



Analiza zmian jakości powietrza w Krakowie oraz województwie małopolskim w latach 2012-2020

przeprowadzona na zlecenie
Krakowskiego Alarmu Smogowego

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Piotr Kleczkowski

Profesor w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Specjalizuje się w ochronie środowiska, szczególnie powietrza, a także w inżynierii dźwięku. Wykładowca przedmiotu „Ochrona środowiska”, autor książki: „Smog w Polsce”, 2020 i współautor podręcznika „Ochrona środowiska z analizą jakości powietrza w Krakowie”, 2013. Był profesorem wizytującym w Cranfield University w Wielkiej Brytanii. Ekspert Komisji Europejskiej w zakresie oceny badań naukowych. Członek Rady ds. EkoMałopolski.

mgr inż. Katarzyna Kotarba

Absolwentka Inżynierii Biomedycznej na AGH w Krakowie, od 2018 r. doktorantka na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Pracownik Katedry Mechaniki i Wibroakustyki AGH oraz Carint Holding. Działalność naukowa i zawodowa skupia się na zastosowaniu zaawansowanych metod eksploracji i analizy danych, głównie medycznych. W trakcie studiów wykonywała analizy obrazów medycznych we współpracy z Uniwersytetem Opolskim i Opolskim Centrum Onkologii, brała udział w tworzeniu oprogramowania do zbierania i analizy danych dla Instytutu Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN w Warszawie.

Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
Zespół inżynierii dźwięku, percepcji dźwięku i ochrony środowiska

Kraków, 27.11.2020

1. Wprowadzenie

Celem analizy jest odpowiedź na pytanie, czy tzw. uchwała antysmogowa, wprowadzająca w Krakowie od 1.09.2019 r. całkowity zakaz spalania paliw stałych w małych instalacjach grzewczych, przyczyniła się do poprawy jakości powietrza w tym mieście. Uchwała była podejmowana dwukrotnie (z powodów prawnych) w 2013 i 2016 r. i towarzyszyły jej programy aktywnej pomocy mieszkańcom w modernizacji źródeł ciepła. Liczba kotłów i pieców na paliwa stałe w Krakowie stopniowo malała już od dłuższego czasu, także przed 2013 r.

Obecnie w mieście pozostało jeszcze, wg. szacunków Urzędu Miasta, ok. 1800 palenisk, a więc w okresie ostatnich 10 lat ich liczba zmniejszyła się około dwudziestokrotnie. Z pomiarów wynika jednoznacznie, że stan powietrza się poprawił, jednak ogrzewanie indywidualne paliwami stałymi nie jest jedynym źródłem zanieczyszczenia powietrza. Zachodzi więc potrzeba przeprowadzenia analizy, na ile poprawa stanu powietrza w Krakowie wynika ze spektakularnego ograniczenia stosowania paliw stałych w ogrzewaniu indywidualnym.

Najprostszą, a jednocześnie najbardziej wiarygodną metodą takiej weryfikacji jest porównanie tempa spadku stężenia substancji zanieczyszczających w Krakowie oraz w całym województwie małopolskim, z wyłączeniem Krakowa. Na obszarze województwa, w wyniku innej i mniej radykalnej uchwały z 2017 r., również powoli maleje liczba bezklasowych kotłów na paliwa stałe, które w większości wymieniane są na ogrzewanie gazowe. Jakość powietrza w województwie, przy jednoczesnych ograniczeniach dla źródeł przemysłowych, również się poprawia.

Niniejsza analiza odpowiada więc na pytanie, czy znacznie intensywniejsze usuwanie kotłów węglowych w Krakowie niż w województwie z wyłączeniem Krakowa spowodowało szybszą poprawę jakości powietrza w tym mieście. Dodatkowym efektem analizy jest też wyznaczenie tempa spadku stężeń poszczególnych zanieczyszczeń w miejscach lokalizacji wszystkich działających dłużej stacji pomiarowych w województwie, w kilku różnych zakresach czasowych.

2. Zakres i ogólna metoda analizy

1. Okres analizy mieścił się w latach 2012-2020. W 2013 r. nastąpił duży wzrost liczby usuwanych kotłów węglowych, wskutek rozpoczęcia publicznej debaty która doprowadziła do podjęcia uchwały „antysmogowej” Sejmiku Województwa Małopolskiego, oraz pomocy Urzędu Miasta dla mieszkańców. Dlatego też wartości zanieczyszczeń z 2012 r. (a także z sezonu grzewczego 2012/2013) powinny być uznane za wartości odniesienia, od których rozpoczyna się analiza spadków w kolejnych latach.
 2. Przedmiotem analizy były zmiany zanieczyszczeń powietrza oddziałujące zarówno długookresowo (A), jak i krótkookresowo (B):
 - A) zmiany wartości średnich stężeń sezonowych i całorocznych w rozpatrywanym przedziale czasu 2012 – 2020,
 - B) zmiany liczby dni z przekroczeniami dobowych (PM10) i godzinowymi (NO₂) dopuszczalnych wartości.
 3. W badaniu długookresowym analizowano cztery wskaźniki jakości powietrza: stężenia pyłów PM10 i PM_{2,5}, stężenia dwutlenku azotu oraz zawartości benzo(a)pirenu w pyłe PM10. Wskaźniki te są obecnie najistotniejsze ze względu na oddziaływanie tych substancji na zdrowie ludzi. Znaczenie piątego istotnego wskaźnika, stężenia dwutlenku siarki, w ostatnim dziesięcioleciu istotnie zmalało wskutek ograniczenia emisji tego gazu. W badaniu krótkookresowym analizowano wartości pyłu PM10 i NO₂, ponieważ tylko dla tych dwóch, spośród czterech wybranych substancji, określone są dopuszczalne wartości krótkookresowe.
 4. W analizie wykorzystano dane pomiarowe dostępne w bazie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska oraz – w przypadku braku dostępności w bazie GIOŚ – w bazie Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska. Z uwagi na wiarygodność użytej metody, tylko na nich opierają się prawnie akceptowane oceny jakości powietrza w kraju. Użyte w analizie dane były zweryfikowane przez GIOŚ do końca 2019 r. Dane za okres styczeń – lipiec 2020. dostępne były jedynie w postaci niezweryfikowanej (z bazy WIOŚ).
 5. W badaniu średnich długookresowych (A) ujęto wyłącznie dane ze stacji tła. Nie ujęto stacji komunikacyjnych i przemysłowych, ponieważ celem analizy był wyłącznie wpływ ogrzewania indywidualnego, nie zaś transportu i przemysłu. W jednym uzasadnionym przypadku ujęto stację komunikacyjną przy Al. Krasińskiego w Krakowie.
- W badaniu krótkookresowych (B) przekroczeń w zakresie pyłu PM10 ujęto wyłącznie dane ze stacji tła, a w zakresie dwutlenku azotu zarówno stacje tła jak i komunikacyjne, ponieważ głównym źródłem tego gazu jest transport spalinowy i tylko na stacjach komunikacyjnych występowały przekroczenia.

6. W analizie wykorzystano dane z tych stanowisk pomiarowych, w których zakres czasowy pomiaru i kompletność danych pozwalała na przeprowadzenie wiarygodnego wnioskowania. W przypadku, gdy w nielicznych miesiącach dane były niepełne, uzupełniano je za pomocą ekstrapolacji, na podstawie danych z innych możliwie nieodległych stacji. Część danych dobowych została również uzupełniona poprzez wyliczenie wartości średniej z dostępnych w bazie GIOŚ pomiarów godzinowych.
7. Dane, dalej określane jako „pełny rok 2020” pochodzą z okresu styczeń-lipiec 2020 i stanowią nieco lepszą prognozę dla całego roku, niż dane z okresu styczeń-czerwiec, co wynika z danych w poprzednich latach.
8. Analizę przeprowadzono osobno przy użyciu uśredniania w dwóch różnych zakresach czasowych:
- 1) tylko sezony grzewcze: październik – marzec, taki sposób eksponuje wpływ ogrzewania indywidualnego
 - 2) pełne lata kalendarzowe, taki sposób lepiej oddaje ilościowe znaczenie zmian dla zdrowia mieszkańców, ponieważ długookresowe oddziaływanie zanieczyszczeń powinno być rozpatrywane jako średnie w skali całego roku.
9. Analizę zmian średnich wartości zanieczyszczeń w czasie przeprowadzono następująco: w każdym kolejnym roku w obliczaniu średniej biorą udział dane ze wszystkich dostępnych stacji, czyli z rosnącej liczby stacji; zaletą tej wersji jest rosnąca z czasem reprezentatywność danych dla całych badanych obszarów (Kraków i województwo poza Krakowem).
10. W badaniu zmian długookresowych (A) dla każdego zanieczyszczenia, w każdym roku i w każdym sezonie grzewczym obliczano średnią. Na podstawie kolejnych wartości średnich rocznych i sezonowych przy pomocy regresji liniowej obliczano procentowy spadek stężenia substancji zanieczyszczającej w badanym okresie. Załączone wykresy ukazują linie regresji oraz wartości rocznych albo sezonowych średnich.
11. W badaniu zmian krótkookresowych (B), czyli liczb dni z przekroczeniami wartości dopuszczalnych, na każdej ze stacji pomiarowych z kompletnymi wynikami w każdym z kolejnych miesięcy wyznaczono liczbę przekroczeń, a następnie na tej podstawie wyznaczono liczby przekroczeń w każdym roku kalendarzowym i sezonie grzewczym. Następnie w każdym roku i sezonie obliczono wartość średnią liczby przekroczeń jako iloraz sumarycznej liczby przekroczeń we wszystkich stacjach i liczby stacji. Dla wszystkich stacji działających co najmniej od trzech lat załączono wykres słupkowy liczb przekroczeń w kolejnych latach i sezonach.

3. Wyniki badania A – średnie długookresowe

3.1. Wartości spadków

Wszystkie wartości spadków podane poniżej obliczono na podstawie odpowiednich regresji liniowych. Jakość dopasowania regresji, określona na podstawie współczynników determinacji (R^2 , objaśnienie w rozdz. 7), jest scharakteryzowana osobno dla poszczególnych tabel w przypisach w rozdz. 8.

3.1.1. Pył PM10

Tabela 3.1. Wyrażony w procentach spadek średniego stężenia pyłu PM10 w Krakowie oraz w województwie w sezonach grzewczych 2012/13 -2019/20, oraz w pełnych latach 2012-2020

| Metoda | Kraków | województwo |
|-------------------------|--------|-------------|
| Sezony grzewcze | 45,42 | 28,73 |
| Pełne lata kalendarzowe | 40,77 | 29,23 |

3.1.2. Pył PM2,5

Tabela 3.2. Wyrażony w procentach spadek średniego stężenia pyłu PM2,5 w Krakowie oraz w województwie w sezonach grzewczych 2012/13 -2019/20, oraz w pełnych latach 2012-2020

| Metoda | Kraków | województwo |
|-------------------------|--------------|-------------|
| Sezony grzewcze | 43,76 | 32,15 |
| Pełne lata kalendarzowe | 40,94 | 31,03 |

3.1.3. Benzo(a)piren w pyłe PM10

Spadek stężenia benzo(a)pirenu w sezonach 2012/13-2019/20 wyniósł **57,43%**, zaś spadek w latach 2012-2020 wyniósł **53,84 %**. Jednak porównanie z województwem okazało się niemożliwe, z uwagi na niemiernodajne wyniki w tym drugim przypadku¹ (zarówno w sezonach jak i w pełnych latach). Dlatego okres w tym badaniu ograniczono do lat 2014-2020. W wynikach dla Krakowa uwzględniono dwie wersje: bez stacji komunikacyjnej na Al. Krasińskiego (nr 3) oraz wraz z tą stacją. Wszystkie analizy nie obejmują stacji komunikacyjnych, jednak tu uczyniono wyjątek z uwagi na to, że dominującym źródłem benzo(a)pirenu w powietrzu w Polsce jest spalanie paliw w małych instalacjach grzewczych, a transport ma w emisji tego związku marginalny udział.

Tabela 3.3. Wyrażony w procentach spadek średniego stężenia benzo(a)pirenu w Krakowie oraz w województwie w sezonach grzewczych **2014/15 -2019/20**, oraz w pełnych latach **2014-2020**)

| Metoda | Kraków | województwo |
|-------------------------|--------------|----------------------|
| Sezony grzewcze | 42,82/41,5* | -14,41 wzrost |
| Pełne lata kalendarzowe | 54,37/53,47* | -5,53 wzrost |

*bez stacji Al. Krasińskiego/ze stacją Al. Krasińskiego

3.1.4. Dwutlenek azotu

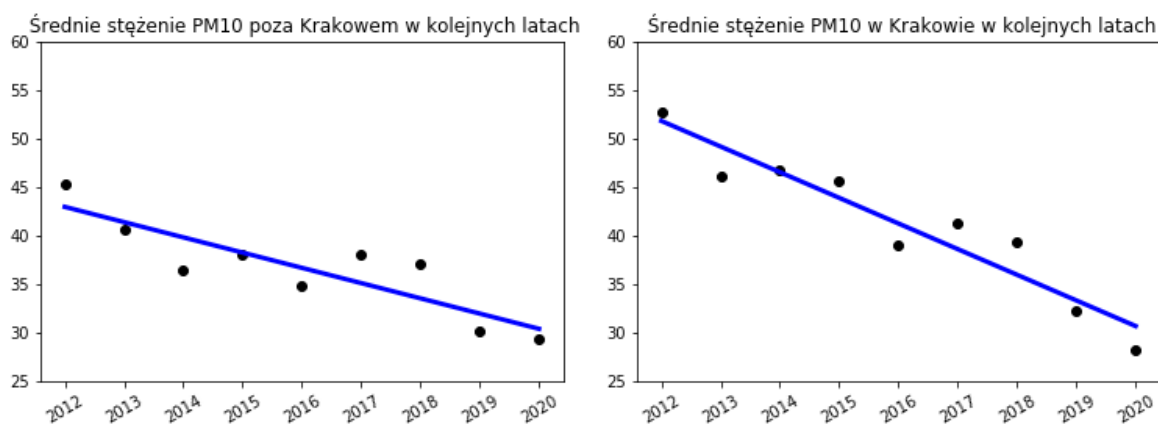
W Krakowie stężenie NO₂ mierzone było tylko na jednej stacji tła (ul. Bujaka). W wynikach na tej stacji występuje niewielki i mało miarodajny wzrost.

Tabela 3.4. Wyrażony w procentach spadek średniego stężenia dwutlenku azotu w Krakowie i w województwie w sezonach grzewczych **2012/13 -2019/20**, oraz w pełnych latach **2012-2020**

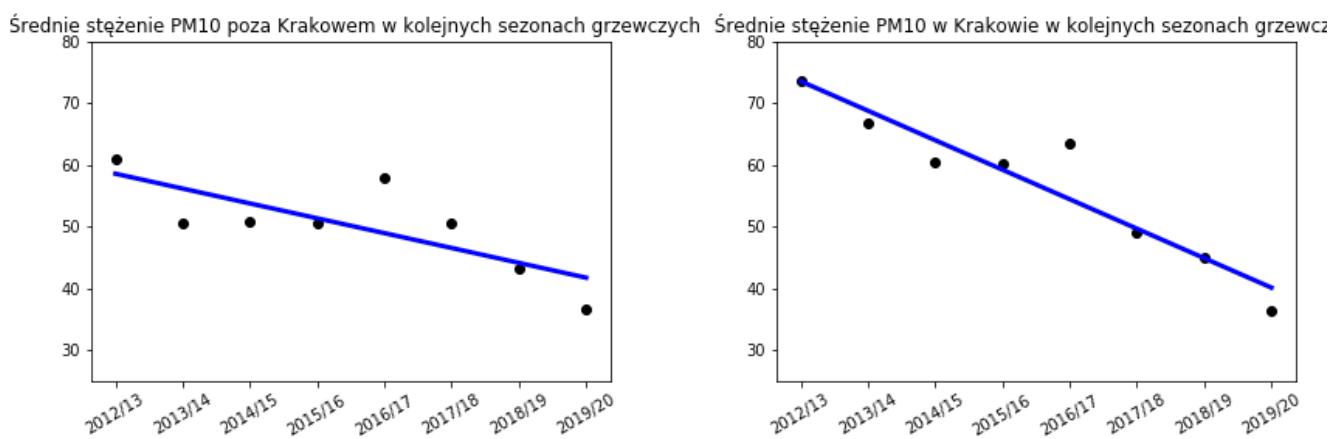
| Metoda | Kraków | województwo |
|-------------------------|---------------------|-------------|
| Sezony grzewcze | -9,09 wzrost | 17,86 |
| Pełne lata kalendarzowe | -3,92 wzrost | 25,23 |

3.2. Wybrane wykresy wartości średnich i regresji liniowych

3.2.1. Pył PM10

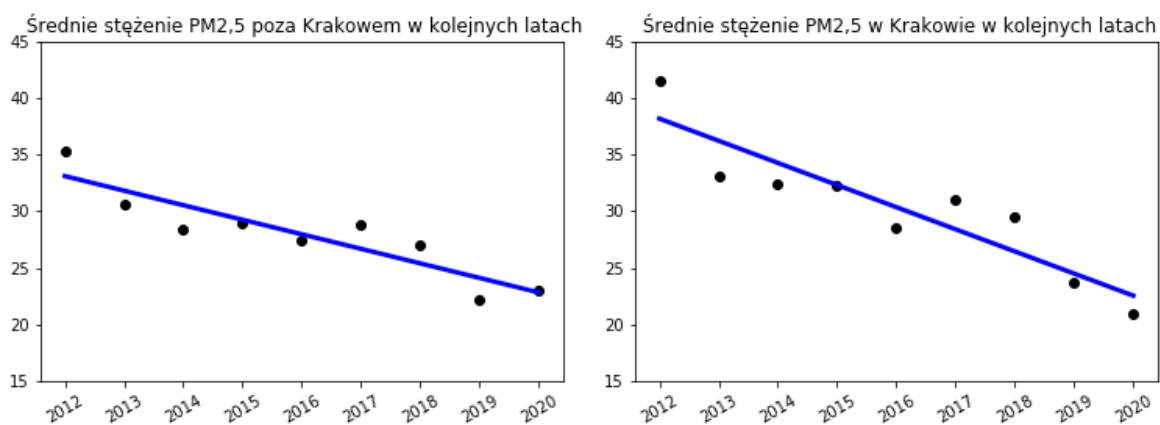


Rys. 3.1. Roczne wartości średnie i regresje liniowe spadku stężenia pyłu PM10 w latach 2012-2020. Dopasowanie linii dobre dla obu wykresów

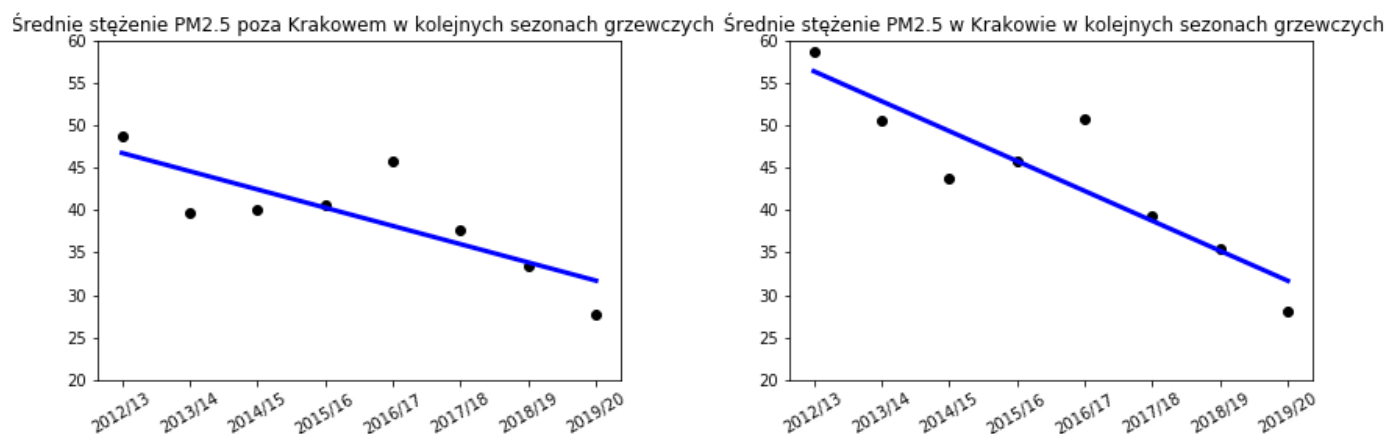


Rys. 3.2. Sezonowe wartości średnie i regresje liniowe spadku stężenia pyłu PM10 w sezonach 2012/13-2019/20. Dopasowanie linii dobre dla Krakowa, trochę gorsze dla województwa

3.2.2. Pył PM2,5

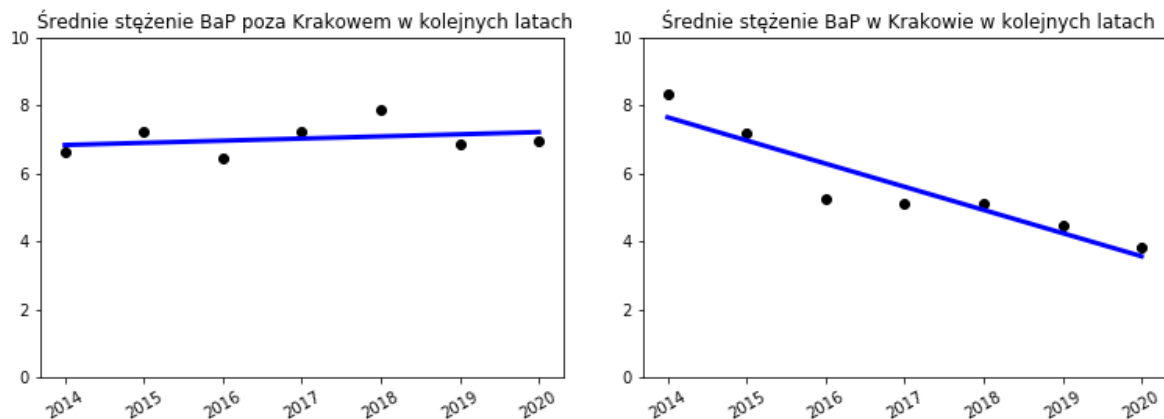


Rys. 3.3. Roczne wartości średnie i regresje liniowe spadku stężenia pyłu PM2,5 w latach 2012-2020. Dopasowanie linii dobre dla obu wykresów

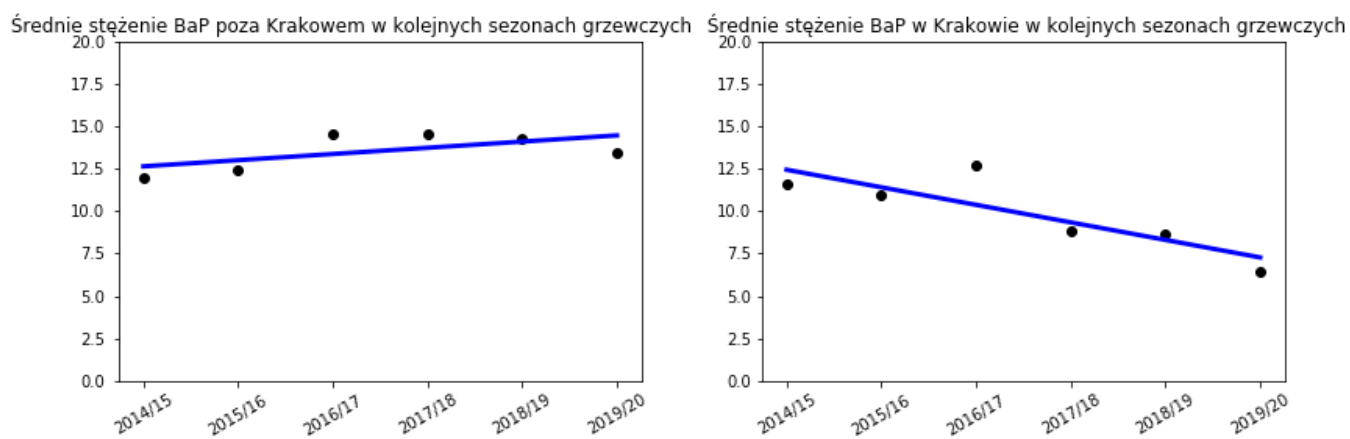


Rys. 3.4. Sezonowe wartości średnie i regresje liniowe spadku stężenia pyłu PM2,5 w sezonach 2012/13-2019/20. Dopasowanie linii dość dobre dla obu wykresów

3.2.3. Benzo(a)piren

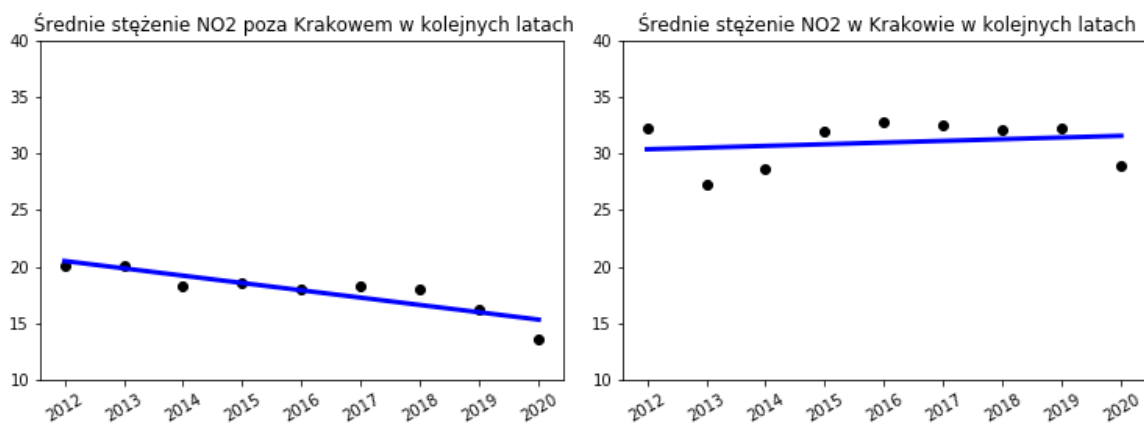


Rys. 3.5. Roczne wartości średnie i regresje liniowe spadku stężenia benzo(a)pirenu w latach 2014-2020. Dopasowanie linii bardzo dobre dla danych z Krakowa, dobre poza Krakowem²⁾

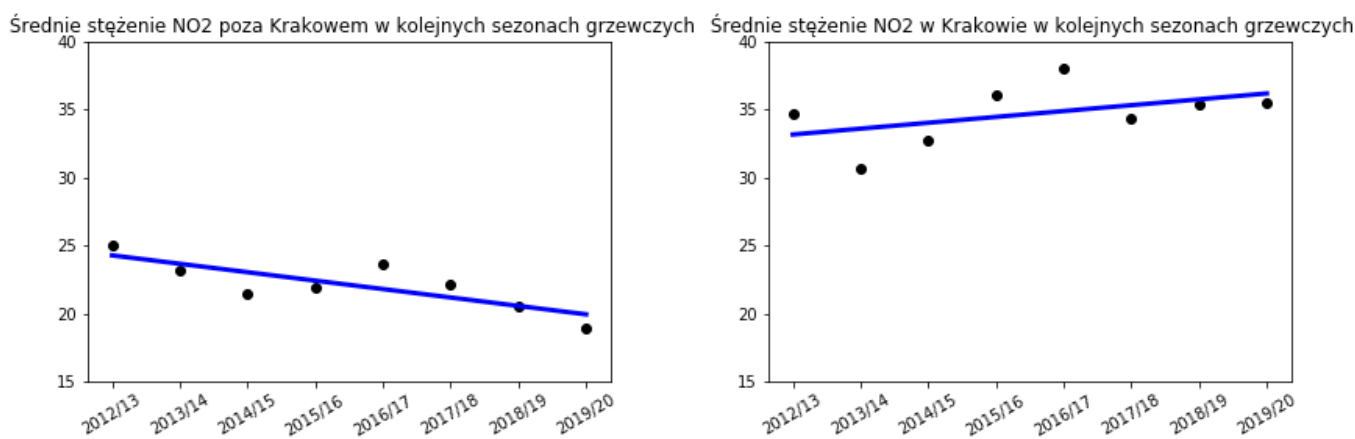


Rys. 3.6. Sezonowe wartości średnie i regresje liniowe spadku stężenia benzo(a)pirenu w sezonach 2014/15-2019/20. Dopasowanie linii bardzo dobre w przypadku Krakowa, dobre poza Krakowem²⁾

3.2.4. Dwutlenek azotu



Rys. 3.7. Roczne wartości średnie i regresje liniowe spadku stężenia dwutlenku azotu w latach 2012-2020. Dopasowanie linii dość dobre poza Krakowem, złe w Krakowie



Rys. 3.8. Sezonowe wartości średnie i regresje liniowe spadku stężenia dwutlenku azotu w sezonach 2012/13-2019/20. Dopasowanie linii niezbyt dobre dla obu wykresów

4. Związek pomiędzy średnimi wartościami zanieczyszczeń w Krakowie i w gminach podkrakowskich (tzw. „wianuszek”)

W sezonach grzewczych od 2012/13 do 2019/20 zmienność w czasie uśrednionych wyników zawartości pyłu PM10 we wszystkich krakowskich stacjach tła oraz we wszystkich stacjach w gminach wokół Krakowa (Kaszów, Niepołomice, Skawina, Zabierzów) wykazuje bardzo silną dodatnią zależność, istotną statystycznie (współczynnik korelacji między 0,93 i 0,95). Wskazuje to, że warunki atmosferyczne w Krakowie i jego okolicy są zbliżone. W latach 2019-2020, w których benzo(a)piren był mierzony w dwóch stacjach wokół Krakowa (Niepołomice i Zabierzów) jego stężenie było średnio o 55% wyższe niż średnia ze stacji krakowskich. Wzmacnia to twierdzenie, że w zanieczyszczeniach powietrza mierzonych w gminie Kraków istotny udział mają gminy sąsiadujące z miastem.

5. Wyniki badania K – przekroczenia krótkookresowe

5.1. Pył PM10 - wyniki

Sposób obliczania średniej liczby przekroczeń podano w rozdz. 2 p. 11. W badaniu K nie przeprowadzono analizy regresji liniowej, ponieważ nie można tu oczekiwać liniowej zależności spadku liczby przekroczeń wraz z upływem czasu. Nawet gdyby spadek zanieczyszczeń był liniowy, to towarzyszyłby mu coraz szybszy spadek liczby przekroczeń.

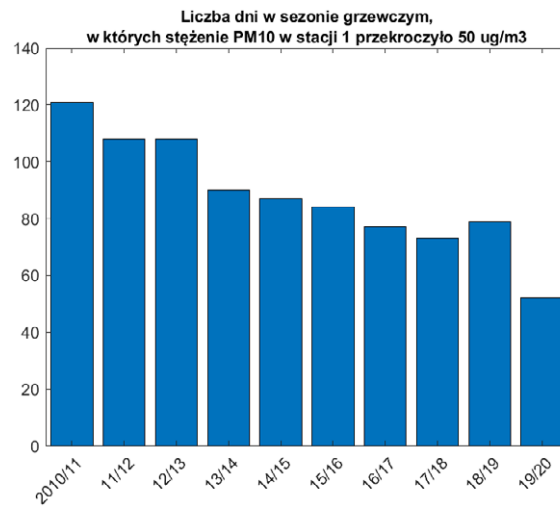
Tabela 5.1. Średnie liczby dni z przekroczeniami dobowej wartości dopuszczalnej 50 µg/m³ obliczone ze wszystkich stacji z kompletnymi pomiarami w Krakowie i województwie, w kolejnych latach i sezonach

| Rok i sezon | Pełne lata | | Sezony | |
|-------------|------------|-------------|--------|-------------|
| | Kraków | województwo | Kraków | województwo |
| 2012, 12/13 | 145 | 108 | 125 | 105 |
| 2013, 13/14 | 134 | 118 | 118 | 91 |
| 2014, 14/15 | 140 | 104 | 117 | 100 |
| 2015, 15/16 | 134 | 104 | 106 | 94 |
| 2016, 16/17 | 112 | 85 | 102 | 90 |
| 2017, 17/18 | 95 | 92 | 93 | 87 |
| 2018, 18/19 | 116 | 96 | 88 | 75 |
| 2019, 19/20 | 86 | 72 | 64 | 59 |

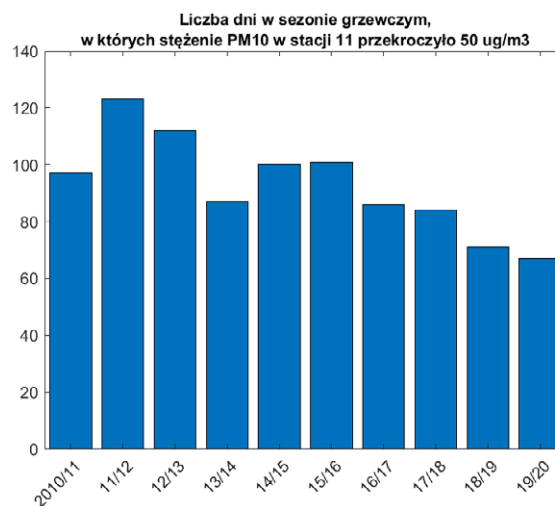
We wszystkich analizowanych pełnych latach kalendarzowych wystąpiły znaczne przekroczenia dopuszczalnej liczby dni z przekroczeniem, która wynosi 35.

5.2. Pył PM10 - wybrane wykresy liczby dni z przekroczeniami dobowej wartości dopuszczalnej 50 µg/m³ w kolejnych sezonach grzewczych

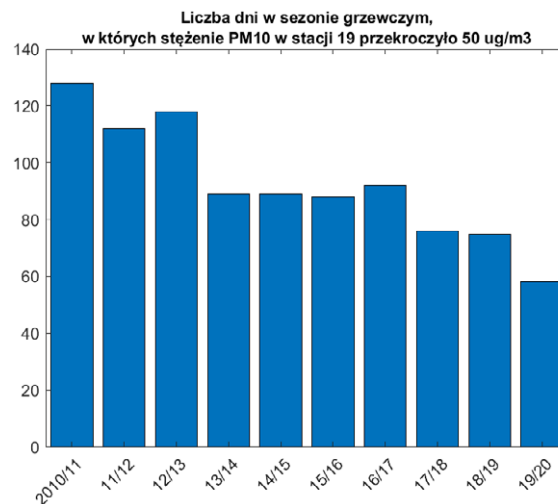
Numery stacji podanych w opisach wykresów objaśnione są w Dodatku.



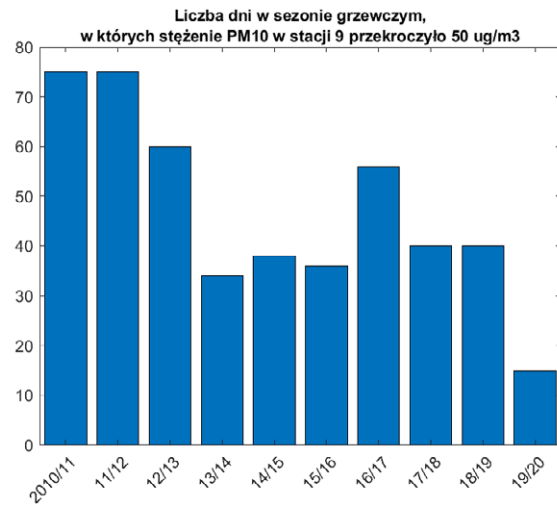
Rys. 5.1. Liczby dni z przekroczeniami na stacji w Krakowie, ul. Bujaka



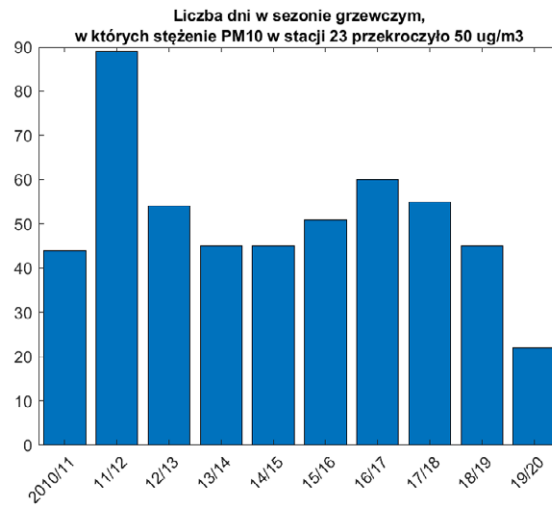
Rys. 5.2. Liczby dni z przekroczeniami na stacji w Nowym Sączu



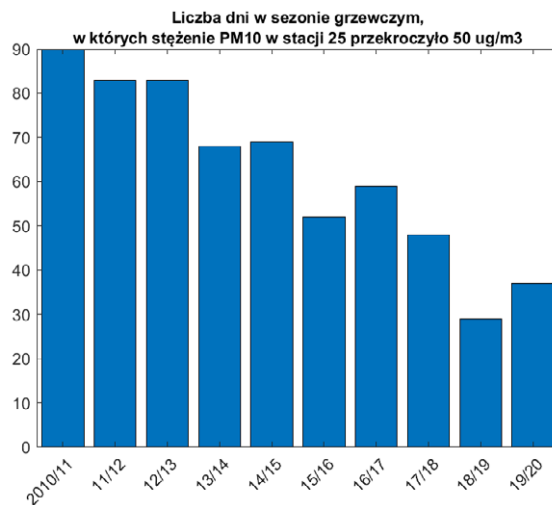
Rys. 5.3. Liczby dni z przekroczeniami na stacji w Skawinie



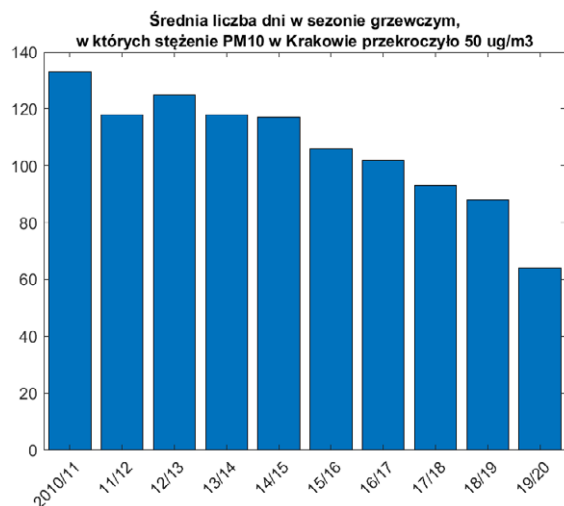
Rys. 5.4. Liczby dni z przekroczeniami na stacji w Tarnowie



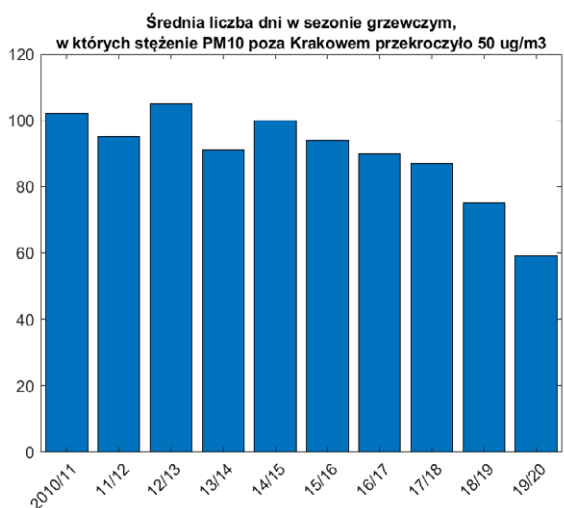
Rys. 5.5. Liczby dni z przekroczeniami na stacji w Trzebini



Rys. 5.6. Liczby dni z przekroczeniami na stacji w Zakopanem



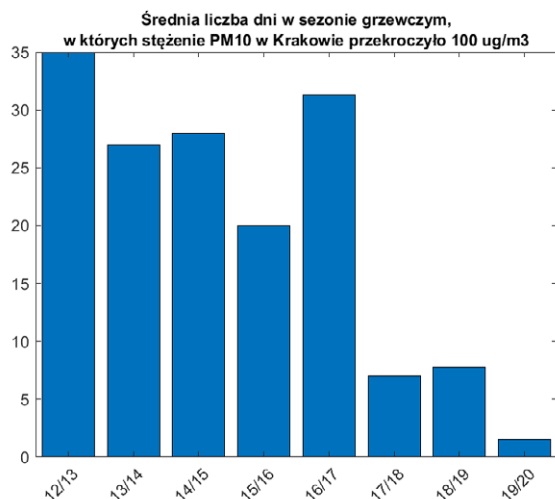
Rys. 5.7. Średnie liczby dni przekroczeń w Krakowie



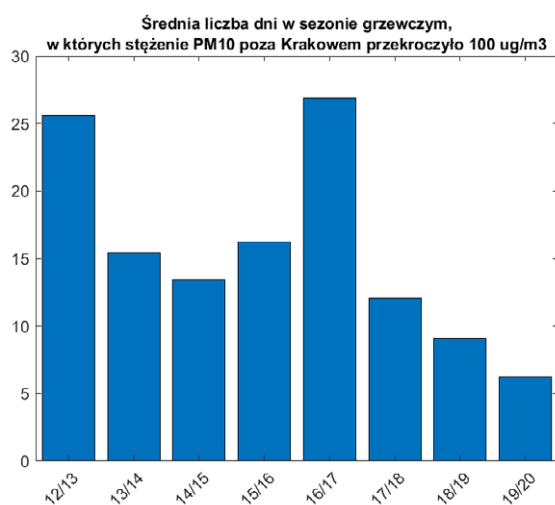
Rys. 5.8. Średnie liczby dni przekroczeń w województwie z wyłączeniem Krakowa

Tabela 5.1.A Średnie liczby dni z przekroczeniami dobowego stężenia PM10 wynoszącym 100 µg/m³ (poziom informowania) obliczone ze wszystkich stacji z kompletnymi pomiarami w Krakowie i województwie, w kolejnych latach i sezonach

| Rok i sezon | Pełne lata | | Sezony | |
|-------------|------------|-------------|--------|-------------|
| | Kraków | województwo | Kraków | województwo |
| 2012, 12/13 | 41 | 29 | 35 | 26 |
| 2013, 13/14 | 25 | 21 | 27 | 15 |
| 2014, 14/15 | 28 | 14 | 28 | 13 |
| 2015, 15/16 | 29 | 14 | 20 | 16 |
| 2016, 16/17 | 15 | 14 | 31 | 27 |
| 2017, 17/18 | 20 | 22 | 7 | 12 |
| 2018, 18/19 | 9 | 13 | 8 | 9 |
| 2019, 19/20 | 6 | 8 | 2 | 6 |



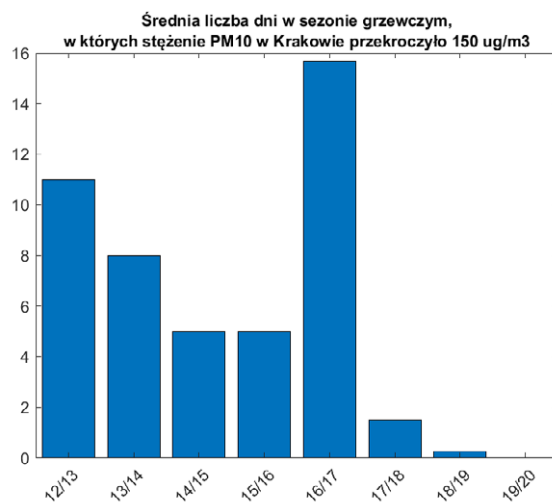
Rys. 5.9. Średnie liczby dni przekroczeń w Krakowie (100 µg/m³)



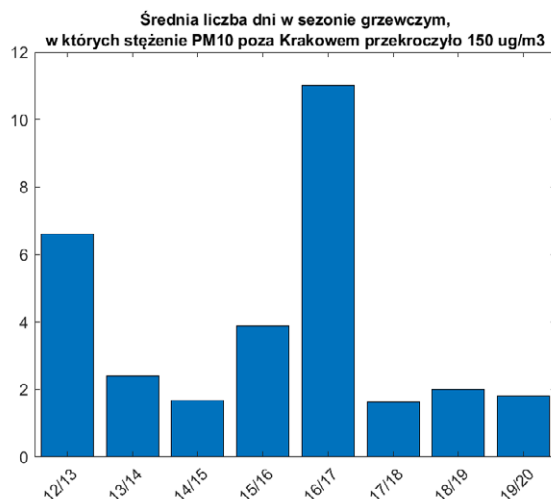
Rys. 5.10. Średnie liczby dni przekroczeń w województwie z wyłączeniem Krakowa (100 µg/m³)

Tabela 5.1.B Średnie liczby dni z przekroczeniami dobowego stężenia PM10 wynoszącym 150 µg/m³ (poziom alarmowy) obliczone ze wszystkich stacji z kompletnymi pomiarami w Krakowie i województwie, w kolejnych latach i sezonach

| Rok i sezon | Pełne lata | | Sezony | |
|-------------|------------|-------------|--------|-------------|
| | Kraków | województwo | Kraków | województwo |
| 2012, 12/13 | 17 | 12 | 11 | 7 |
| 2013, 13/14 | 7 | 5 | 8 | 2 |
| 2014, 14/15 | 8 | 1 | 5 | 2 |
| 2015, 15/16 | 5 | 2 | 5 | 4 |
| 2016, 16/17 | 2 | 4 | 16 | 11 |
| 2017, 17/18 | 12 | 9 | 2 | 2 |
| 2018, 18/19 | 2 | 2 | 0 | 2 |
| 2019, 19/20 | 0 | 2 | 0 | 2 |



Rys. 5.11. Średnie liczby dni przekroczeń w Krakowie ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)



Rys. 5.10. Średnie liczby dni przekroczeń w województwie z wyłączeniem Krakowa ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

5.3. Dwutlenek azotu

W całym analizowanym okresie przekroczenia 1-godzinnej wartości dopuszczalnej dwutlenku azotu wystąpiły wyłącznie na stacjach komunikacyjnych. W Krakowie łącznie 10 razy: na stacji Al. Krasińskiego 5 razy w 2011 r., 3 razy w 2012 r., 1 raz w 2015 r., 1 raz na stacji ul. Dietla w 2017 r. W województwie wystąpiły dwukrotnie na stacji komunikacyjnej w Tarnowie.

6. Podsumowanie i wnioski

Tempo spadku stężenia zanieczyszczeń, tak na terenie gminy miejskiej Kraków, jak i pozostałego obszaru województwa, wyznaczone na podstawie odczytów ze stacji Państwowego Monitoringu Środowiska obciążone jest niepewnością. Wynika ona z dużej zmienności odczytów na poszczególnych stacjach. Zmienność ta występuje również pomiędzy kolejnymi latami i mają na nią istotny wpływ różnice warunków atmosferycznych. Zmiany wyników w skali kolejnych kilku lat nie układają się w wyraźny trend liniowy. Należy dodać, że mimo to analiza trendu zmian oparta na wynikach ze stacji PMS jest najdokładniejszą z możliwych.

We wszystkich powyższych analizach odnoszących się do pyłów i benzo(a)pirenu, spadek stężenia poszczególnych substancji w Krakowie okazuje się szybszy niż średni w województwie z wyłączeniem Krakowa.

W przypadku benzo(a)pirenu znaczącemu spadkowi w Krakowie towarzyszy niepokojący wzrost w województwie. W przypadku pełnych lat wystąpił spadek w Krakowie o 54,37% i wzrost w województwie o 5,53%. W ostatnich dwóch latach zarówno w Krakowie, jak i w województwie odnotowano spadek stężenia BaP. Stężenie benzo(a)pirenu (ogólnie: wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych) jest dużo lepszym wskaźnikiem skutków likwidacji wysokoemisyjnych palenisk niż pył, ponieważ związki te w skali kraju pochodzą w 91% z ogrzewania indywidualnego (dane z 2018 r.), podczas gdy emisja pyłu PM_{2,5} pochodzi z tego sektora w 52%.

Tempo redukcji stężenia dwutlenku azotu na stacjach tła jest wyraźnie wolniejsze w Krakowie, niż w województwie. Jednak w Krakowie jest tylko jedna stacja tła mierząca ten parametr, co nie pozwala na formułowanie wniosków. Ponadto, emisja tlenków azotu z transportu jest ok. trzykrotnie większa niż z ogrzewania indywidualnego, dlatego też nie można było oczekiwać spektakularnego spadku stężenia NO₂ wskutek likwidacji kotłowni na paliwa stałe w Krakowie.

Biorąc pod uwagę zarówno wiarygodność wyników - duża liczba stacji oraz wartości współczynników determinacji (patrz rozdz. 7), jak i reprezentatywność danych (sezony) można wskazać poniższe wyniki z tabeli 3.1 jako najbardziej wiarygodnie odpowiadające na pytanie, które było przedmiotem analizy.

**W okresie pomiędzy sezonami grzewczymi od 2012/13 do 2019/20 stężenie pyłu PM₁₀ w Krakowie obniżyło się o 45,42%.
W tym samym okresie stężenie pyłu PM₁₀ w województwie obniżyło się o 28,73%.**

Spadki stężenia pyłu PM_{2,5} przedstawione w tabeli 3.2 charakteryzują się zbliżonymi współczynnikami determinacji. Jednak ten parametr mierzony jest w mniejszej liczbie stacji, w szczególności w Krakowie tylko w jednej stacji tła (ul. Bujaka, os. Piastów od 2020 r.). Jednak stwierdzono, że zachodzi wysoka korelacja (silny związek) pomiędzy rocznymi i sezonowymi wynikami w stacji na ul. Bujaka oraz stacją komunikacyjną na Al. Krasieńskiego i stacją przemysłową na ul. Bulwarowej. Na tej podstawie można uznać wyniki pomiarów pyłu PM_{2,5} w stacji na ul. Bujaka za reprezentatywne dla średniej wartości w mieście. W dodatku, stężenie pyłu PM_{2,5} ma większe znaczenie ze względu na ochronę zdrowia niż stężenie pyłu PM₁₀. Stąd wyniki w tabeli 3.2 są również ważnym wskaźnikiem tempa spadku zanieczyszczeń.

**W okresie pomiędzy sezonami grzewczymi od 2012/13 do 2019/20 stężenie pyłu PM_{2,5} w Krakowie obniżyło się o 43,76%.
W tym samym okresie stężenie pyłu PM_{2,5} w województwie obniżyło się o 32,15%.**

Spalanie w domowych paleniskach jest dominującym źródłem benzo(a)pirenu. Stężenie tego związku najlepiej więc weryfikuje redukcję emisji z tej grupy źródeł. Jednak w okresie 2012-2020 wyniki dla tego parametru charakteryzowały się przeważnie słabym współczynnikiem determinacji, dlatego analizę ograniczono do okresu 2014-2020.

**W okresie pomiędzy sezonami grzewczymi od 2012/13 do 2019/20 stężenie benzo(a)pirenu w Krakowie obniżyło się o 57,43%.
W okresie pomiędzy sezonami grzewczymi od 2014/15 do 2019/20 obniżyło się ono w Krakowie o 42,82%, a w tym samym okresie w województwie wzrosło o 14,41%.
Na podstawie prognozy dla roku 2020 można stwierdzić, że pomiędzy pełnymi latami kalendarzowymi 2014 i 2020 stężenie benzo(a)pirenu w Krakowie obniżyło się o 54,37%, a w województwie wzrosło o 5,53%.**

Wyżej przedstawione różnice w spadku stężeń zanieczyszczeń pomiędzy Krakowem i województwem stanowią mocny dowód na skuteczność przeprowadzonej w Krakowie eliminacji spalania paliw stałych w paleniskach domowych. Przy ocenianiu powyższych wyników należy wziąć pod uwagę, że na stan powietrza w Krakowie duży wpływ ma napływ zanieczyszczeń z zewnątrz, w tym z okolic najbliższych, czyli gmin wokół Krakowa. W 2018 r. łączny

udział całego napływu z zewnątrz wraz z tłem naturalnym oceniano w Krakowie na podstawie modelowania na ok. 45% mierzonych w Krakowie stężenia pyłów zawieszonych PM10. Wynika stąd, że nawet intensywne ograniczanie emisji zanieczyszczeń w Krakowie może przynieść jedynie ograniczony spadek mierzonych w Krakowie stężeń.

Analiza tempa spadku liczby dni z przekroczeniami wykazała, że jest ono nieco szybsze w Krakowie niż województwie, zarówno w sezonach jak i w pełnych latach.

Jednak liczba dni z przekroczeniami w całym analizowanym przedziale czasu była z reguły wyższa w Krakowie. Być może jest to spowodowane wielkością obszaru w których powstają przekroczenia. Kraków zajmuje znacznie mniejszy obszar niż województwo, na którym mogą powstawać wysokie stężenia, w warunkach atmosferycznych sprzyjających gromadzeniu się zanieczyszczeń. W przypadku województwa badany jest znacznie większy obszar, w którym warunki atmosferyczne są zróżnicowane, tak więc przynajmniej w części województwa następuje rozpraszanie zanieczyszczeń.

7. Objaśnienie współczynnika determinacji regresji liniowej

Zakładamy, że wartości pomiarów otrzymane jako średnie w kolejnych latach wykazują tendencję związaną z czasem: malejącą albo rosnącą. Ten spadek albo wzrost modelujemy opadaniem albo wznoszeniem się linii prostej. Jednak rzeczywiste wyniki z wielu powodów nie układają się wzdłuż tej prostej, tylko są od niej mniej lub bardziej oddalone. Najlepiej dopasowaną linię otrzymujemy obliczając tzw. regresję liniową. Jednak wiarygodność położenia tej linii zależy od konkretnych danych. Istnieje miara tej wiarygodności, nazywana współczynnikiem determinacji R². Miara ta mówi, w jakiej części (wyrażonej w procentach) odchylenie wyniku pomiaru w danym roku od średniej spowodowane jest upływem czasu (kolejne lata), a w jakiej części innymi, nieznanymi czynnikami. Wartości R² powyżej 90% świadczą o bardzo dobrym dopasowaniu linii regresji do danych, powyżej 80% - o dobrym.

8. Przypisy – uwagi techniczne

- 1) Spadki w województwie niemiernodajne – bardzo niskie współczynniki determinacji ($R^2 < 0,1$).
- 2) Poza Krakowem wartości nie wykazują wyraźnego trendu zmiany w czasie, ewentualnie słabą tendencję wzrostową. W przypadku takich danych miara dopasowania opisana w rozdz. 7 nie informuje dobrze o dopasowaniu linii regresji, jednak na innej podstawie dopasowanie to można uznać za dobre.

Dodatek.

Wykaz stacji pomiarowych ujętych w analizach okresów pomiarowych 2010-2020, 2014-2020, 2016-2020 i 2017-2020, wraz z numeracją przyjętą w jednej z publikacji przez Regionalny Wydział Monitoringu Środowiska w Krakowie oraz kodami stacji wg GIOŚ. W analizach zmienności czasowej ujmujących wszystkie czynne stacje użyto dodatkowo wyników z ośmiu stacji zainstalowanych w latach 2018 i 2019.

| | |
|---|---|
| 1. Kraków, ul. Bujaka | MpKraKbujaka |
| 3. Kraków, Al. Krasińskiego | MpKraKAlKras (komunikacyjna, tylko w badaniu BaP) |
| 5. Kraków, os. Piastów | MpKraKosPias |
| 6. Kraków, ul. Złoty Róg | MpKraKZloRog |
| 7. Kraków, os. Swoszowice | MpKraKSwoszo |
| 8. Kraków, os. Wadów | MpKraKWadow |
| 9. Tarnów, ul. Bitwy pod Studziankami 5 | MpTarBitStud |
| 11. Nowy Sącz, ul. Nadbrzeżna | MpNoSacznadb |
| 12. Bochnia, ul. Konfederatów Barskich 29 | MpBochKonfed |
| 13. Gorlice, ul. Krasińskiego 9 | MpGorlKrasin |
| 15. Niepołomice, ul. 3 Maja | MpNiepo3Maja |
| 16. Nowy Targ, ul. Słowackiego | MpNoTargPSlo |
| 19. Skawina, ul. Ogrody 101 | MpSkawOsOgro |
| 23. Trzebinia, ul. Związku Walki Młodych | MpTrzebOsZWM |
| 24. Tuchów, ul. Chopina 10 | MpTuchChopin |
| 25. Zakopane, ul. Sienkiewicza | MpZakopaSien |
| 27. Zabierzów, ul. Wapienna | MpZabieWapie |