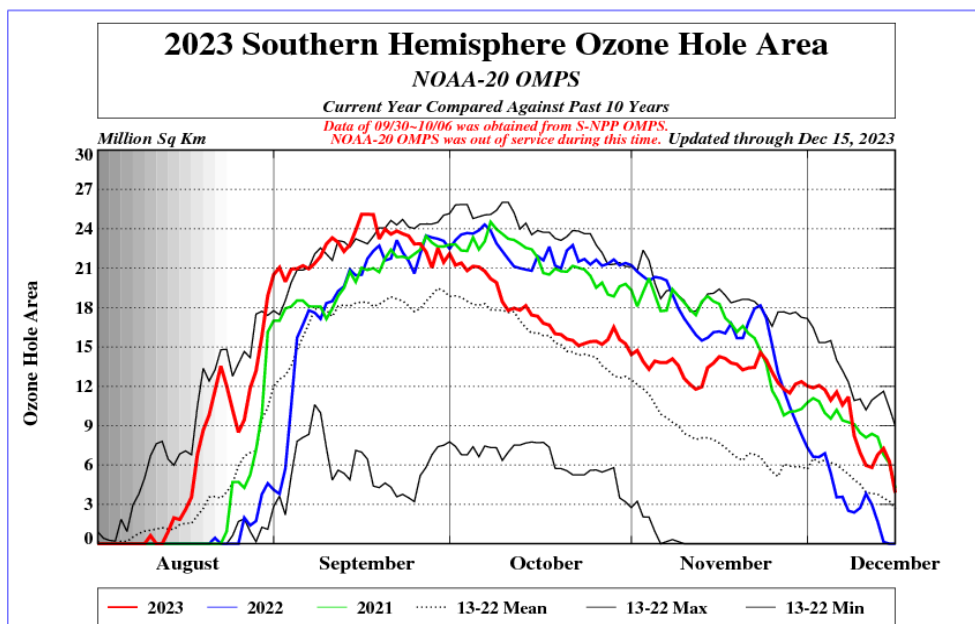
Zwyczajowo mówi się o występowaniu „dziury ozonowej” kiedy CZO₃ jest poniżej 220 Dobsonów. Taka sytuacja zdarza się regularnie w ostatnich 40 latach w okresie sierpień-grudzień nad obszarami polarnymi półkuli południowej. Przed 1979 rokiem nie notowano nad Antarktydą wartości CZO₃ mniejszych od 220 Dobsonów. Maksymalny obszar „dziury ozonowej” w 2001 roku osiągnął prawie 29 mln km². Na Rys.4.5.5 przedstawiono średni obszar „dziury ozonowej” w okresie 07.09 – 13.10 w latach 1979–2023. Od połowy lat 90-tych XX wieku powierzchnia „dziury ozonowej” w tym okresie oscyluje wokół dwudziestu kilku milionów km². W sezonie 2023 średnia powierzchnia dziury ozonowej wynosiła 23,1 mln km² i była zbliżona do

wartości maksymalnej (26,6 mln km²) z 2006 r.. Natomiast w 2019 roku obserwowano jedną z najmniejszych dziur ozonowych (9,3 mln km²) w XXI wieku. Tak duże zmiany powierzchni dziury w ciągu kilku lat, można wyjaśnić odmiennymi warunkami termicznymi w tych latach. W 2019 r. miało miejsce ocieplenie stratosferyczne, a w latach 2020-2023 antarktyczny wir polarny był odizolowany od cieplejszych mas powietrza zalegających w średnich szerokościach geograficznych, co doprowadziło do wychłodzenia Antarktydy.



Rys. 4.5.5. Średni obszar „dziury ozonowej” w milionach km² w okresie 07.09 – 13.10 w latach 1979 – 2023. Dane pochodzą ze strony internetowej: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annual_data.txt

Niskie temperatury w stratosferze prowadzą do pojawienia się polarnych chmur stratosferycznych (z angielskiego PSC – polar stratospheric clouds), które formują się w temperaturze poniżej -78°C w niskiej stratosferze (15-20 km). PSC uznawane są jako prekursor destrukcji stratosferycznego ozonu nad tym obszarem (Solomon i inni, 1986). Dziura ozonowa w 2023 r. utrzymywała się wyjątkowo długo i znikła dopiero w drugiej połowie grudnia 2023 r. osiągając wyjątkowo duże rozmiary (bliskie najwyższym historycznym wartościom) w pierwszej połowie września (Rys. 4.5.6). Przez cały sezon wiosenny w 2023 r. na półkuli południowej (wrzesień-grudzień) powierzchnia „dziury” była powyżej średniej wieloletniej z okresu 2013-2022.

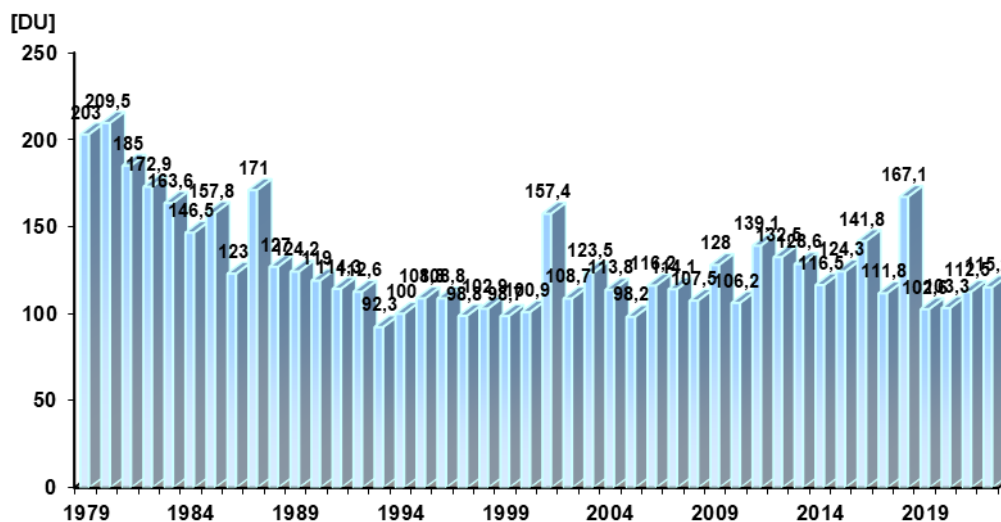


Rys. 4.5.6.

Powierzchnia antarktycznej „dziury ozonowej” w milionach km² w sezonie w latach 2021, 2022 i 2023 r. (odpowiednio krzywa zielona, niebieska i czerwona) na tle średnich dziennych obszaru dziury ozonowej w okresie 2013-2022 (kropkowana czarna krzywa), oraz maksymalnych i minimalnych dziennych wartości w latach 2013-2022 ciągle czarne krzywe nad i pod krzywą dla średnich wartości). (źródło: opracowanie NOAA, USA)

Od początku XXI wieku obserwowane są symptomy zmian (może i zaniku?) w rozległości i głębokości „dziury”. Powierzchnia dziury nie rośnie systematycznie z roku na roku, tak jak to obserwowano w latach 80-tych i wczesnych 90-tych ubiegłego wieku. Obserwowane są duże zmiany z roku na rok rozległości dziury i intensywności destrukcji ozonu w obszarze dziury. W związku ze zmianami klimatu i zwiększonymi fluktuacjami temperatury w stratosferze nad Antarktydą, co wpływa na tempo niszczenia ozonu w tej warstwie atmosfery, obserwuje się coraz częściej anomalny i nieprzewidywalny rozwój dziury ozonowej. Przez cztery kolejne lata 2020 – 2023 powierzchnia dziury ozonowej w okresie 07.09 – 13.10 była zbliżona do tej z końca lat 90-tych XX wieku i początku XX wieku, co może sugerować osłabienie tempa zaniku dziury ozonowej tych latach (Rys. 4.5.5).

Dziura ozonowa formuje się regularnie już od prawie 40 lat w końcu antarktycznej zimy (sierpień) i zanika kilka tygodni przez początkiem antarktycznego lata. Podobne zjawisko nie występuje w innych rejonach na kuli ziemskiej. Niezwykle rzadko pojawia się „dziura ozonowa” nad Arktyką i tylko podczas ekstremalnie chłodnych zim (taka ostatnio była w 2020 r). W średnich i niskich geograficznych, temperatura w stratosferze jest za wysoka i nie występują PSC.



Rys.4.5.7. Średnia z minimalnych dziennych wartości całkowitej zawartości ozonu w okresie 21.09-16.10 (w Dobsonach) nad Antarktydą w latach 1979-2023. Dane ze strony: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annual_data.txt

Jednym z parametrów określających rozmiar destrukcji ozonu nad Antarktydą jest średnia wartość minimalnych dziennych wartości CZO₃ w tym obszarze w okresie 21.09 – 16.10, kiedy dziura zwykle osiąga największy rozmiar (Rys. 4.5.7). W ubiegłym wieku bywały lata, kiedy ta wartość była poniżej 100 Dobsonów, a przed pojawieniem się dziury ozonowej (przed 1980) minimalne wartości ozonu nad Antarktydą nie spadały poniżej 220 Dobsonów. W 2023 r. średnia wartość CZO₃ w okresie 21.09-16.10 wyniosła 115,2 Dobsonów, co odpowiadała typowej wartości rejestrowanej od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku.

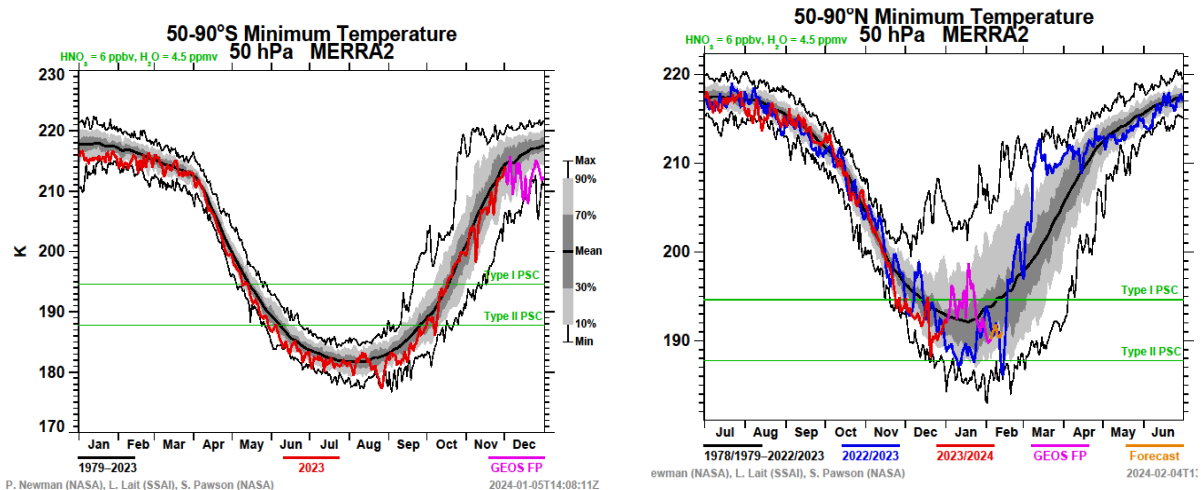
Pojawienie się, jak co roku w ostatnich dziesięcioleciach, dziury ozonowej nad Antarktydą umożliwiły warunki meteorologiczne panujące w stratosferze antarktycznej w czasie zimy (czerwiec-sierpień). Niska temperatura stratosfery przyczyniła się do utworzenia tam chmur zwanych polarnymi chmurami stratosferycznymi (PSCs). Ilość pary wodnej w stratosferze jest bardzo niska – zaledwie 5 cząsteczek pary wodnej na milion cząsteczek powietrza. Toteż w warunkach normalnych w stratosferze chmury się nie pojawiają. Jednakże, kiedy temperatura jest wystarczająco niska, zaczynają się tworzyć chmury zawierające mieszaninę wody i kwasu azotowego. Tego rodzaju chmury są nazywane polarnymi chmurami stratosferycznymi (PSCs) typu I. Na powierzchni cząstek tworzących te chmury zachodzą reakcje chemiczne, które zmieniają nieaktywne i nieszkodliwe dla ozonu związki halogenowe (np. HCl i HBr) w aktywne chlorki i bromki (np. ClO i BrO). Te aktywne formy chloru i bromu powodują w warunkach dopływu promieniowania słonecznego szybki rozpad cząsteczek ozonu w cyklu katalitycznym, w którym jedna cząsteczka ClO może rozłożyć tysiące cząsteczek ozonu, zanim ulegnie dezaktywacji spowodowanej reakcją z cząsteczką dwutlenku azotu (NO₂). Kiedy temperatura

spada jeszcze bardziej (rzędu -90°C) mogą tworzyć się chmury zawierające wyłącznie zamrożoną wodę. Te lodowe chmury nazywane są PSCs typu II. Chmury lodowe w stratosferze prowadzą do dużo większych ubytków ozonu w porównaniu do tych generowanych przez PSCs typu I, gdyż związki halogenowe szkodliwe dla ozonu są wydajniej aktywowane w reakcjach heterogenicznych zachodzących przy powierzchni lodu.

Cząstki obu typów chmur mogą rosnąć do takiej wielkości, że nie mogą już unosić się w powietrzu i wypadają ze stratosfery. Zabierają wówczas ze sobą kwas azotowy. Stanowi on substancję rezerwarową, która uwalnia dwutlenek azotu (NO_2) w warunkach dopływu promieniowania słonecznego. Jeśli NO_2 będzie usuwany ze stratosfery (tzw. proces denitryfikacji), aktywne cząsteczki chloru i bromu powodują rozkład dużo większej liczby cząsteczek ozonu zanim staną się nieaktywne reagując z tlenkami azotu.

Każdego roku w stratosferze nad Antarktydą istnieją warunki sprzyjające tworzeniu PSC (Rys.4.4.8), bowiem zimą (na półkuli południowej) potężny polarny wir izoluje ten obszar od napływu cieplejszych mas ze średnich szerokości geograficznych. Dochodzi wtedy do znacznego wychłodzenia stratosfery nad Antarktydą i PSC typ I i II mogą pojawić się w maju i zanikają w listopadzie. W sytuacji znacznego zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową, które stopniowo, lecz powoli ulega zmniejszeniu w wyniku stosowania ograniczeń w produkcji takich substancji wprowadzonych przez Protokół Montrealski z 1987, następuje całkowite zniszczenie ozonu w dolnej stratosferze (15-20 km) w sezonie wiosennym. Przebieg temperatury w stratosferze zimą i wiosną 2023 r. nad Antarktydą (krzywa w kolorze czerwonym na Rys. 4.5.8 - lewa strona) był poniżej średnich temperatur z lat 1979- 2023 (krzywa w pogrubionym kolorze czarnym) dla tego okresu. Niskie temperatury sprzyjały utrzymywaniu się PSC i silnej destrukcji ozonu typowej dla rozbudowanych „dziur” ozonowych z przełomu XX i XXI wieku.

W stratosferze nad Arktyką niskie temperatury sprzyjające tworzeniu PSCs średnio występują na znacznie mniejszym obszarze i dlatego objętość PSC jest znacznie mniejsza niż nad Antarktydą. Rekordowa objętość PSC typ I w Arktyce stanowiła ~40% maksymalnej objętości PSC typ I nad Antarktydą, natomiast w przypadku PSC typ II tylko ~10%. W niektórych latach arktyczna stratosfera była tak ciepła, że nie było warunków do powstania PSC typu II, a nawet PSC typu I. Temperatura od połowy grudnia 2022 do końca lutego 2023 była wystraszająca niska do pojawienia się PSC typu I (krzywa w kolorze niebieskim na Rys. 4.5.8 -prawa strona), co mogło doprowadzić do masowej chemicznej destrukcji ozonu nad tym obszarem i pojawienia się dziury ozonowej z wartościami CZO_3 poniżej 220 DU.

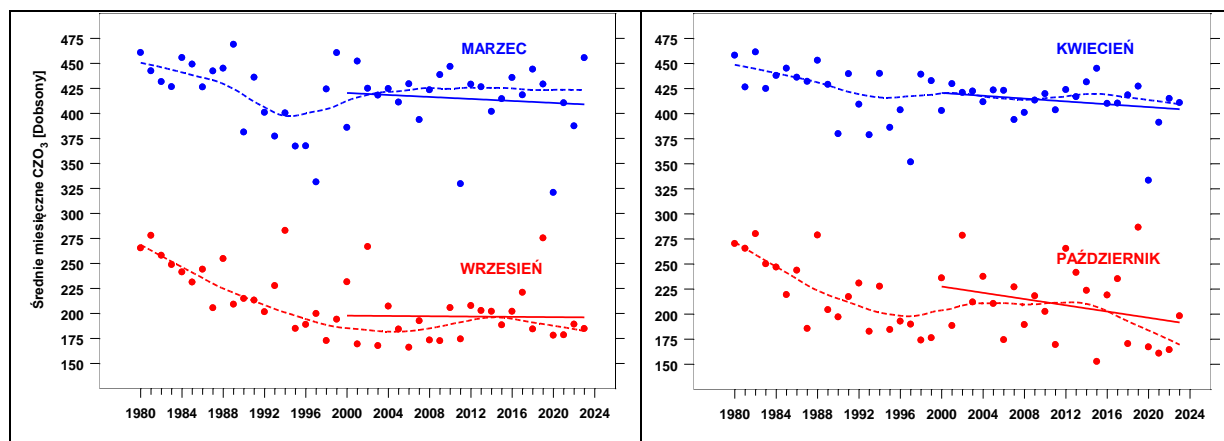


Rys. 4.5.8. Minimalna temperatura na poziomie 50 hPa w strefie poza równoleżnikiem 50° (półkula południowa -lewa strona, półkula północna – prawa strona). Pogrubiona krzywa w kolorze czarnym oznacza średnie warunki w latach 1979-2023, poziome linie (zielone) wyznaczają granice pojawienia się polarnych chmur stratosferycznych typu I i II. Cienkie krzywe (w kolorze czarnym) wyznaczają zakres maksymalnych i minimalnych wartości temperatury w tym okresie. Krzywa niebieska (prawa strona) i czerwona (lewa strona) przedstawiają przebiegi temperatury odpowiednio w okresie lipiec 2022 –czerwiec 2023 i styczeń – grudzień w 2023 roku.

Rysunek 4.5.9 przedstawia serie czasowe średnich miesięcznych CZO₃ z reanalizy MERRA-2 dla obszaru 66,5°N-90°N (Arktyka) i 66,5°S-90°S (Antarktyda) dla wybranych wiosennych miesięcy, kiedy efekt destrukcji ozonu związany ze stratosferycznymi chmurami polarnymi powinien być największy (marzec, kwiecień - Arktyka; wrzesień, październik - Antarktyda). W marcu i kwietniu 2020 r. nad Arktyką pojawiły się ekstremalnie niskie średnie miesięczne CZO₃ (najmniejsze w serii czasowej 1979-2020). Poziom ozonu osiągnął 70% średniej dla całego okresu 1979-2021. We wrześniu 2023 r. średnia miesięczna CZO₃ nad Antarktydą była w pobliżu lokalnej normy (przerywana gładka krzywa na Rys. 4.5.9). Natomiast w Arktyce w marcu znacznie powyżej normy (~30 Dobsonów). Odwrotna sytuacja była w kolejnym miesiącu wiosny, kiedy w październiku CZO₃ nad Antarktydą była ~30 Dobsonów powyżej normy, a w kwietniu w Arktyce w pobliżu normy.

Naprawa warstwy ozonowej rozpoczęła się po 1995 r. (w Arktyce) i po 2000 r. (nad Antarktydą) – Rys. 4.5.9. Stopniowa regeneracja warstwy ozonowej w obszarach podbiegunowych jest jednak słabo widoczna XXI wieku. Wydaje się, że poziom ozonu ustabilizował się w ostatnim dziesięcioleciu, a w październiku nad Antarktydą zaczyna się pojawiać zaskakująco spadkowa tendencja, która jest istotna na poziomie 1σ, lecz nie na 2σ. Oczekiwano wyraźnej wzrostowej tendencji. Natomiast w Arktyce ujemne trendy w kwietniu są istotne tylko na poziomie 1σ i każdy kolejny rok może zmienić istotność szacowanego trendu. Trudno w tym momencie określić kierunek zmian w warstwie ozonowej w obszarach

podbiegunowych, zwłaszcza, że „dziura ozonowa w latach 2020-2023 nad Antarktydą była tak rozległa jak na przełomie XX i XXI wieku i trwała wyjątkowo długo w 2012 i 2023 r (Rys. 4.5.6). Natomiast nad Arktyką w 2020 r. pojawiła się „dziura ozonowa” nieobserwowana w tym rejonie od 2010 roku.



Rys. 4.5.9. Średnie miesięczne CZO₃ w jednostkach Dobsona nad Arktyką (kolor niebieski) i Antarktyką (kolor czerwony) w dwóch pierwszych miesiącach wiosennych w okresie 1980-2023. Proste przedstawiają liniowe trendy w okresie 2000-2023. Wykorzystano dane z reanalizy MERRA-2

Liczne opracowania wskazują na znaczący wpływ zmian w cyrkulacji atmosfery na obserwowane długookresowe tendencje zmian w warstwie ozonowej. Zmiany w warstwie ozonowej są wypadkowym efektem zmniejszenia zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową i specyficznej cyrkulacji w atmosferze prowadzącej do długookresowych oscylacji CZO₃. Wzrostowe, bez ustalonego kierunku, lub nawet spadkowe tendencje w CZO₃ związane z naturalnymi oscylacjami w dynamice dolnej stratosfery mogą występować na przemian utrudniając ocenę tempa regeneracji warstwy ozonowej.

Krzyżcin i Czerwińska (2024) dyskutowali, że naprawa warstwy ozonowej nad Antarktydą jest ciągle w toku ze względu na stopniowe zmniejszanie koncentracji SNWO₃ w dolnej stratosferze zapoczątkowane około 2001 r., które było wynikiem funkcjonowania ograniczeń w produkcji i stosowaniu SNWO₃ wprowadzonych przez Protokół Montrealski z 1987 i jego późniejsze poprawki. Szczególna dynamika atmosfery w ostatnich latach i ekstremalne wydarzenia, takie jak rozległe pożary w Australii na przełomie 2019/2020 i erupcja wulkanu Hunga Tonga na Pacyfiku (początek 2022), przyczyniły się do wzmocnienia dziury ozonowej w latach 2020-2023. Zmiany klimatu w XXI wieku (a szczególnie wzrost zawartości pary wodnej w stratosferze) będą zwiększały objętość PSC, co w konsekwencji doprowadzi do wzrostu tempa destrukcji ozonu. Obecne szacowanie czasu zaniku dziury ozonowej na około 2070 r. zakładające w przyszłości tempo usuwania substancji zubożających warstwę ozonową ze stratosfery takie jak to, które obecnie obserwuje się nad Antarktydą, wydaje się być bardzo niepewne.

Mieszanie w stratosferze powietrza równikowego z natury ubogiego w ozon z powietrzem w średnich szerokościach geograficznych osłabia tempo naprawy warstwy ozonowej w wybranych rejonach na kuli ziemskiej (Ball i in. 2020). Dodatkowo stwierdzony wzrost koncentracji ozonu przyziemnego w strefie tropików sprzyja większej emisji jodu z powierzchni oceanu, powodując zmniejszenie zawartości ozonu w dolnej stratosferze nad równikiem, a następnie także i w strefie średnich szerokości geograficznych (Koenig i in. 2020). Potencjał niszczenia ozonu przez jod jest porównywalny z chlorem i bromem uwalnianym się z antropogenicznych gazów przenikających do stratosfery (Koenig i in. 2020), a których stosowanie zostało zabronione przez Protokół Montrealski z 1987 roku i późniejsze poprawki. Istnieją więc przesłanki do osłabienia regeneracji warstwy ozonowej, a może i powrotu do spadkowej tendencji zawartości ozonu w stratosferze nad niektórymi obszarami.

Mechanizmy zarówno dynamiczne jak i chemiczne decydujące o zmianach w warstwie ozonowej nie są do końca rozpoznane. W tej sytuacji należy kontynuować prowadzony monitoring zmian całkowitej zawartości ozonu i jego profilu na stacjach naziemnych, a zwłaszcza na tych, które jak Belsk prowadzą ciągle wieloletnie pomiary zapewniając wysoka jakość danych i tym samym stwarzając podstawy do weryfikacji danych satelitarnych i hipotez dot. ewolucji warstwy ozonowej w wyniku współdziałania procesów dynamicznych i chemicznych zachodzących w atmosferze.

Bibliografia

Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., Yu, P., Ziemke, J. R., and Rozanov, E. V.: Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting

- ozone layer recovery, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1379-1394, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>, 2018.
- Ball W.T., Chiodo G., Abalos M., Alsing J.: Inconsistencies between chemistry climate model and observed lower stratospheric trends since 1998, *Atmospheric Chemistry and Physics*, DOI: 10.5194/acp-2019-734, 2020
- Chipperfield, M.P., Bekki, S., Dhomse, S., Harris, N.R.P., Hassler, B., Hossaini, R., Steinbrecht, W., Thiéblemont, R., and Weber, M.: Detecting recovery of the stratospheric ozone layer, *Nature*, 549, 211-218, doi:10.1038/nature23581, 2017.
- Czerwińska, A.E., and Krzyścin, J.W.: Climatological aspects of the increase of the skin cancer (melanoma) incidence rate in Europe, *International Journal of Climatology*, *Int. J. Climatol.*, 40, 3196-3207, <https://doi.org/10.1002/joc.6391>, 2020.
- Frith, S.M., Kramarova, N.A., Stolarski, R.S., McPeters, R.D., Bhartia, P.K., and Labow, G.J.: Recent changes in total column ozone based on the SBUV Version 8.6 Merged Ozone Data Set, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 9735-9751, doi:10.1002/2014JD021889, 2014.
- Hossaini, R., Chipperfield, M.P., Montzka, S.A., Leeson, A.A., Dhomse, S., and Pyle, J.A.: The increasing threat to stratospheric ozone from dichloromethane, *Nature Communication*, 8, doi: 10.1038/ncomms15962, 2017.
- Koenig T.K., Baidar S., Campuzano-Jost P., Cuevas C.A., Dix B., Fernandez R.P., Guo H., Hall S.R., Kinnison D., Nault B.A., Ullmann K., Jimenez J.L., Saiz-Lopez A., Volkamer R., 2020, Quantitative detection of iodine in the stratosphere, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117 (4), 1860-1866, DOI: 10.1073/pnas.1916828117, 2020.
- Krzyścin, J.W., Long-term changes in ozone mini-hole event frequency over the northern hemisphere derived from ground-based measurements, *Int. J. Climatol.* 22; 1425-1439, 2002
- Krzyścin, J.W., and Rajewska-Więch B., Ozone recovery as seen in perspective of the Dobson spectrophotometer measurements at Belsk (52°N, 21°E) in the period 1963-2008, *Atmospheric Environment* 43, 6369-6375, 2009a.
- Krzyścin, J.W., and Rajewska-Więch B., Trends in the ozone vertical distribution from the Umkehr observations at Belsk, 1963-2007, *International Journal of Remote Sensing*, vol.30, 3917-3926, 2009b.
- Krzyścin, J.W., Rajewska-Więch, B., and Jarosławski, J., The long-term variability of atmospheric ozone from the 50-yr observations carried out at Belsk (51.84°N, 20.78°E), Poland, *Tellus B*, 65, 21779, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.21779>, 2013.
- Krzyścin, J.W., The ozone recovery in the NH extratropics: the trend analyses of SBUV/SBUV-2 merged ozone data in the 1979-2012 period, *Atmospheric Environment* 98, 17-24, 2015.
- Krzyścin, J.W., and Rajewska-Więch, B., Specific variability of total ozone over Central Europe in the period 1979-2014. *International Journal of Climatology*, 36(10) 3539-3549, 2016.
- Krzyścin J, and Baranowski, D., Signs of the ozone recovery based on multi-sensor reanalysis of total ozone for the period 1979-2017. *Atmospheric Environment*, 199, 334-344, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.050>, 2019.
- Krzyścin J., Rajewska-Więch B., i Borkowski J. Stan warstwy ozonowej nad Polską w okresie 1979-2018. *Przegląd Geofizyczny*, 65, Zeszyt 3-4, 103-121, doi: 1032045/PG-2020-011, 2020.
- Krzyścin, J., and Czerwińska, A., Signs of Slowing Recovery of Antarctic Ozone Hole in Recent Late Winter–Early Spring Seasons (2020–2023). *Atmosphere* 2024, 15(1), 80; <https://doi.org/10.3390/atmos15010080>.
- Lickley M., Solomon S., Fletcher S., Velders G.J.M., Daniel J., Rigby M., Montzka S.A., Kuijpers L.J.M., Stone K.: Quantifying contributions of chlorofluorocarbon banks to

- emissions and impacts on the ozone layer and climate, *Nature Communications*, 11, 1380, DOI: 10.1038/s41467020-15162-7, 2020.
- Newchurch, M.J., Yang E.S., Cunnold D.M., Reinsel G.C., Zawodny J.C., and Russel III J.M., Evidence for slowdown in stratospheric ozone loss: First stage of ozone recovery, *Journal of Geophysical Research*, vol.108, 4507, 2003.
- Pazmino, A., Godin-Beekmann, S., Hauchecorne, A., Claud, C., Khaykin, S., Goutail, F., Wolfram, E., Salvador, J., and Quel, E.: Symptoms of total ozone recovery inside the Antarctic vortex during Austral spring, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2017-1157>, in review, 2017.
- Rajewska-Więch B., and Krzyścin J., Changes in total column ozone at Belsk in perspective of ozone changes over Europe 1963-2008 (in Polish), *Przegląd Geofizyczny*, Z. 1-2, s. 49-59, 2010.
- Solomon, S., Garcia, R. R., Rowland, F. S., and Wuebbles, D. J.: On the depletion of Antarctic ozone, *Nature*, 321, 755–758, <https://doi.org/10.1038/321755a0>, 1986.
- Solomon, S., Ivy, D.J., Kinnison, J., Mills, M.J., Neely, R.R., and Schmidt, A.: Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, *Science*, 353, 269-274, doi: 10.1126/science.aae.0061, 2016.
- Szelağ, M. E., Sofieva, V. F., Degenstein, D., Roth, C., Davis, S., and Froidevaux, L.: Seasonal stratospheric ozone trends over 2000–2018 derived from several merged data sets, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 7035–7047, <https://doi.org/10.5194/acp-20-7035-2020>, 2020
- Steinbrecht, W., Froidevaux, L., Fuller, R., Wang, R., Anderson, J., Roth, C., Bourassa, A., Degenstein, D., Damadeo, R., Zawodny, J., Frith, S., McPeters, R., Bhartia, P., Wild, J., Long, C., Davis, S., Rosenlof, K., Sofieva, V., Walker, K., Rahpoe, N., Rozanov, A., Weber, M., Laeng, A., von Clarmann, T., Stiller, G., Kramarova, N., Godin-Beekmann, S., Leblanc, T., Querel, R., Swart, D., Boyd, I., Hocke, K., Kämpfer, N., Maillard Barras, E., Moreira, L., Nedoluha, G., Vigouroux, C., Blumenstock, T., Schneider, M., García, O., Jones, N., Mahieu, E., Smale, D., Kotkamp, M., Robinson, J., Petropavlovskikh, I., Harris, N., Hassler, B., Hubert, D., and Tummon, F.: An update on ozone profile trends for the period 2000 to 2016, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10675-10690, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10675-2017>, 2017.
- Van der A, R., Allaart, M. and Eskes, H., Multi-Sensor Reanalysis (MSR) of total ozone, version 2. Dataset. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2015. 015.[doi:10.21944/temis-ozone-msr2](https://doi.org/10.21944/temis-ozone-msr2)
- WMO: Scientific Assessment of ozone Depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project Report, World Meteorological Organization, Report No. 55, p.416, Geneva, Switzerland, 2014.