

Załącznik #2

Analiza wyników modelowania na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w roku 2024

Ewaluacja modelowania w oparciu o DELTA tool i dyrektywę CAFE



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Analiza wykonana w ramach zadań ustawowych
Prawo ochrony środowiska (Dz. U. 2024 poz. 54 ze zm.)



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Praca jest finansowana ze środków
Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Warszawa 2025

Autorzy:

mgr inż. Paweł Durka

dr hab. inż. Joanna Strużewska

prof. dr hab. inż. Jacek W. Kamiński

mgr inż. Grzegorz Jeleniewicz

mgr inż. Paulina Jagiełło

mgr inż. Aleksander Norowski

mgr inż. Aleksandra Starzomska



IOŚ-PIB

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowy Instytut Badawczy

Data publikacji: Czerwiec 2025

Spis treści

1. Wstęp	4
2. Pył zawieszony PM10	5
3. Pył zawieszony PM2,5	9
4. Dwutlenek azotu (NO ₂).....	13
5. Ozon (O ₃)	17
6. Dwutlenek siarki (SO ₂).....	21
7. Zestawienie zgodności wyników modelowania z pomiarami dla poszczególnych stanowisk – na podstawie szacowania niepewności modelowania	24
Spis rysunków	28

1. Wstęp

Ewaluację modelowania wykonanego na potrzeby oceny udziału źródeł transgranicznych w Polsce w 2024 roku, dla scenariusza bazowego, wykonano w oparciu o narzędzie DELTA tool. Narzędzie DELTA zostało opracowane przez forum FAIRMODE (Forum for Air quality Modelling in Europe) przez Wspólnotowe Centrum Badawczego Komisji Europejskiej (Joint Research Center EU) i jest rekomendowanym oprogramowaniem do wykonywania tego typu analiz, popartym wieloma latami badań oraz szeregiem publikacji naukowych.

Głównym celem DELTA tool jest ewaluacja modelowania wykonywanego na potrzeby ocen jakości powietrza w oparciu o szereg wskaźników statystycznych oraz kryteria niepewności modelowania stawiane przez Dyrektywę CAFE W sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (2008/50/WE). Jako kryteria oceny wykorzystywane są przede wszystkim dwa wskaźniki: Wskaźnik Celu Modelowania (MQO – Model Quality Objective) oraz Wskaźnik Jakości Modelowania (MQI – Model Quality Indicator). Oba te wskaźniki zostały stworzone i poparte formułami, gdyż zauważono, że zwykłe statystyczne parametry wykorzystywane zazwyczaj do ewaluacji modelu nie dają odpowiedzi wprost czy dane modelowanie spełnia wymogi jakościowe by wykorzystać jego wyniki w procesie np. wsparcia monitoringu i podejmowania decyzji odnośnie kategoryzacji danej strefy pod kątem oceny jakości powietrza.

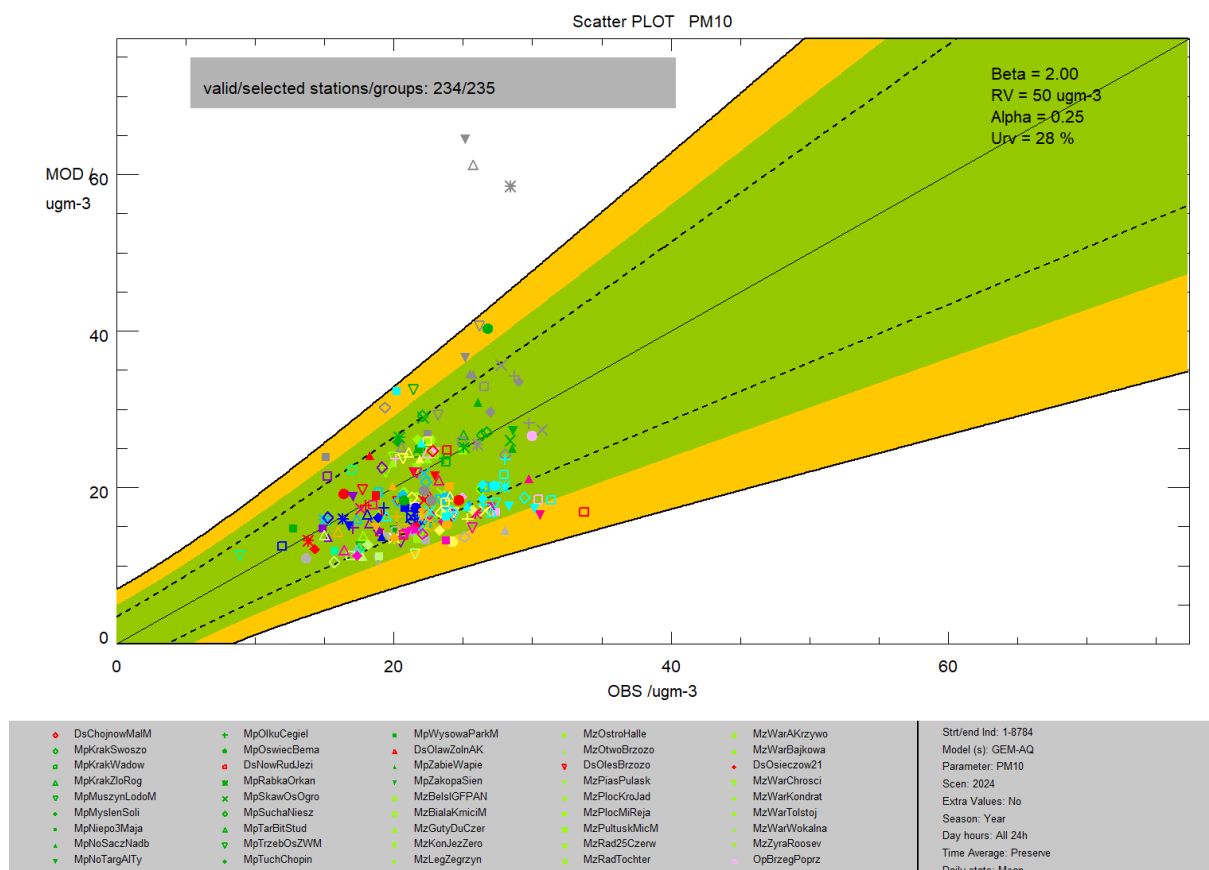
Aby modelowanie dla danego obszaru zostało uznane za spełniające wymogi jakościowe, wskaźnik MQI nie powinien przekraczać 1.0 dla 90% stacji ujętych w analizie. Wskaźnik ten obliczany jest na podstawie podsumowania wskaźników MQO wyliczanych dla każdej stacji ujętej w ewaluacji i posiadających minimum 75% kompletności danych. Graficznym przedstawieniem obu wskaźników jest tzw. Target Diagram – czyli Diagram Celu obrazujący wyniki ewaluacji dla poszczególnych stacji (znaczniki na wykresie) oraz obliczony wynik wskaźnika MQI dla modelowania w oparciu o dane godzinowe/dzienne/ośmiogodzinne, w zależności od analizowanego zanieczyszczenia (MQI_{HD} - lewy górny róg diagramu) oraz średnią roczną (MQI_{YR} – lewy górny róg diagramu). Dodatkowo DELTA tool produkuje raport podsumowujący większość parametrów statystycznych wykorzystanych do uzyskania Diagramu Celu w kontekście czasowym i przestrzennym.

Obecnie w narzędziu DELTA tool (wersja 7.2, październik 2022 r.) pełną analizę modelowania, wraz z uzyskaniem Diagramu Celu uzyskać można dla pyłu PM₁₀, pyłu PM_{2,5}, ozonu i dwutlenku azotu. Dla dwutlenku siarki można uzyskać pewne parametry statystyczne, ale nie ma możliwości przeprowadzenia pełnej analizy.

Diagramy oraz wykresy dla wszystkich zanieczyszczeń zostały przedstawione dla wszystkich stacji poza stacjami komunikacyjnymi – gdyż nie są reprezentatywne w zastosowanej do modelowania rozdzielczości siatki obliczeniowej (ok. 10km).

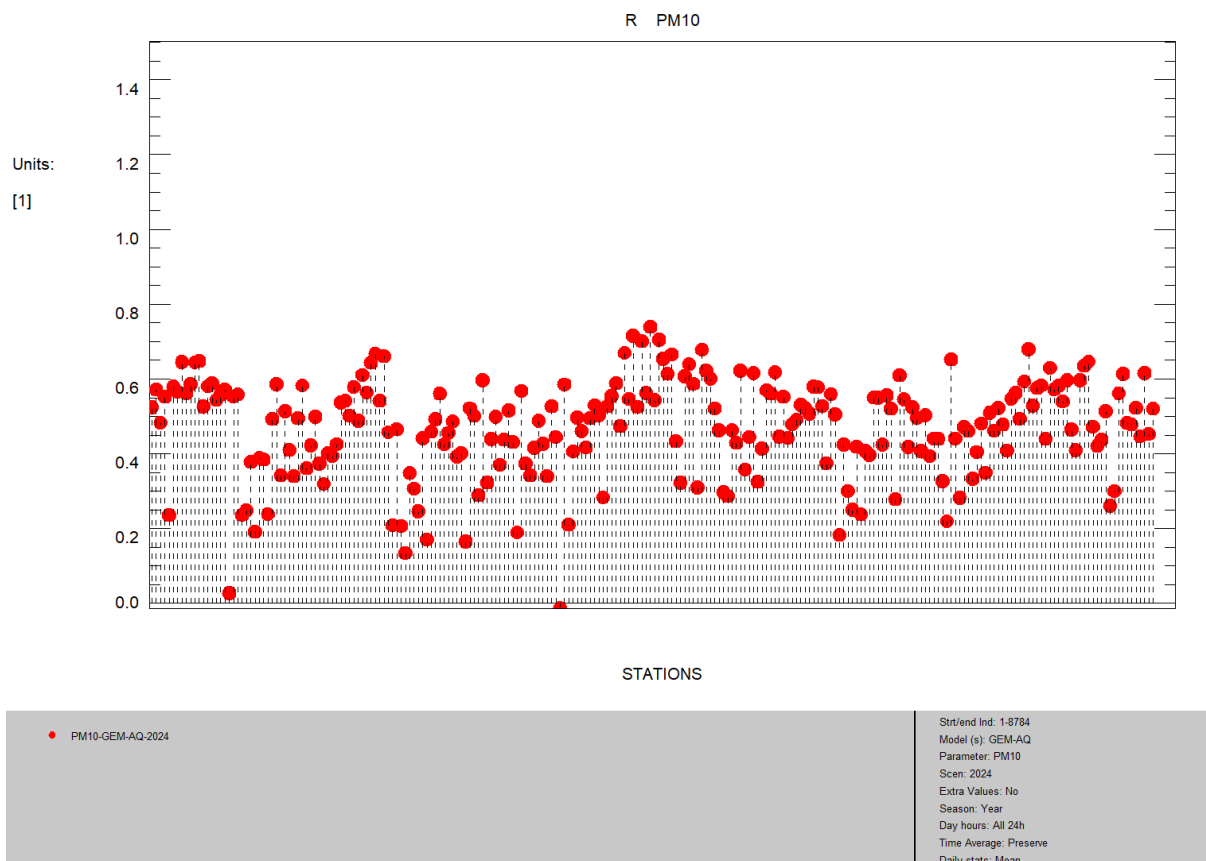
2. Pył zawieszony PM10

Rysunek 1 przedstawia wykres rozrzutu między pomiarami a wynikami modelu dla pyłu PM10. Najlepsza zgodność oraz spełnienie kryterium MQO występuje, gdy wyniki pomiarowe i modelowe układają się wzdłuż ukośnej linii prostej, wewnątrz zielonego obszaru. Wyniki modelu GEM-AQ w przypadku PM10 dla zdecydowanej większości stacji spełniają kryterium. Widoczne jest niedoszacowanie wyników przez model na dużej części stacji, choć punkty obrazujące obserwacje względem modelu wciąż znajdują się w zielonym polu obrazującym dobrą sprawdzalność modelu lub w pojedynczych przypadkach na pomarańczowym polu, wskazującym na umiarkowaną zgodność. Poza ogólną tendencją modelu do nieoszacowywania, należy zauważyć znacząco wyższe modelowane wartości względem obserwacji dla pojedynczych stacji zlokalizowanych w województwie śląskim. Jednak, podobnie jak w roku ubiegłym, analizy potwierdziły, że przyczyna problemu nie leży bezpośrednio po stronie modelu, a po stronie inwentaryzacji emisji.



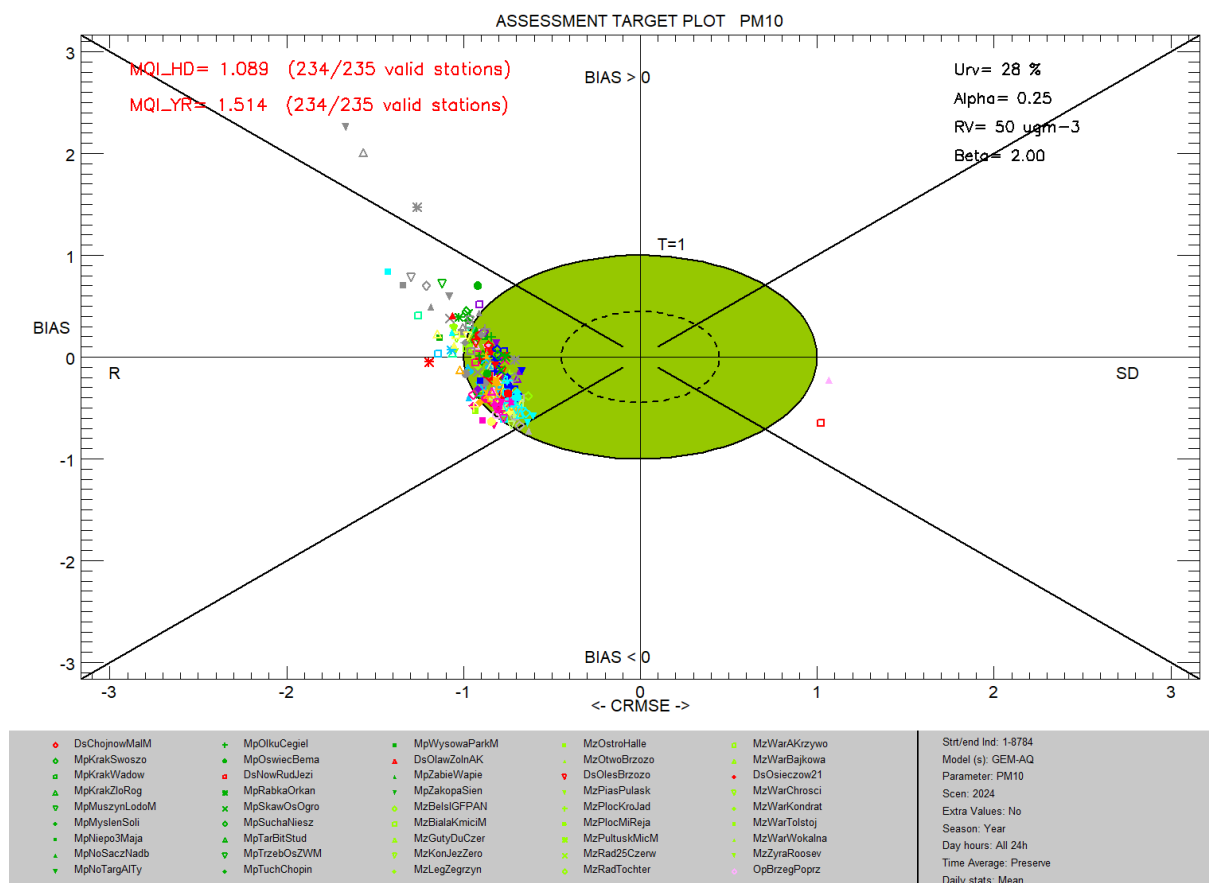
Rysunek 1. Wykres rozrzutu dla pyłu PM10, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Wykres słupkowy współczynnika korelacji (**Rysunek 2**) osiągniętego dla poszczególnych stacji w przypadku pyłu PM10 wskazuje na dobrą i bardzo dobrą zgodność wyników modelowania względem niemal wszystkich obserwacji. Dla zdecydowanej większości stacji uzyskano wynik od 0,4 do 0,8. Jedynie dla niewielkiego odsetka stacji uzyskana korelacja wynosiła poniżej tego przedziału.



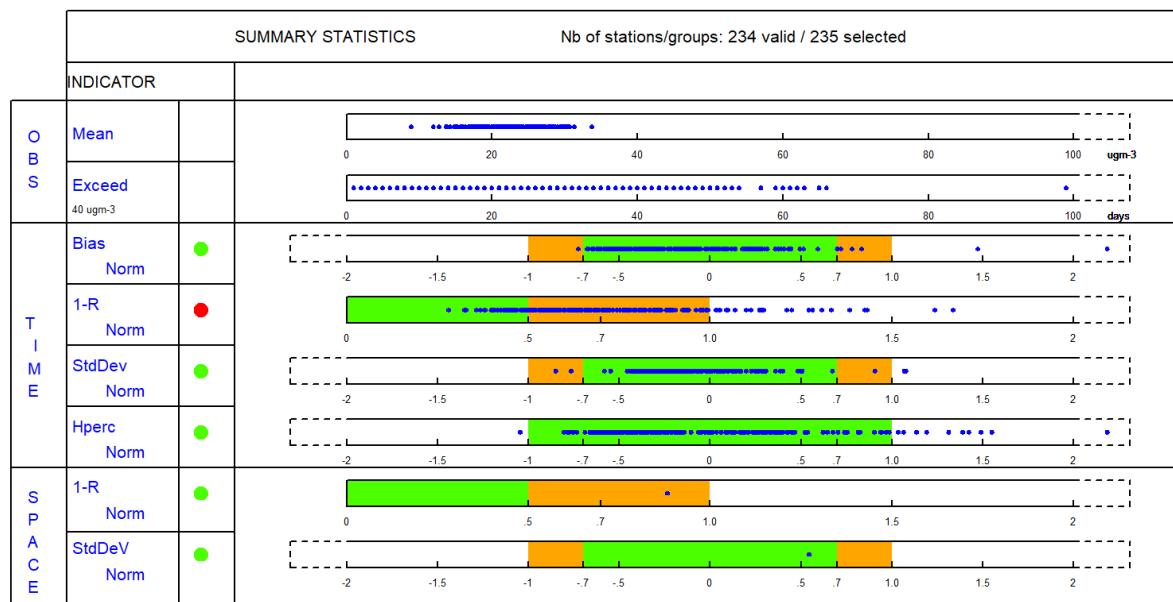
Rysunek 2. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla pyłu PM10, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Diagram celu przedstawiony na rysunku (**Rysunek 3**) wskazuje na spełnienie kryterium jakości MQI w przypadku stężeń dobowych na 234 z 235 stacji z wystarczającą kompletnością danych. Wartość kryterium rocznego wynosząca 1,514 uległa pogorszeniu względem roku poprzedniego. Wynika to bezpośrednio z dużego przeszacowania dla pojedynczych stacji w województwie Śląskim. Ogólna analiza wykresu potwierdza trend niedoszacowania przez wyniki modelu dla większości stacji.



Rysunek 3. Diagram celu dla pyłu PM10, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

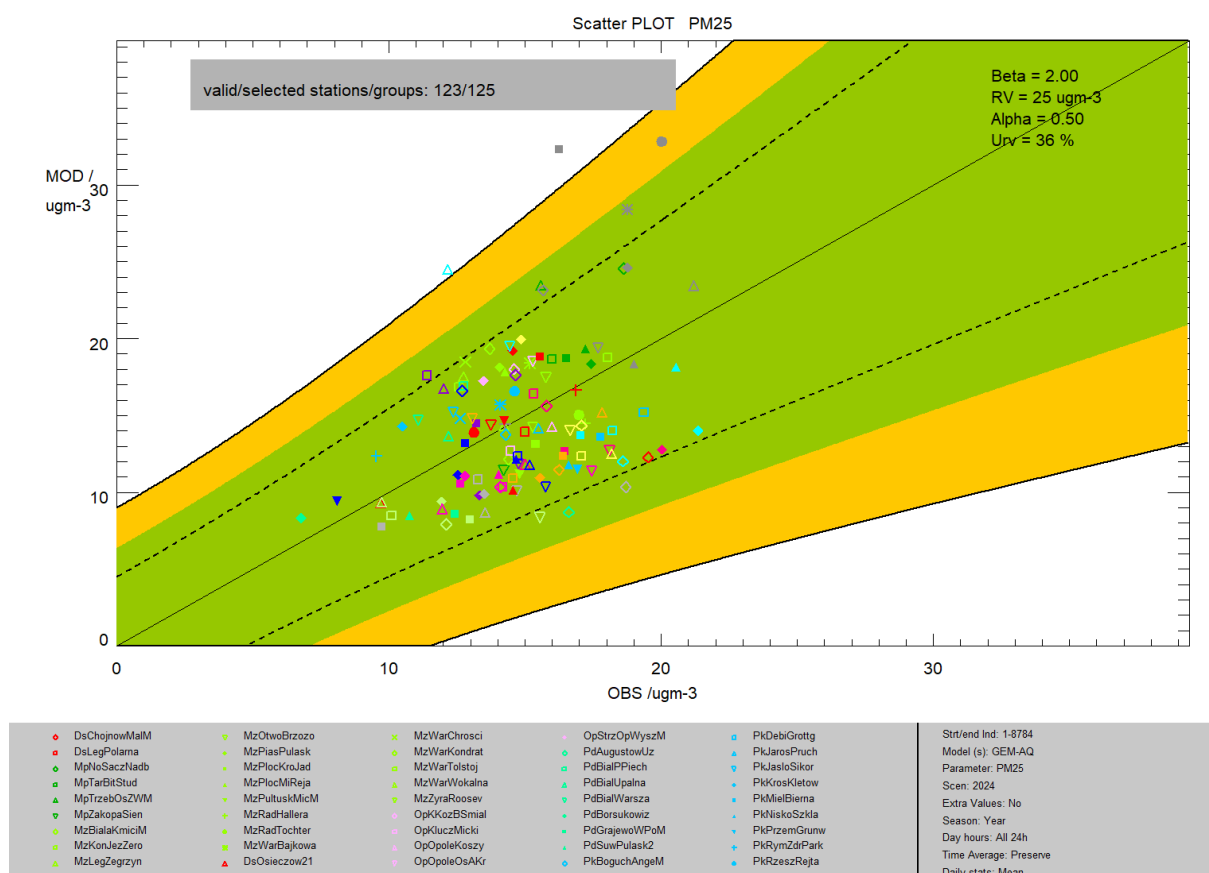
Raport podsumowujący (**Rysunek 4**) dla oceny jakości modelowania pyłu PM10 potwierdza spełnienie kryteriów błędu średniego, odchylenia standardowego oraz korelacji zarówno w ujęciu przestrzennym dla minimum 90% stacji pomiarowych użytych w analizie. Nie spełniono jedynie dopasowania modelu do obserwacji względem kryterium czasowego.



Rysunek 4. Raport podsumowujący analizę w DELTA tool dla pyłu PM10, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

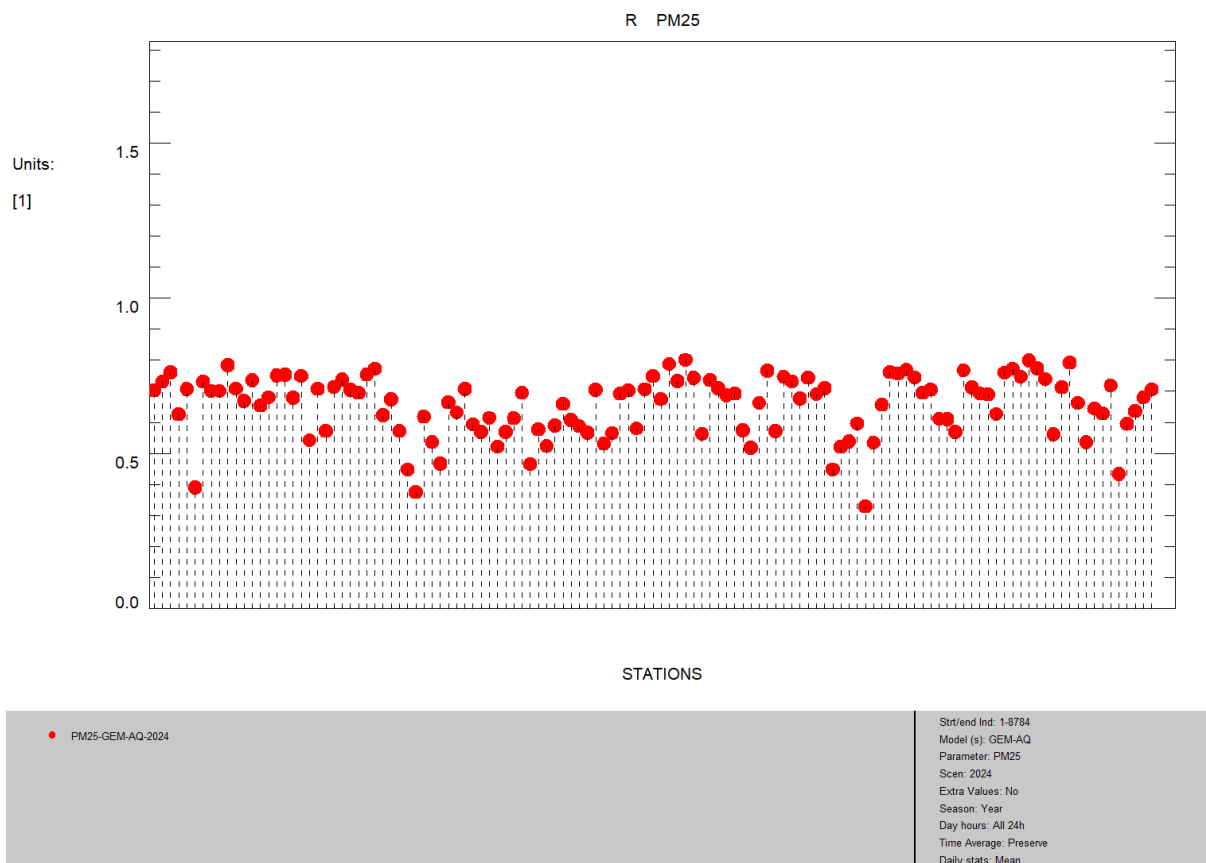
3. Pył zawieszony PM2,5

Rysunek 5 przedstawia wykres rozrzutu między pomiarami a wynikami modelu dla pyłu PM2,5. Najlepsza zgodność oraz spełnienie kryterium MQO występuje, gdy wyniki pomiarowe i modelowe układają się wzdłuż ukośnej linii prostej, wewnątrz zielonego obszaru. Wyniki modelu GEM-AQ w przypadku PM2,5 spełniają to kryterium. Model wykazuje tendencję do niewielkiego przeszacowania na stacji z najwyższymi pomierzonymi obserwacjami, co jednak nie wpływa na kryterium poprawności modelowania. Podobnie jak w przypadku pyłu PM10, zauważyć można pojedyncze stacje znajdujące się w województwie Śląskim, które wykazują tendencję odwrotną – przeszacowanie.



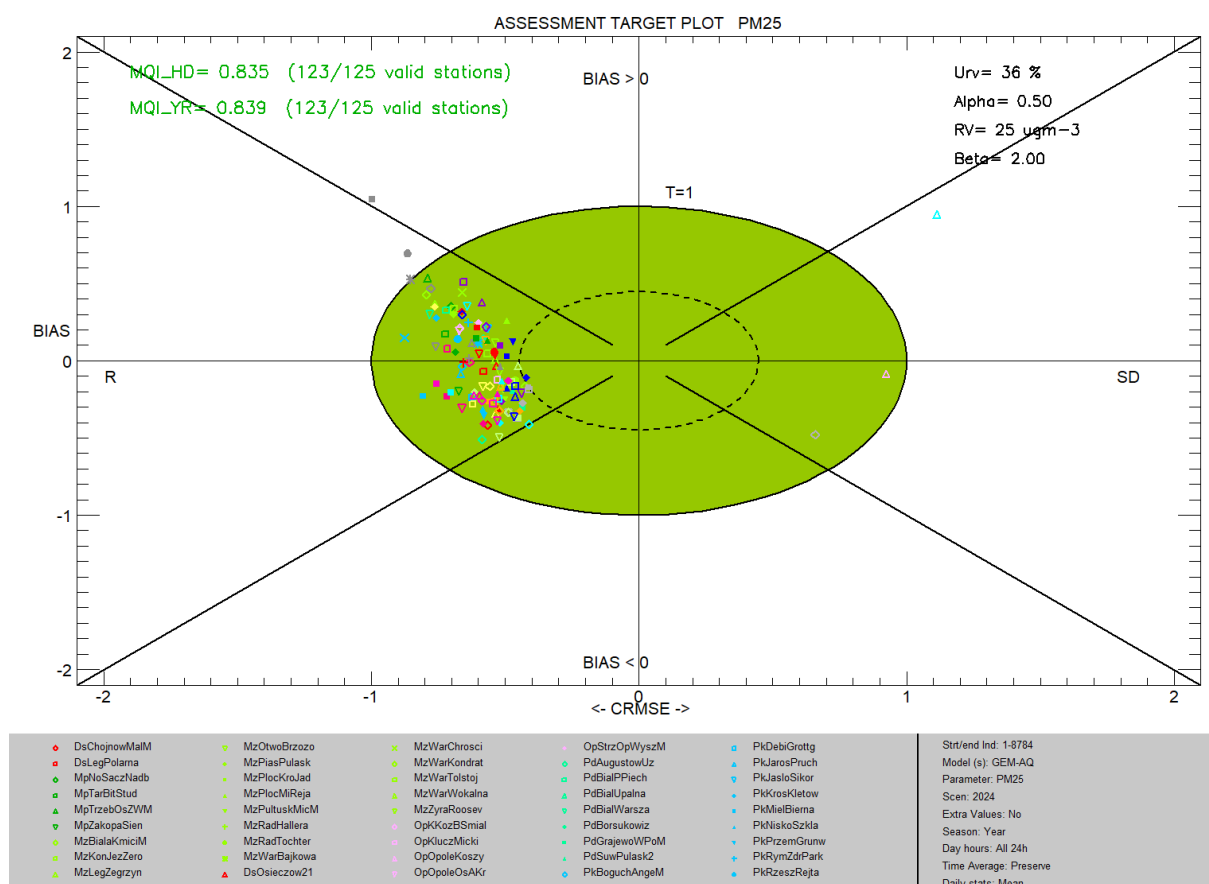
Rysunek 5. Wykres rozrzutu dla pyłu PM2,5, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Wykres słupkowy współczynnika korelacji (**Rysunek 6**) osiągniętego dla poszczególnych stacji w przypadku pyłu PM_{2,5} wskazuje na bardzo dobrą zgodność wyników modelowania względem obserwacji, podobną jak w przypadku wyników uzyskanych dla PM₁₀. Dla większości stacji uzyskano korelację od 0,5 do 0,8. Jedynie kilka stacji uzyskało korelację poniżej wspomnianego przedziału.



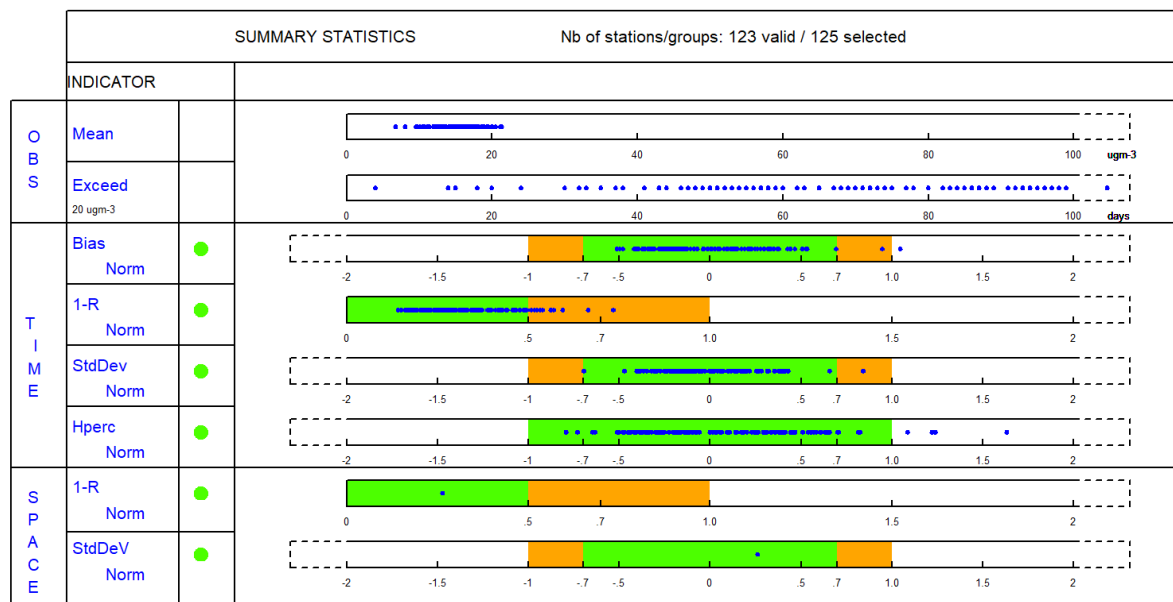
Rysunek 6. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla pyłu PM_{2,5}, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Diagram przedstawiony na poniższym rysunku (**Rysunek 7**) wskazuje na spełnienie kryterium jakości MQI dla pyłu PM_{2,5} zarówno w przypadku stężeń dobowych jak i rocznych dla 123 stacji z wystarczającą kompletnością danych. Podobnie jak w roku poprzednim, spełniono wartość kryterium rocznego wynoszącą 0,839. Znaczenie ma tutaj mniejszy wpływ stacji odstających, szczególnie stacji znajdujących się w województwie śląskim, a w tym lepsze odwzorowanie emisji w modelu dla tego zanieczyszczenia względem PM₁₀. Analiza diagramu wskazuje na niewielki trend niedoszacowujący.



Rysunek 7. Diagram celu dla pyłu PM_{2,5}, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

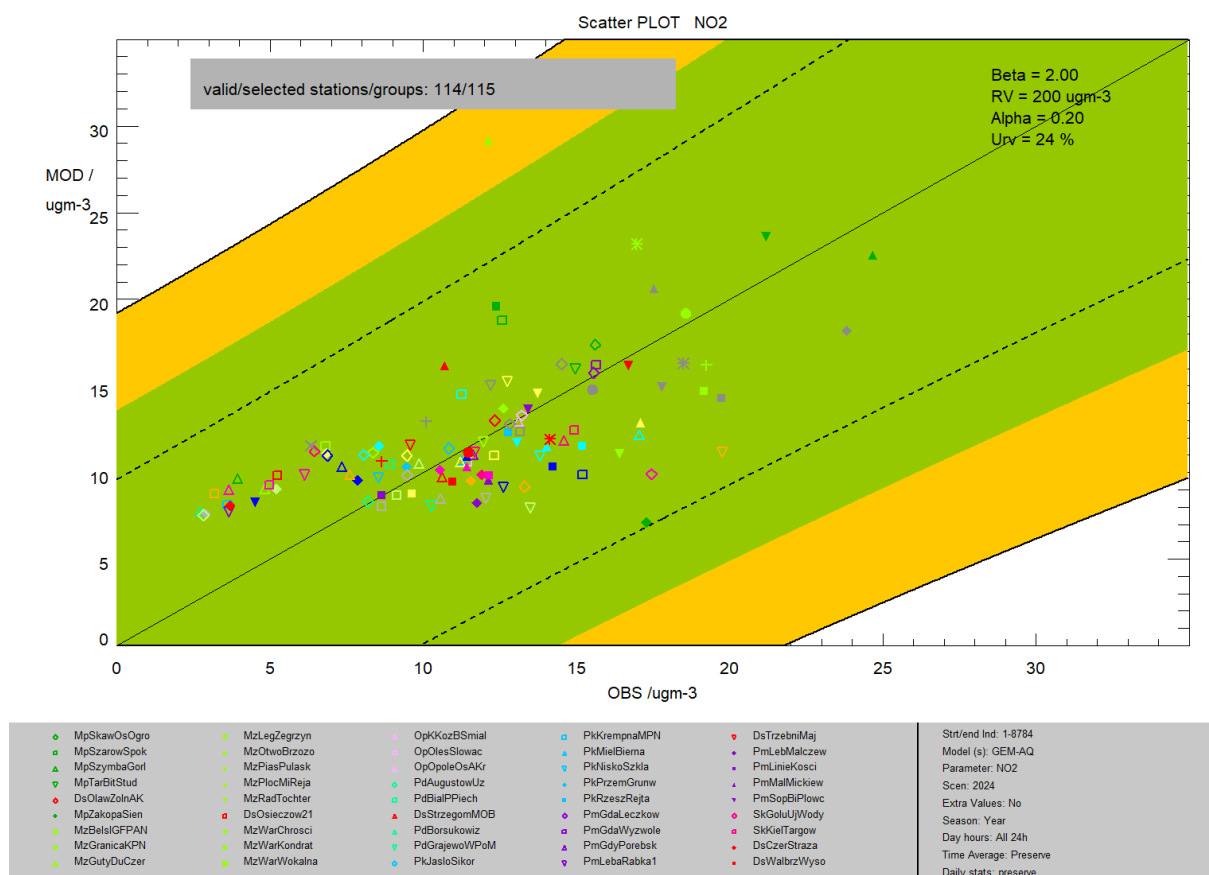
Raport podsumowujący (**Rysunek 8**) dla oceny jakości modelowania pyłu PM_{2,5} potwierdza spełnienie kryteriów błędu średniego, odchylenia standardowego oraz korelacji zarówno w ujęciu przestrzennym jak i czasowym dla minimum 90% stacji pomiarowych użytych w analizie.



Rysunek 8. Raport podsumowujący analizę w DELTA tool dla pyłu PM_{2,5}, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

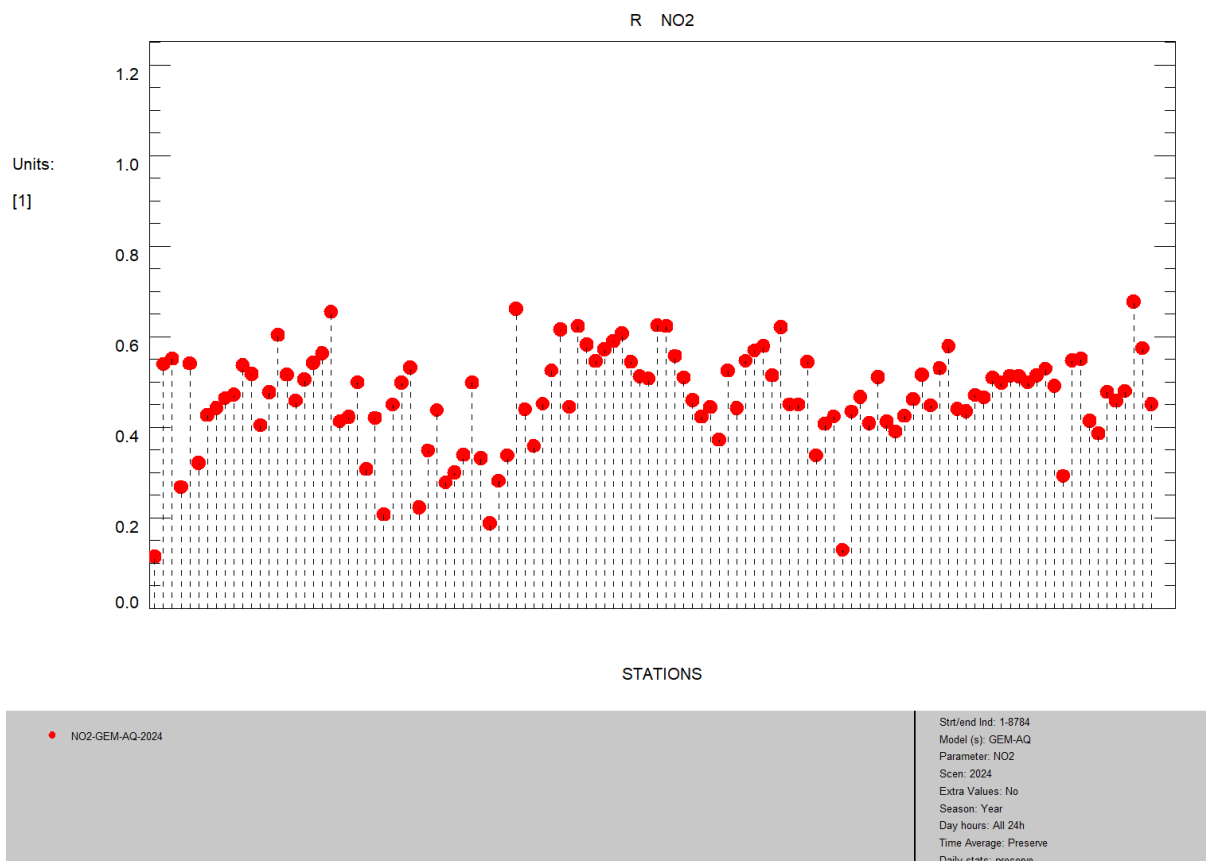
4. Dwutlenek azotu (NO₂)

Rysunek 9 przedstawia wykres rozrzutu między pomiarami a wynikami modelu dla dwutlenku azotu. Najlepsza zgodność oraz spełnienie kryterium MQO występuje, gdy wyniki pomiarowe i modelowe układają się wzdłuż ukośnej linii prostej, wewnątrz zielonego obszaru. Wyniki modelu GEM-AQ w przypadku NO₂ spełniają to kryterium dla 114 stacji z wystarczającą kompletnością danych. Model wykazuje bardzo dobre odwzorowanie wyników dla wszystkich stacji. Względnie wysokie przeszacowanie można natomiast zauważyć na pojedynczej stacji w województwie małopolskim w Płocku.



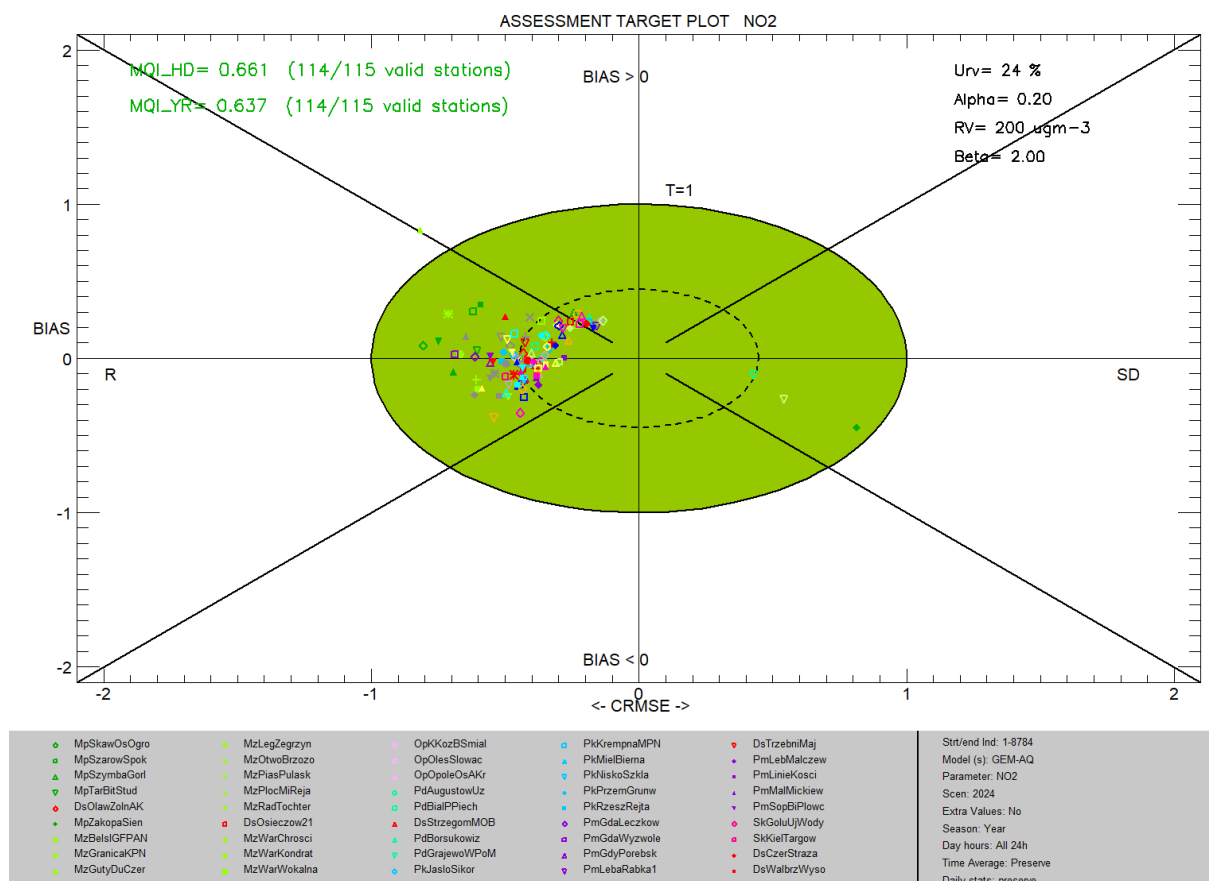
Rysunek 9. Wykres rozrzutu dla NO₂, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Wykres słupkowy współczynnika korelacji (**Rysunek 10**) osiągniętego dla poszczególnych stacji w przypadku NO₂ wskazuje na dobrą zgodność wyników modelowania względem obserwacji. Dla większości stacji uzyskano korelację od 0,3 do 0,7. Jedynie dla pojedynczych stacji korelacja wyniosła poniżej 0,4.



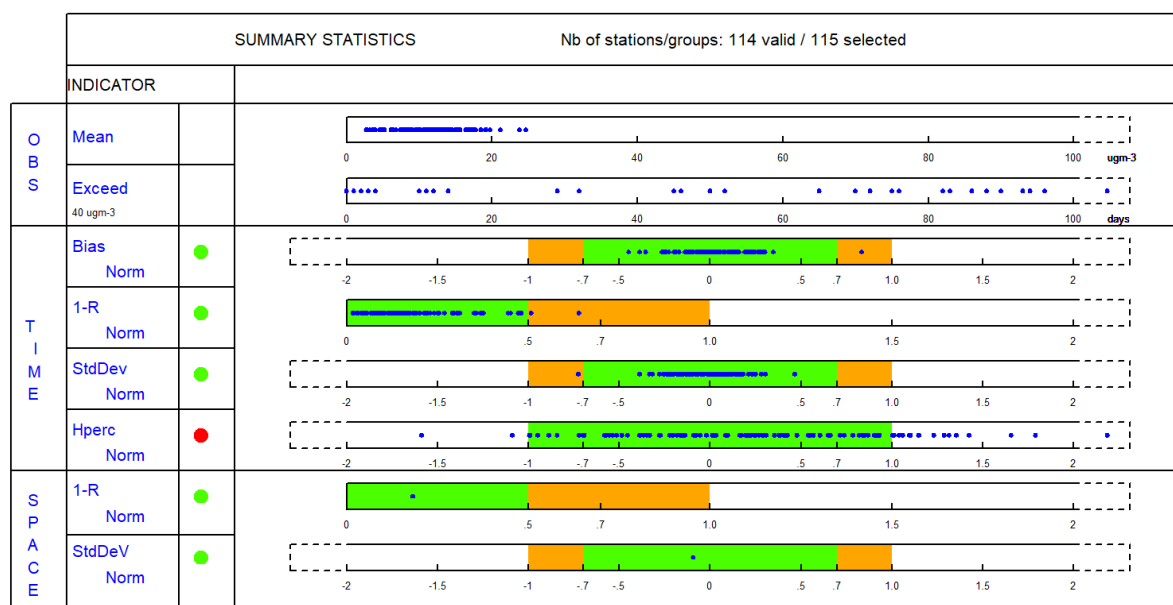
Rysunek 10. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla NO₂, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Diagram celu (**Rysunek 11**) wskazuje na spełnienie kryterium jakości MQI dla NO₂ w przypadku stężeń godzinowych na 114 stacji z wystarczającą kompletnością danych. Wysokie wyniki, zarówno kryterium dobowego oraz rocznego (0,661 i 0,637) odzwierciedlają bardzo dobrą zgodność wyników modelowania względem pomiarów, przedstawionej już na wykresie rozproszenia i korelacji.



Rysunek 11. Diagram celu dla NO₂, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

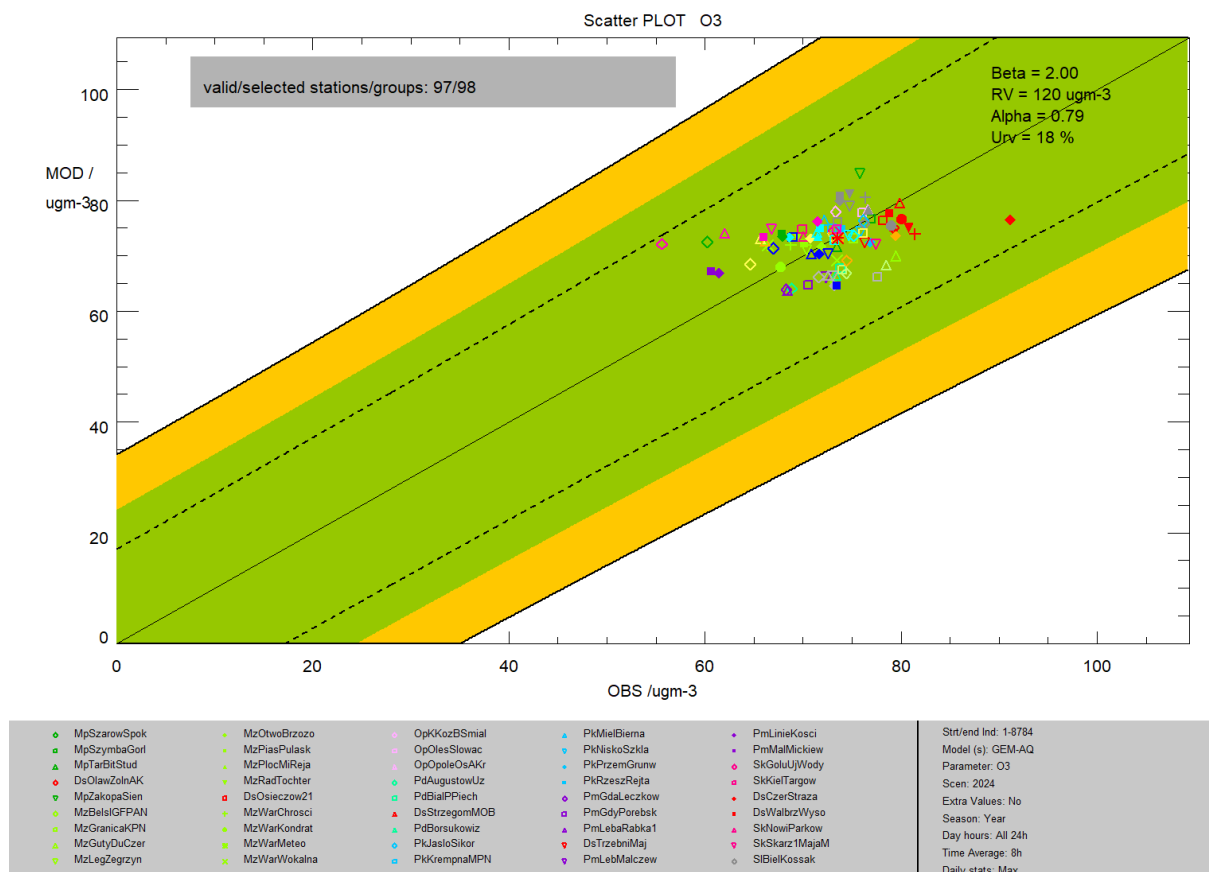
Raport podsumowujący (**Rysunek 12**) dla oceny jakości modelowania NO₂ potwierdza spełnienie kryteriów błędu średniego, odchylenia standardowego oraz korelacji zarówno w ujęciu przestrzennym jak i czasowym dla minimum 90% stacji pomiarowych użytych w analizie. Podobnie jak w roku ubiegłym, raport wskazuje również na zbyt niską możliwość modelu do odtworzenia najwyższych stężeń omawianego zanieczyszczenia (Hperc Norm).



Rysunek 12. Raport podsumowujący analizę w DELTA tool dla NO₂, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

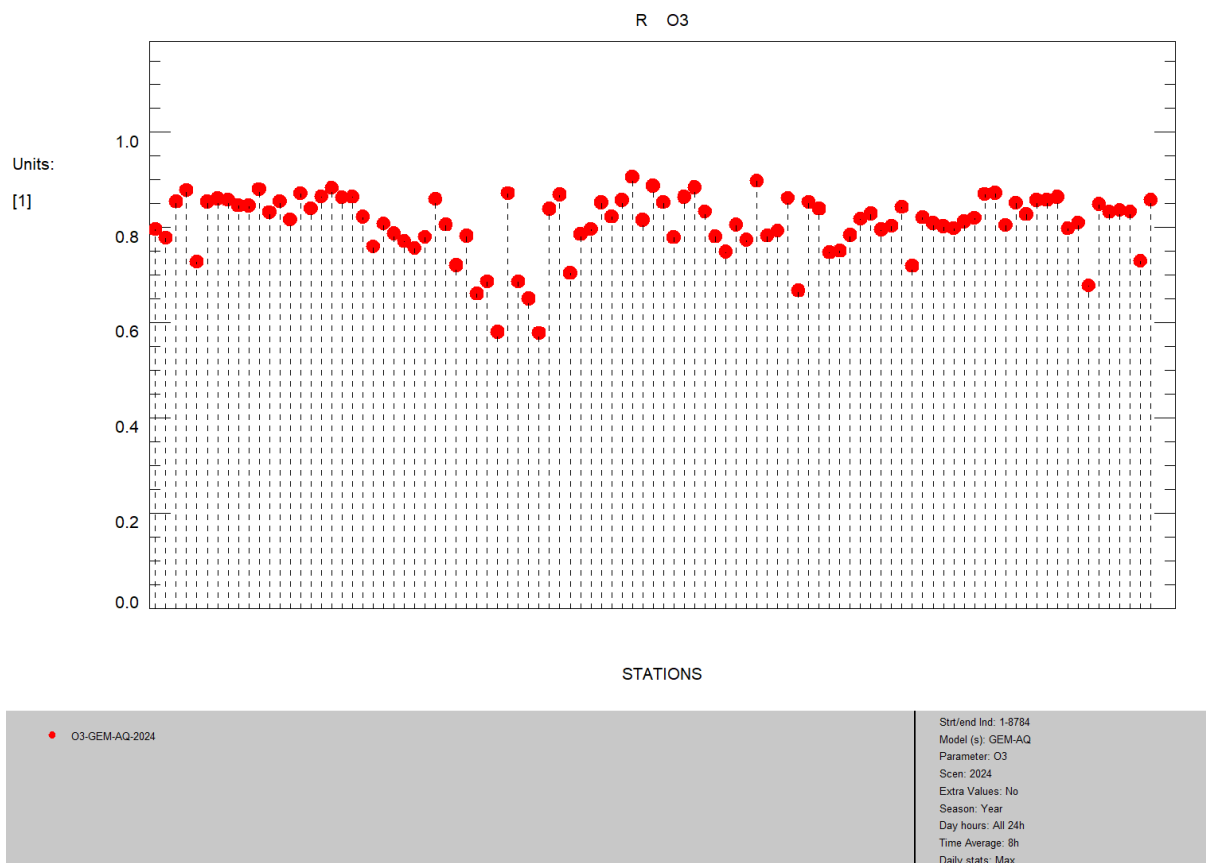
5. Ozon (O₃)

Rysunek 13 przedstawia wykres rozrzutu między pomiarami a wynikami modelu dla ozonu. Najlepsza zgodność oraz spełnienie kryterium MQO występuje, gdy wyniki pomiarowe i modelowe układają się wzdłuż ukośnej linii prostej, wewnątrz zielonego obszaru. Wyniki modelu GEM-AQ w przypadku ozonu spełniają to kryterium, a modelowane O₃ bardzo dobrze odwzorowuje pomiary dla 97 stacji z wystarczającą kompletnością danych.



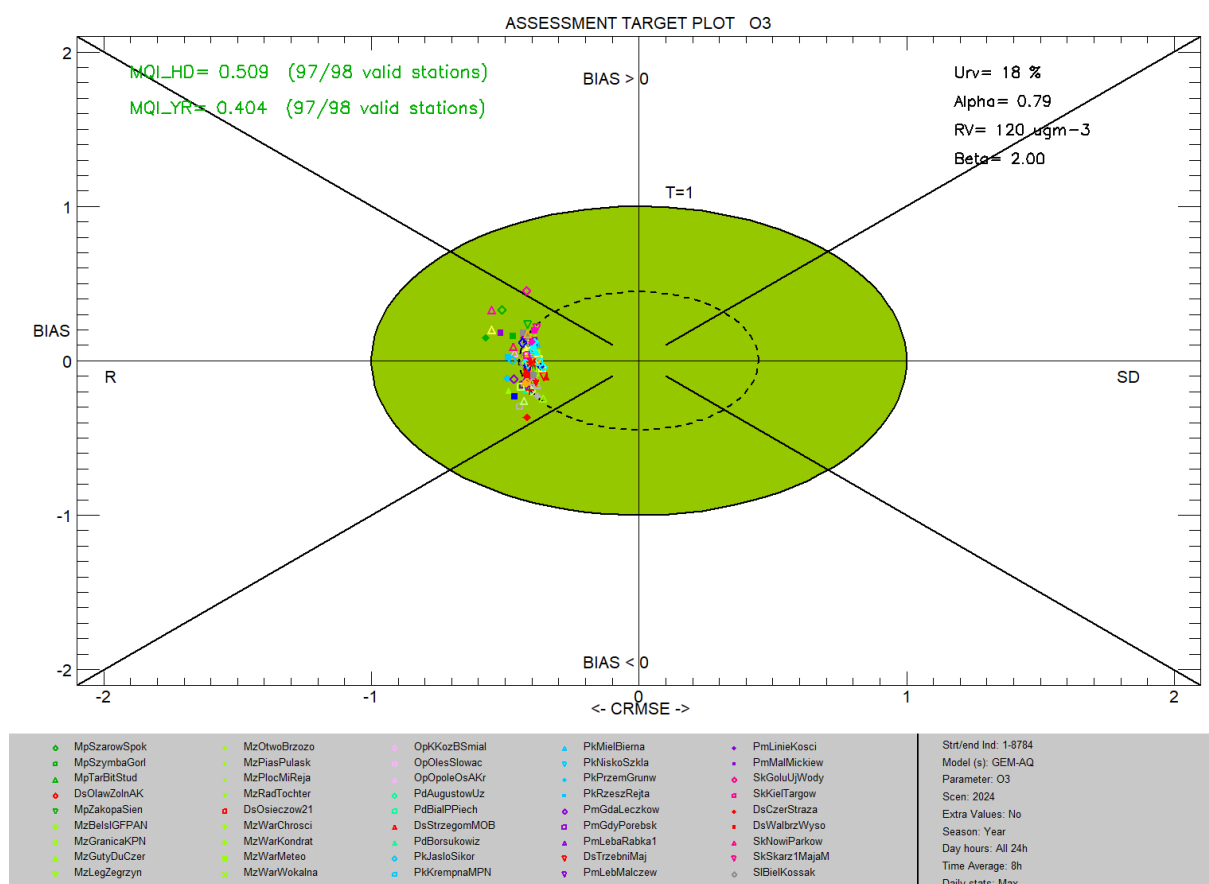
Rysunek 13. Wykres rozrzutu dla O₃, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Wykres słupkowy współczynnika korelacji (**Rysunek 14**) osiągniętego dla poszczególnych stacji w przypadku ozonu wskazuje na bardzo dobrą zgodność wyników modelowania względem obserwacji, najlepszą ze wszystkich modelowanych zanieczyszczeń. Dla większości stacji uzyskano korelację powyżej 0,8. Jedynie około 10% stacji uzyskało korelację w granicach od 0,6 a 0,8.



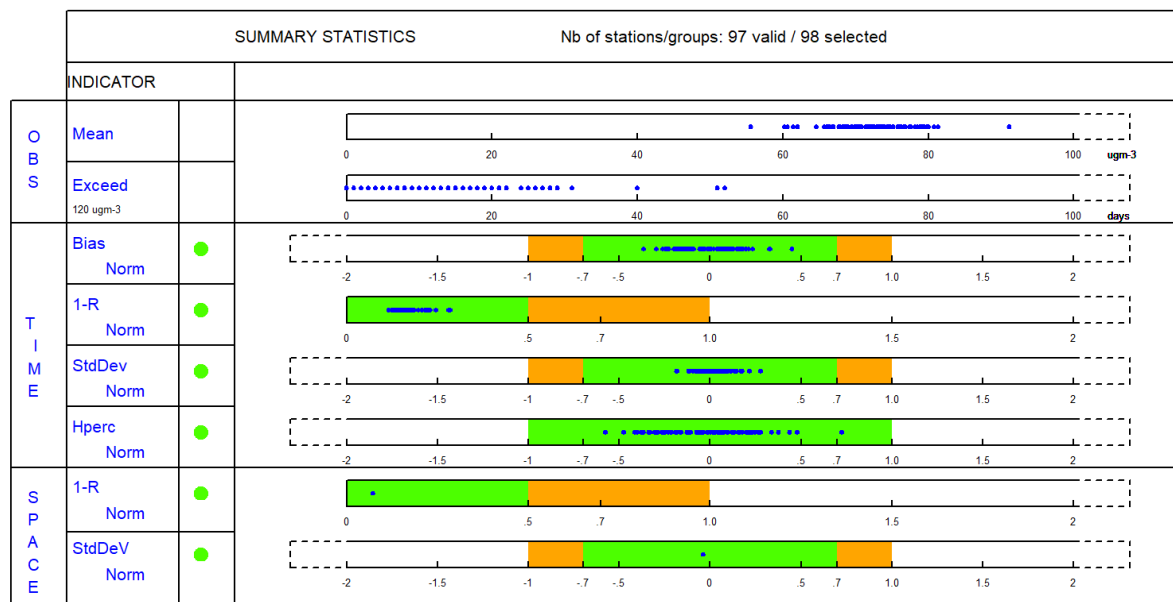
Rysunek 14. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla O₃, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Diagram celu (**Rysunek 15**) wskazuje na spełnienie kryterium jakości MQI dla ozonu zarówno w przypadku stężeń dobowych jak i rocznych dla 97 stacji z wystarczającą kompletnością danych. Niezwykle wysoka wartość wskaźników MQI (0,509, 0,404) jest odzwierciedleniem bardzo dobrej zgodności wyników modelowania względem pomiarów, przedstawionej już na wykresie rozproszenia i korelacji. Analiza wykresu wskazuje na niewielki trend niedoszacowujący.



Rysunek 15. Diagram celu dla O₃, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Raport podsumowujący (**Rysunek 16**) dla oceny jakości modelowania ozonu potwierdza spełnienie kryteriów błędu średniego, odchylenia standardowego oraz korelacji zarówno w ujęciu przestrzennym jak i czasowym dla minimum 90% stacji pomiarowych użytych w analizie.



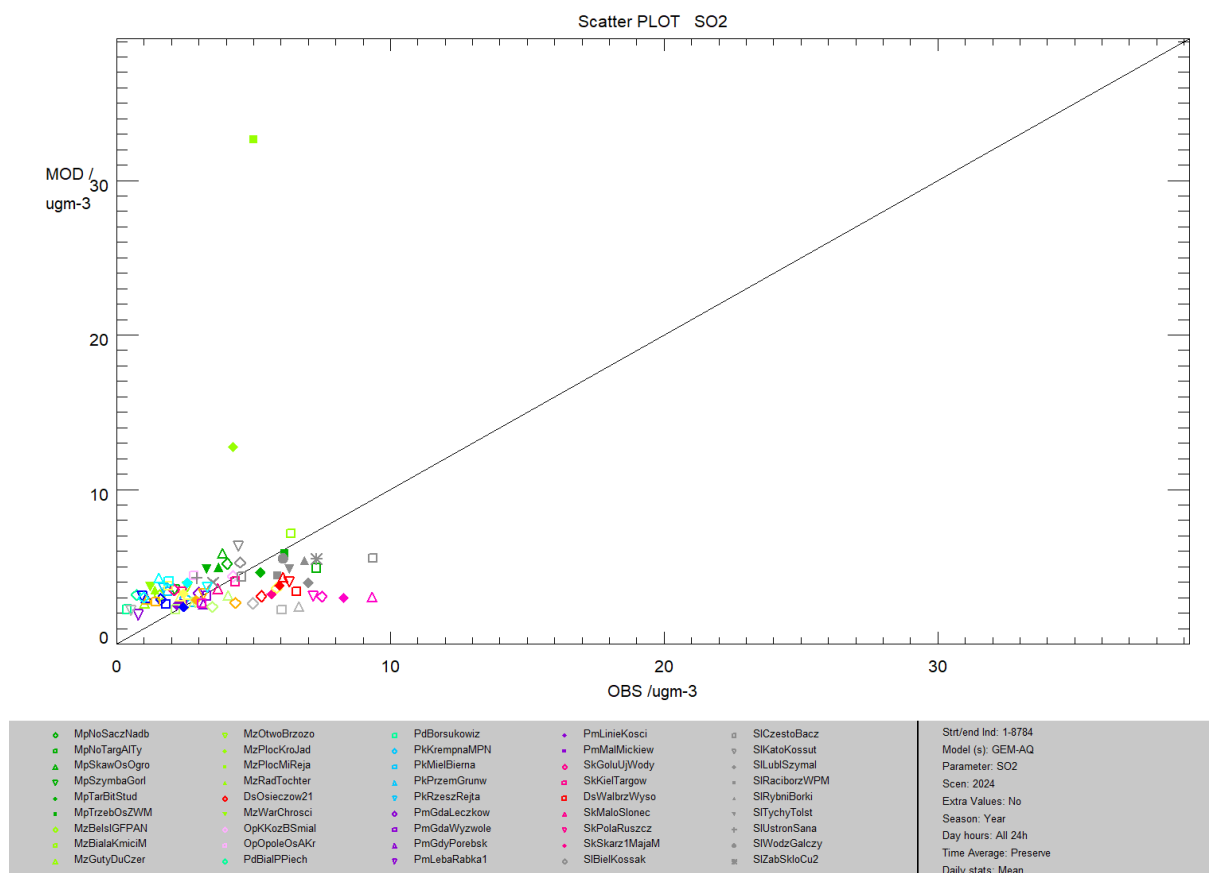
Rysunek 16. Raport podsumowujący analizę w DELTA tool dla O₃, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

6. Dwutlenek siarki (SO₂)

DELTA tool nie posiada możliwości stworzenia diagramu celu oraz pełnej analizy jakościowej na potrzeby ewaluacji modelowania dwutlenku siarki. Z tego powodu postanowiono przedstawić podstawową analizę statystyczną opartą o wykres rozrzutu oraz wykresy słupkowe korelacji i błędu średniego.

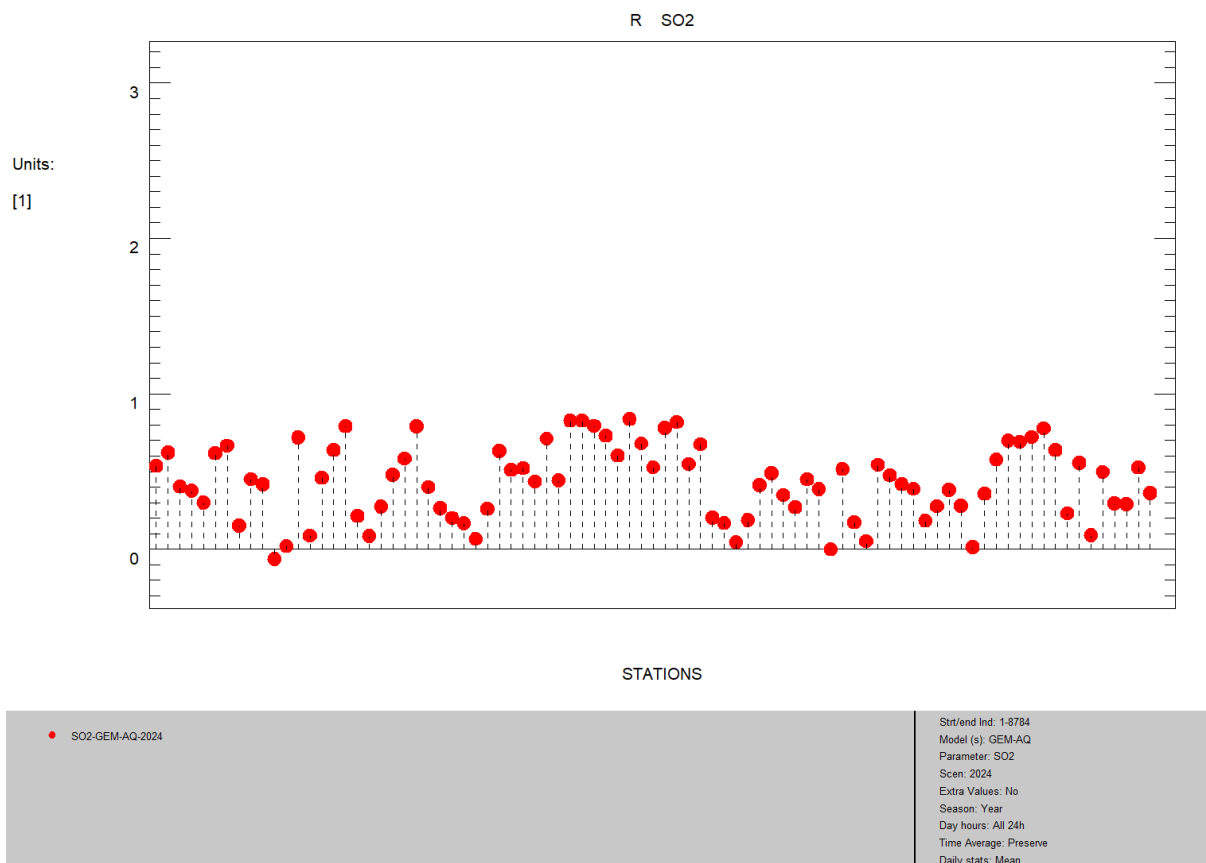
Wykres rozrzutu wskazuje na dobre odwzorowanie stężeń zmierzonych na większości stacji w Polsce.

Rysunek 17 przedstawia wykres rozrzutu między pomiarami a wynikami modelu dla dwutlenku siarki. Najlepsza zgodność występuje, gdy wyniki pomiarowe i modelowe układają się wzdłuż ukośnej linii prostej. Wykres rozrzutu wskazuje na dobre odwzorowanie stężeń zmierzonych na większości stacji w Polsce przez model GEM-AQ. Niewielka ilość stacji odstających występuje głównie w przedziale najwyższych stężeń. Natomiast najbardziej odstające stacje znajdują się w mieście Płock. Analizy wykazały, że bardzo wysokie przeszacowania dla dwóch stacji znajdujących się w obrębie tej aglomeracji, wynikają bezpośrednio inwentaryzacji emisji.



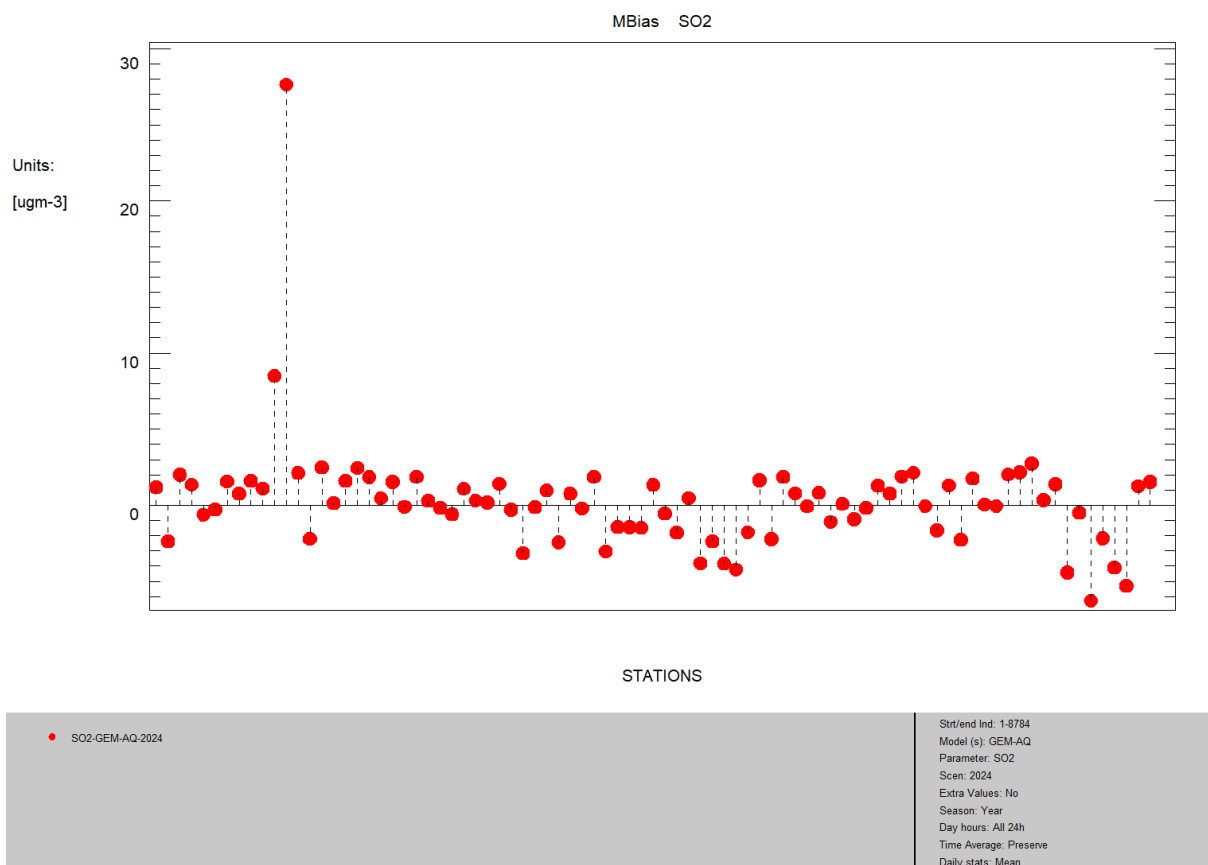
Rysunek 17. Wykres rozrzutu dla SO₂, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

Wykres słupkowy współczynnika korelacji (**Rysunek 18**) osiągniętego dla poszczególnych stacji w przypadku dwutlenku siarki wskazuje na dobrą zgodność wyników modelowania względem obserwacji. Dla większości stacji uzyskano korelację od 0,4 do 0,8. Dla części stacji uzyskano korelację poniżej 0,3 lub korelację ujemną, co może być spowodowane dobraniem nieodpowiedniego profilu czasowego uwalniania emisji.



Rysunek 18. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla SO_2 , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

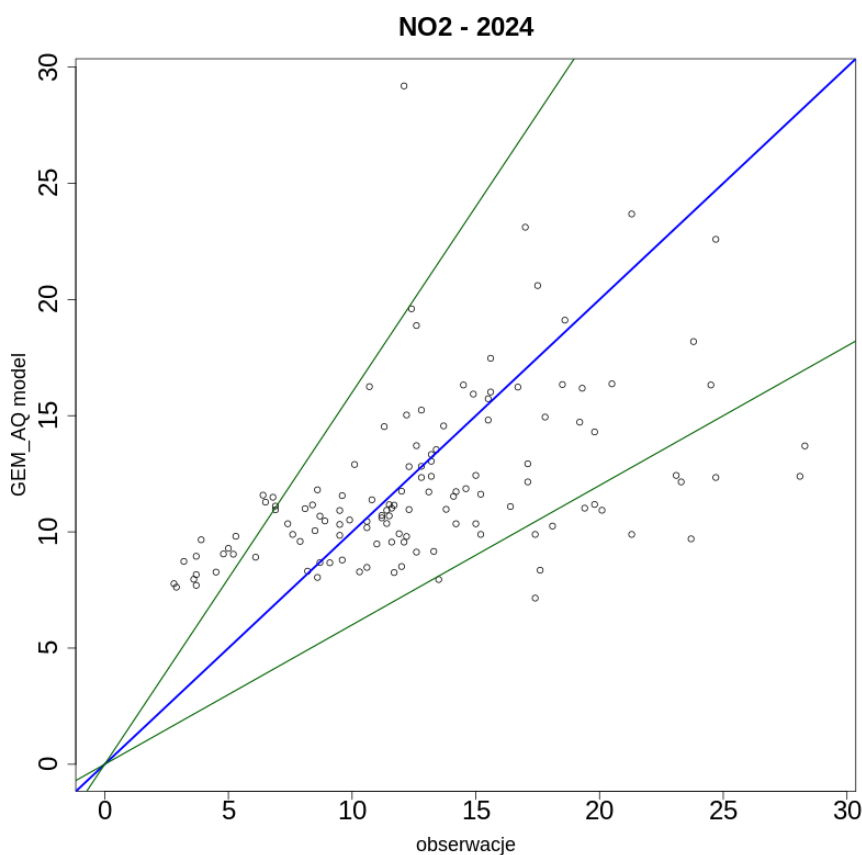
Wykres słupkowych średnich błędów modelu względem obserwacji dla dwutlenku siarki (**Rysunek 19**) wskazuje na niewielką przewagę trendu niedoszacowania, choć najwyższe błędy związane są z przeszacowaniem. Błędy średnie są niskie – zawierają się prawie w całości w przedziale od -3 do 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Zdecydowana większość jest jednak mniejsza (od -2 do 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Duży dodatni błąd średni wystąpił dla dwóch stacji położonych w województwie mazowieckim w mieście Płock.



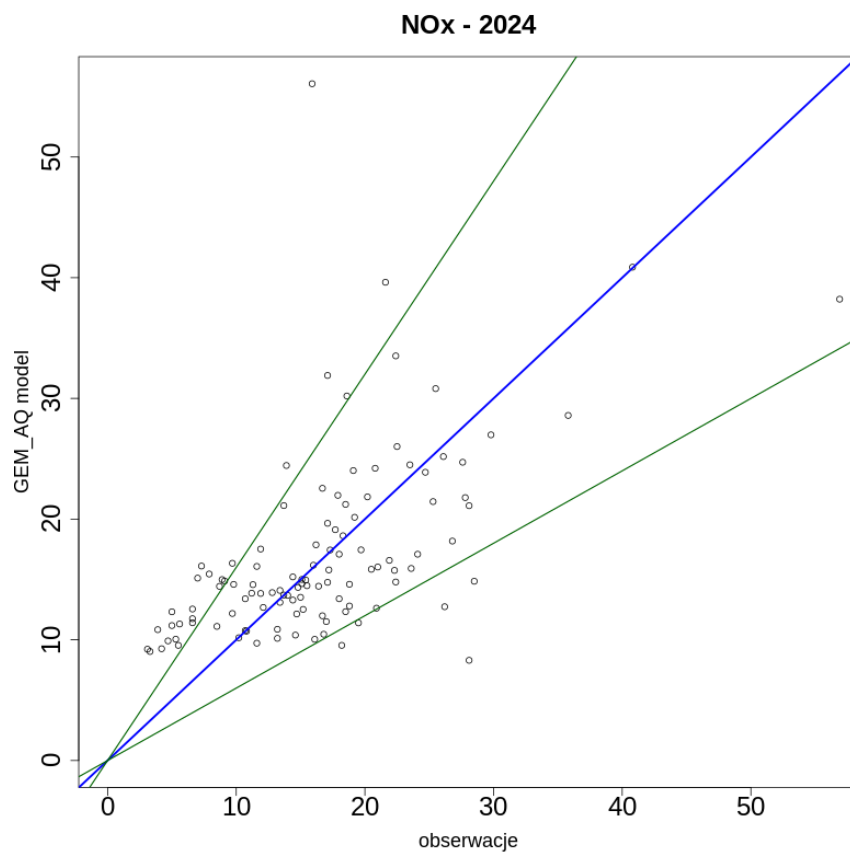
Rysunek 19. Wykres słupkowych średnich błędów dla SO_2 , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024

7. Zestawienie zgodności wyników modelowania z pomiarami dla poszczególnych stanowisk – na podstawie szacowania niepewności modelowania

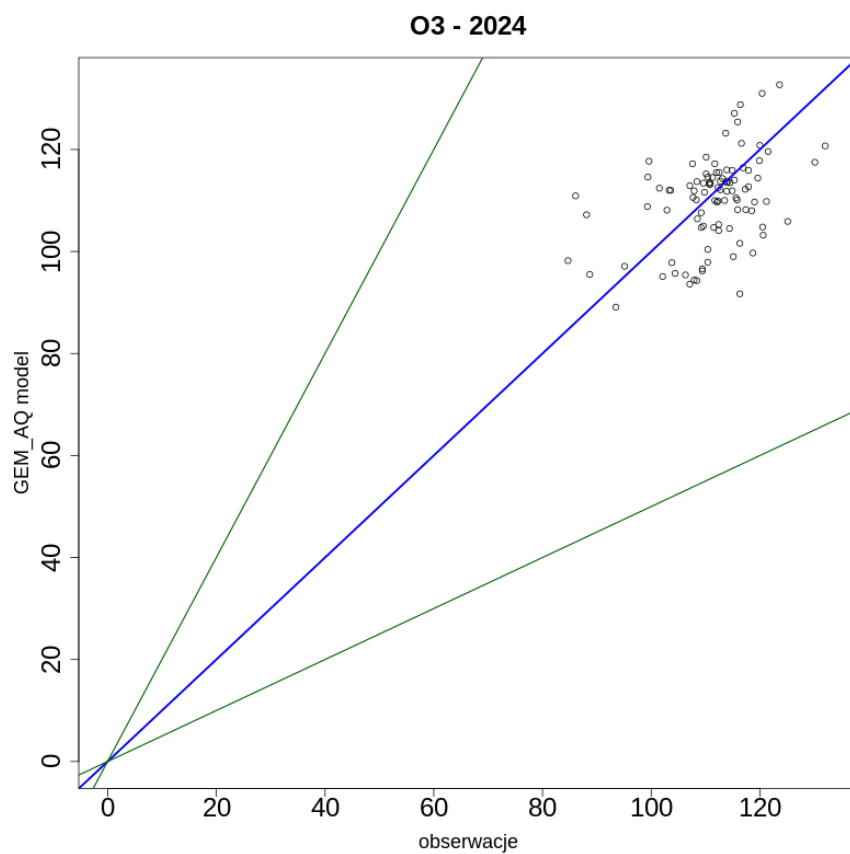
Rysunki 20 – 26 przedstawiają wykresy rozproszenia obrazujące średnią roczną wartość zanieczyszczenia obliczoną na podstawie obserwacji, względem wyniku modelowania otrzymanego dla lokalizacji danej stacji pomiarowej. Im bliżej punkt zbliżony do niebieskiej linii na wykresie, tym bliższy wynik modelowania względem pomiaru. Zielone linie to graficzna prezentacja kryterium niepewności modelowania opisanego przez Dyrektywę CAFE w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy (2008/50/WE). Jeżeli znaczniki znajdują się pomiędzy zielonymi liniami oznacza to dla danej stacji pomiarowej spełnienie kryterium przez zastosowane modelowanie. Niepewność modelowania uzyskana dla stacji poza tym obszarem jest zbyt duża i nie spełnia ww. kryterium.



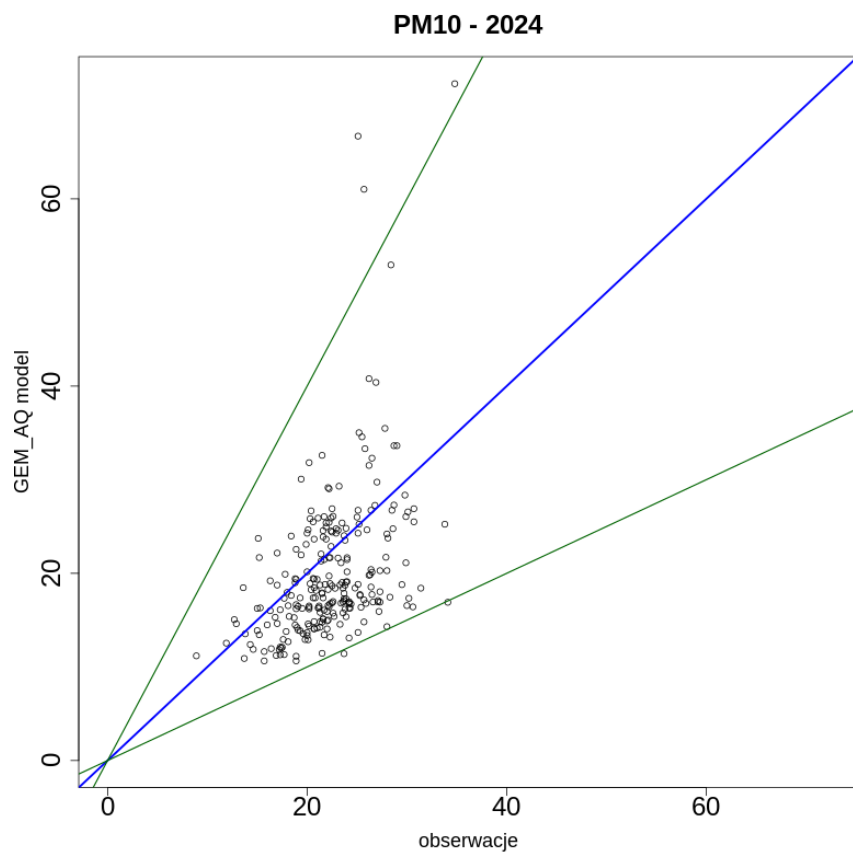
Rysunek 20. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń NO₂



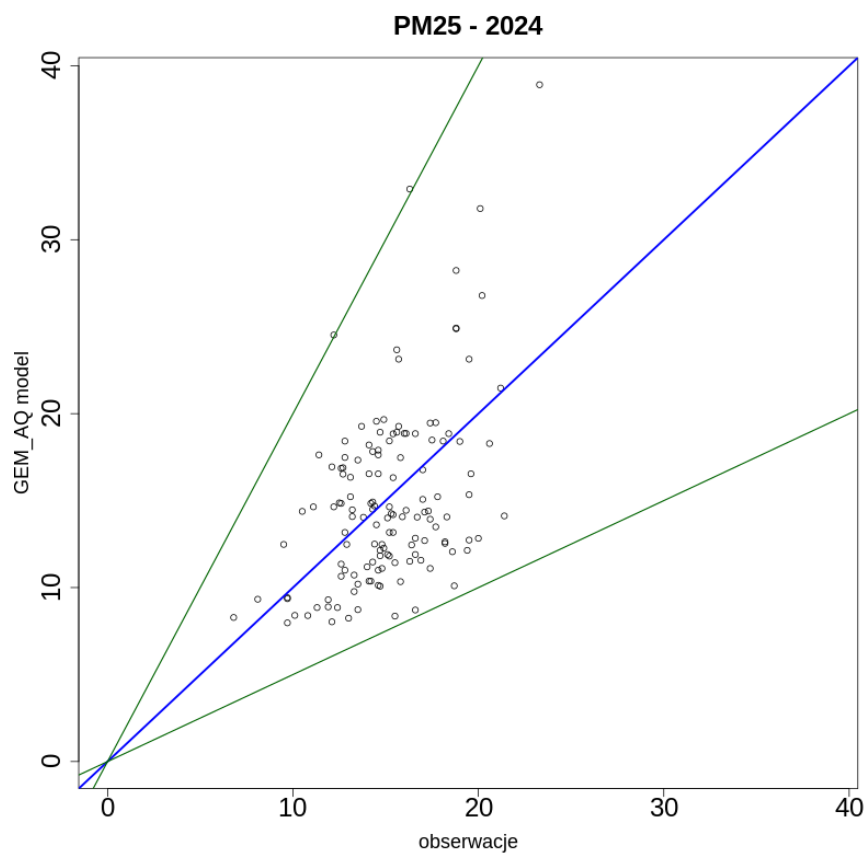
Rysunek 21. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń NO_x



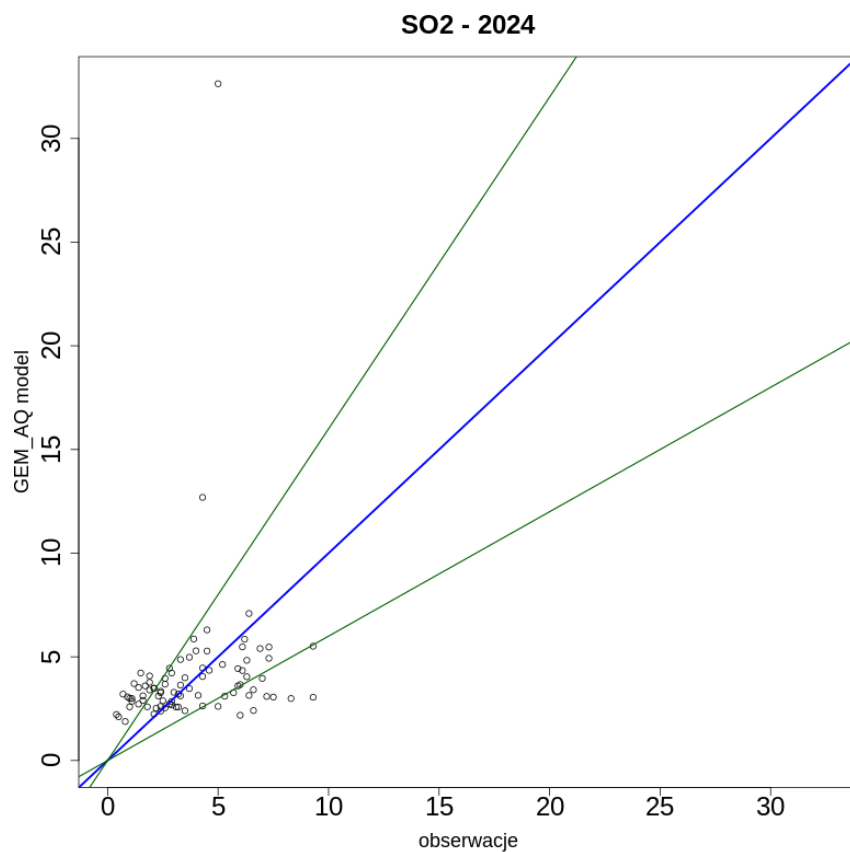
Rysunek 22. Wykres rozrzutu dla percentyla 93,2 z maksymalnych 8-godzinnych średnich kroczących stężeń O₃



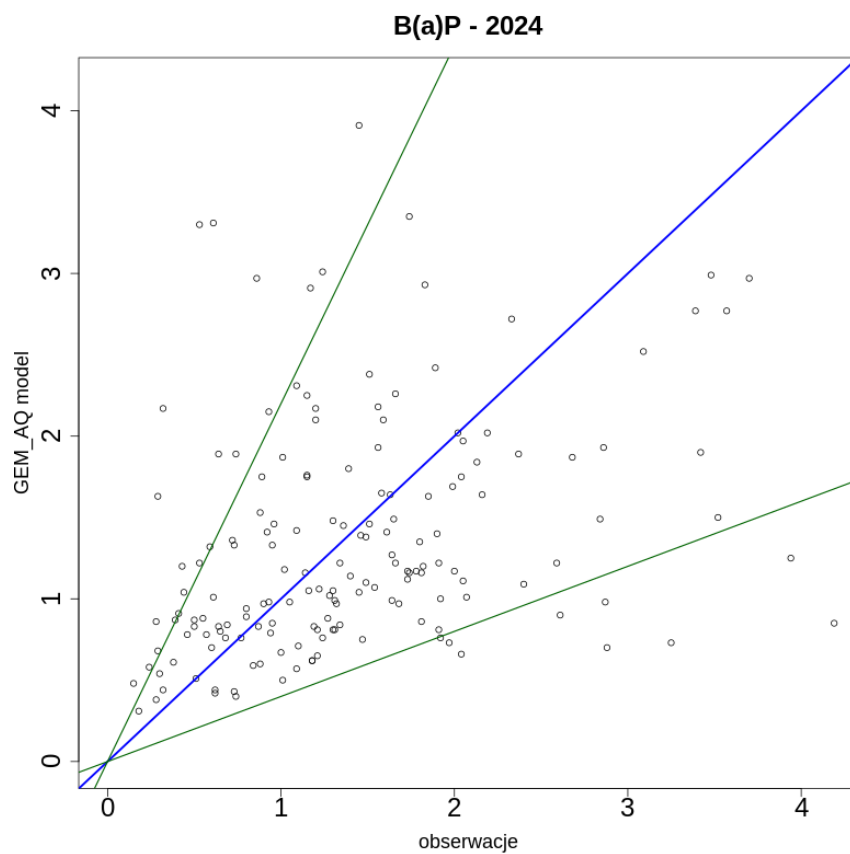
Rysunek 23. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń PM10



Rysunek 24. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń PM2,5



Rysunek 25. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń SO₂



Rysunek 26. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń B(a)P

Spis rysunków

Rysunek 1. Wykres rozrzutu dla pyłu PM10, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	5
Rysunek 2. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla pyłu PM10, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024.....	6
Rysunek 3. Diagram celu dla pyłu PM10, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	7
Rysunek 4. Raport podsumowujący analizę w DELTA tool dla pyłu PM10, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024.....	8
Rysunek 5. Wykres rozrzutu dla pyłu PM2,5, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	9
Rysunek 6. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla pyłu PM2,5, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024.....	10
Rysunek 7. Diagram celu dla pyłu PM2,5, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024 ..	11
Rysunek 8. Raport podsumowujący analizę w DELTA tool dla pyłu PM2,5, wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024.....	12
Rysunek 9. Wykres rozrzutu dla NO ₂ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024.....	13
Rysunek 10. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla NO ₂ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	14
Rysunek 11. Diagram celu dla NO ₂ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	15
Rysunek 12. Raport podsumowujący analizę w DELTA tool dla NO ₂ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024.....	16
Rysunek 13. Wykres rozrzutu dla O ₃ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	17
Rysunek 14. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla O ₃ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	18
Rysunek 15. Diagram celu dla O ₃ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024.....	19
Rysunek 16. Raport podsumowujący analizę w DELTA tool dla O ₃ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	20
Rysunek 17. Wykres rozrzutu dla SO ₂ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	21
Rysunek 18. Wykres słupkowy współczynnika korelacji dla SO ₂ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	22
Rysunek 19. Wykres słupkowych średnich błędów dla SO ₂ , wyniki modelu GEM-AQ względem pomiarów, rok 2024	23
Rysunek 20. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń NO ₂	24
Rysunek 21. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń NO _x	25
Rysunek 22. Wykres rozrzutu dla percentyla 93,2 z maksymalnych 8-godzinnych średnich kroczących stężeń O ₃	25
Rysunek 23. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń PM10.....	26
Rysunek 24. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń PM2,5.....	26
Rysunek 25. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń SO ₂	27
Rysunek 26. Wykres rozrzutu dla średnich rocznych stężeń B(a)P.....	27