Wpływ EV oraz rozbudowy infrastruktury rowerowej na jakość powietrza na przykładzie doświadczeń miasta Warszawy

Anna Stulgis

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: 86972@student.pb.edu.pl

Łukasz Dragun

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: l.dragun@pb.edu.pl

DOI: 10.24427/az-2024-0071

Streszczenie

Transport kołowy odgrywa znaczącą rolę w kształtowaniu stanu środowiska naturalnego, będąc jednym z głównych źródeł zanieczyszczeń powietrza. Emisje pochodzące ze spalania paliw konwencjonalnych, zużywania się elementów pojazdów, takich jak tarcze hamulcowe i bieżnik, a także korozja karoserii, mają istotny wpływ na jakość powietrza, którym oddychamy. Celem niniejszego artykułu jest diagnoza potencjału transportu zeroemisyjnego w redukcji zanieczyszczeń i przeciwdziałaniu zmianom klimatu. Przedstawione badania koncentrują się na metodach pomiaru i klasyfikacji negatywnych czynników środowiskowych oraz ukazują zmiany ich poziomu w latach 2014-2023. Wyniki zwracają uwagę na nieoczekiwany wzrost zanieczyszczeń w 2021 roku, po którym nastąpiła poprawa w kolejnych latach. Końcowe wnioski podkreślają konieczność intensyfikacji działań na rzecz promowania transportu ekologicznego, w tym wprowadzania ulg i zachęt dla samorządów oraz wsparcia ze strony społeczeństwa i ustawodawców.

Słowa kluczowe

powietrze, zanieczyszczenie, pomiar, transport zeroemisyjny, Warszawa

Wstęp

W obliczu narastającego kryzysu klimatycznego oraz rosnących potrzeb w zakresie zrównoważonego rozwoju, transport zeroemisyjny staje się kluczowym elementem globalnych strategii ochrony środowiska. Tradycyjne formy transportu, oparte na paliwach kopalnych, są odpowiedzialne za znaczącą część emisji gazów cieplarnianych oraz innych zanieczyszczeń powietrza, wpływając negatywnie na zdrowie ludzi i jakość życia w miastach. Wdrożenie technologii zeroemisyjnych, takich jak pojazdy elektryczne, wodorowe czy rowery wspomagane elektrycznie, oraz rozwój infrastruktury wspierającej te rozwiązania stwarzają możliwość ograniczenia wpływu sektora transportowego na środowisko.

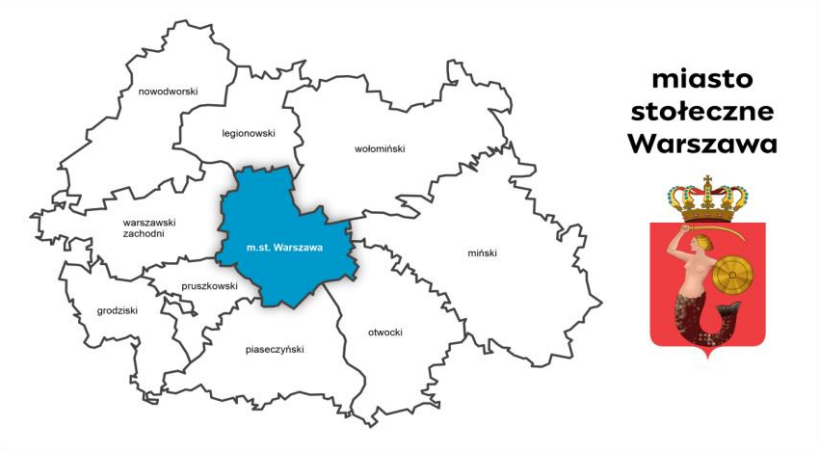
Celem niniejszego artykułu jest diagnoza potencjału transportu zeroemisyjnego w redukcji zanieczyszczeń i przeciwdziałaniu zmianom klimatu. Omówione zostaną dostępne technologie, wyzwania związane z ich wdrażaniem oraz korzyści płynące z ich popularyzacji. W szczególności uwaga zostanie skupiona na wpływie innowacyjnych rozwiązań na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych oraz poprawę jakości życia w środowisku miejskim. Wnioski z przeprowadzonych badań mogą stanowić fundament do dalszych działań na rzecz budowy bardziej ekologicznego i zrównoważonego systemu transportowego.

1. Uwarunkowania topograficzne i klimatyczne aglomeracji warszawskiej

Warszawa leży w środkowym biegu Wisły, na Nizinie Środkowo- mazowieckiej, jej lewobrzeżna część jest w ogromnej mierze umiejscowiona na wysoczyźnie-Równinie Warszawskiej. Pozostała część miasta znajduje się w dolinie Wisły oraz na Równinie Wołomińskiej i w Kotlinie Warszawskiej. Powierzchnia aglomeracji odznacza się urozmaiconą rzeźbą terenu, a różnice wysokości względnych wynoszą około 60 m, najwyższe wzniesienie jest położone 138,0 m n.p.m. i jest to Kopiec Szczęśliwicki, a najniższy punkt leży na wysokości 75,6 m n.p.m. i znajduje się na brzegu Wisły przy granicy z Jabłonną. Aglomeracja warszawska jest położona w obszarze klimatu umiarkowanego i pozostaje pod wpływem działania głównie wiatrów zachodnich. Podczas lata średnia temperatura, mowa tu o lipcu wynosi 18,0 °C, zimą średnia temperatura wynosi -3,3 °C tj. w styczniu [https://powietrze.gios.gov.pl, 29.06.2024].

Duża aglomeracja miejska ma znaczący wpływ na klimat oraz jego cechy. W wyniku skupienia zabudowań oraz wzrostu infrastruktury transportu następuje wzrost emisji ciepła i dochodzi do powstania tzw. miejskich wysp ciepła (MWC). Wyraz wyspa w kontekście MWC ściśle obrazuje izotermy, ponieważ izotermy są

to linie położone na mapie, które łączą punkty o tej samej temperaturze. Wartości tych linii maleją stopniowo ku krańcom miasta. Umieszczone na planie przypominają swym kształtem wyspę, często będącą częścią chłodniejszych obszarów peryferyjnych. [https://www.gov.pl, 28.06.2024].



Rys. 1. Powiaty graniczące z miastem stołecznym Warszawa

Źródło: [https://um.warszawa.pl, 24.07.2024].

Warszawa jest powiatem grodzkim podzielonym na 18 dzielnic, liczba mieszkańców sięga 1 720 658. Łączna powierzchnia stolicy wynosi 517,2 km^2. Największą dzielnicą jest Wawer, stanowi ona 15,4% powierzchni całego miasta a najmniejszą dzielnicą jest Żoliborz stanowi 1,6% ogółu powierzchni [Zegara i in., 2020, s. 250-255].



Rys. 2. Struktura solarna powierzchni geodezyjnej miasta stołecznego Warszawy

Źródło: [https://warszawa.geoportal-krajowy.pl, 24.07.2024].

Grunty zabudowane i zurbanizowane stanowią największy udział w strukturze powierzchni poszczególnych dzielnic miasta, wartość udziału wyniosła 57,2% z tego aż 16,4% to tereny komunikacyjne [Zegara i in., 2020, s.18].

2. Ocena jakości powietrza – informacje ogólne

Pomiarów powietrza oraz oceny tych pomiarów dokonano zgodnie z przepisami art. 89 ust. 1 ustawa Prawo ochrony środowiska. Badania przeprowadzono przez stacje Państwowego Monitoringu środowiska GIOŚ w terminie do 30 kwietnia rokrocznie. Wyniki analiz i ocen opublikowano w formie raportów dostępnych na portalu jakość Powietrza GIOŚ, na podstawie otrzymanych wyników, raportów wdrożono i opracowano liczne programy mające na celu zmniejszenie lub wyeliminowanie przekroczeń jakości norm powietrza [Kobus i Skotak, 2022, s. 5; Bąkowski, 2022].

W rocznej analizie powietrza uwzględniono czynniki, dla których przewidziano wg prawa krajowego oraz wg dyrektyw unijnych normatywne stężenie. Wyróżnia się trzy rodzaje poziomów: 1. poziom dopuszczalny 2. docelowy 3. cel długotrwały. Czynniki szkodliwe rozpatruje się pod względem ochrony zdrowia ludzkiego i ochrony roślin. Dodatkowo każdy czynnik rozpatrywany jest osobno i osobno poddawany analizie [Kobus i Skotak, 2022, s. 9-10].

Na podstawie otrzymanych wyników określa się klasyfikację stref, w których poziom czynników negatywnie wpływających na jakość powietrza:

- przekracza poziom dopuszczalny powiększony o margines tolerancji, mieści się pomiędzy poziomem dopuszczalnym a poziomem dopuszczalnym powiększonym o margines tolerancji;
- nie przekracza poziomu dopuszczalnego;
- przekracza poziom docelowy;
- nie przekracza poziomu docelowego [Kobus i Skotak, 2022, s. 7].

Klasyfikacja stref odbywa się oddzielnie dla czynników określonych w celu ochrony zdrowia ludzi oraz określonych w celu ochrony roślin [Kobus i Skotak, 2022, s. 11].

Badaniu poddano czynniki, które negatywnie wpływają na stan oraz zdrowie ludzi. Czynniki te pochodzą z transportu, są to: tlenek węgla (CO), pył PM10, metale ciężkie: ołów (Pb), arsen (As), kadm (Cd) i nikiel (Ni) w pyle PM10 oraz benzo(a)piren (B(a)P) w pyle PM10. Należy pamiętać, że PM10 jest mieszaniną cząsteczek o średnicy 10 mikrometrów, co umożliwia im przenikanie do płuc a nawet do krwioobiegu, to właśnie z tego powodu są tak niebezpieczne dla zdrowia i życia człowieka i z tego powodu poddawane są ścisłej kontroli.

Transport samochodowy emituje różnego rodzaju zanieczyszczenia np. metale ciężkie które wytwarzane są podczas eksploatowania elementów ciernych układu hamulcowego, sprzęgła, bieżnika, a także powstają w wyniku korozji elementów podwozia i nadwozia, powstają również podczas spalania paliw konwencjonalnych [Chen i in., 2022].

3. Metodyka badań czynników negatywnie wpływających na jakość powietrza w mieście stołecznym

Badania przeprowadzono na podstawie danych zebranych ze stacji pomiarowych. Dane udostępniono w formie raportów rocznych za okres od 2014 do 2023roku.

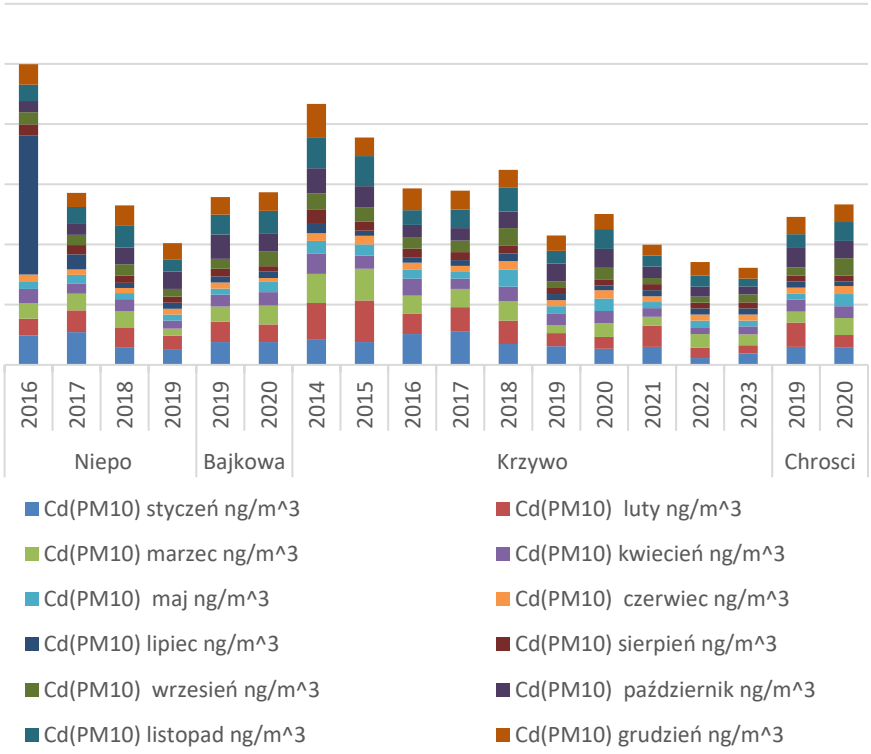
Poniżej syntetyczny opis poszczególnych stacji pomiarowych biorących udział w badaniach, dokładny czas uśrednienia dla badanych czynników oraz uszczegółowiony sposób pomiaru:

- Stacja pomiarowa MZWarKondrat (Kondrat) znajdująca się przy ulicy Kondratowicza 8. Badane zanieczyszczenie: CO w okresie 2014-2016. Czas uśredniania 1-godzinny, typ pomiaru ciągły automatyczny;
- Stacja pomiarowa MzWarAlNiepo (Niepo) znajdująca się przy al. Niepodległości 227/233. Badane zanieczyszczenie: pył zawieszony PM10 (Cd, Pb, Ni. w latach 2016-2019), CO (2014-2023), BaP(PM10) w latach 2016-2019. Czas uśredniania 1-godzinny, typ pomiaru ciągły automatyczny;
- Stacja pomiarowa MzWarBajkowa (Bajkowa) znajdująca się przy ul. Bajkowa 17/21. Badane zanieczyszczenie: pył zawieszony PM10 (Ni, Pb w latach 2019-2020). Czas uśredniania 1-godzinny, typ pomiaru ciągły automatyczny, dla pyłu zawieszonego PM10, dla BaP(PM10) (2019-2023) czas uśrednienia 24-godziny typ pomiaru próby łączone;
- Stacja pomiarowa MzWarTolsto (Tolsto) znajdująca się przy ul. Tołstoja 2. Badane zanieczyszczenie: BaP(PM10) (2016-2017), czas uśredniania 1-godzinny, typ pomiaru ciągły automatyczny;
- Stacja pomiarowa MzWarAKrzywo (Krzywo) znajdująca się przy ul. Anieli Krzywoń. Badane zanieczyszczenie: pył zawieszony PM10 (Ni, Pb, Cd w latach 2014-2023), BaP(PM10) 2014-2023, czas uśredniania 24-godzinny, typ pomiaru próby łączone;
- Stacja pomiarowa MzWarChrosci (Chrosci) znajdująca się przy ul. Chrościckiego 16/18. Badane zanieczyszczenie: pył zawieszony PM10 (Ni,

Pb,Cd w latach 2019-2020), czas uśredniania 24-godzinny, typ pomiaru ciągły, oraz BaP(PM10) 2019-2022, czas uśredniania 24-godzinny, typ pomiaru próby łączone.

4. Wyniki badań

Zebrane informacje przedstawiono w formie wykresów uwzględniając osobno każdy czynnik zanieczyszczający powietrze, w przedstawionych wynikach uwzględniono nawet krótkookresowe pomiary czynników. Opracowane dane dotyczą wskaźników: Cd(PM10), BaP(PM10), CO, Ni(PM10) oraz Pb(PM10).

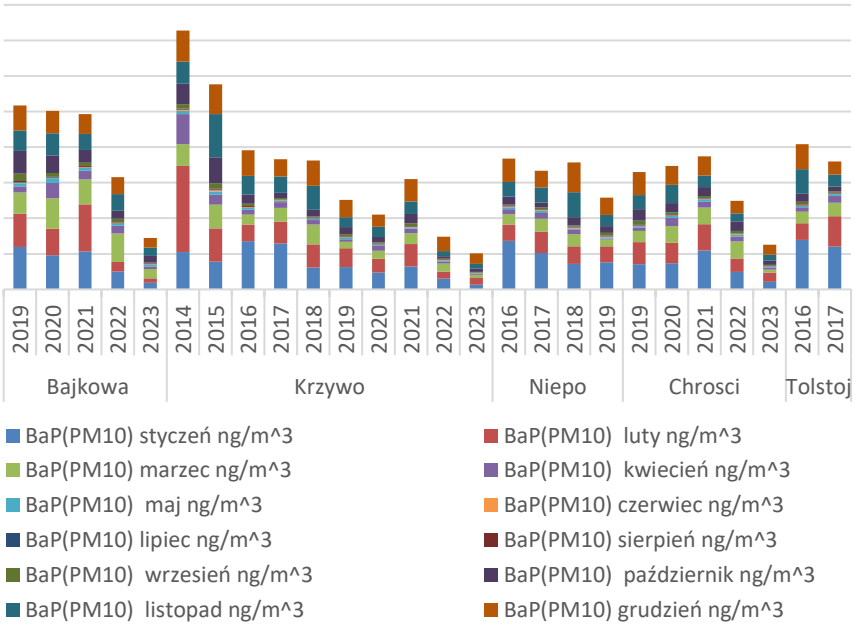


Rys. 3. Występowanie czynnika Cd(PM10) w latach 2014-2023 w podziale na miesiące

Źródło: opracowanie własne na podstawie [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives, 28.06.2024].

Badany czynnik Cd(PM10) powstaje w wyniku spalania ropy, średnioroczna norma stężenia tego metalu wynosi 5ng/m^3 [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/info/552, 29.06.2024].

Pomiaru wskaźnika Cd(PM10) dokonano w 4 niezależnych stacjach, z czego w pełnym okresie badawczym tylko w jednej mianowicie MzWarAKrzywo (Krzywo). Wszystkie pomiary wykonane w 2014-2016 wykazały bardzo wysoki poziom. Również we wszystkich placówkach odnotowano wzrost czynnika Cd(PM10) w latach 2019- 2020 oraz znaczący spadek w latach 2022-2023. Wzrost czynnika prawdopodobnie został wywołany przez natężenie ruchu aut osobowych. Z dużym prawdopodobieństwem zostało to zdeterminowane przez obostrzenia związane z Covid19. Obostrzenia objęły między innymi ograniczenia w ruchu międzynarodowym, zamknięcie granic, zakaz przemieszczania się w niektórych regionach kraju oraz ograniczenia w przemieszczaniu się komunikacją publiczną [Bednarska i in., 2023, s. 163]. Ostatecznie w każdej placówce badawczej pod koniec okresu pomiarowego (dotyczy 2022-2023), odnotowano tendencje spadkową z dużym prawdopodobieństwem jest to wynikiem całkowitego zniesienia obostrzeń związanych z pandemią.

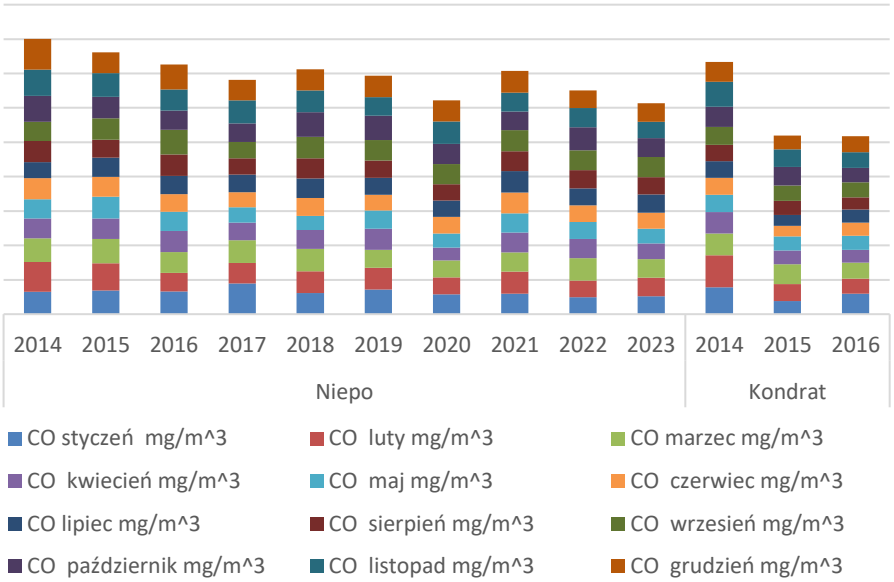


Rys. 4. Występowanie czynnika BaP(PM10)w latach 2014-2023 w podziale na miesiące

Źródło: opracowanie własne na podstawie [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives , 28.06.2024].

Średnioroczna wartość docelowa zanieczyszczenia wynosi 1ng/m^3 [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/info/552, 29.06.2024].

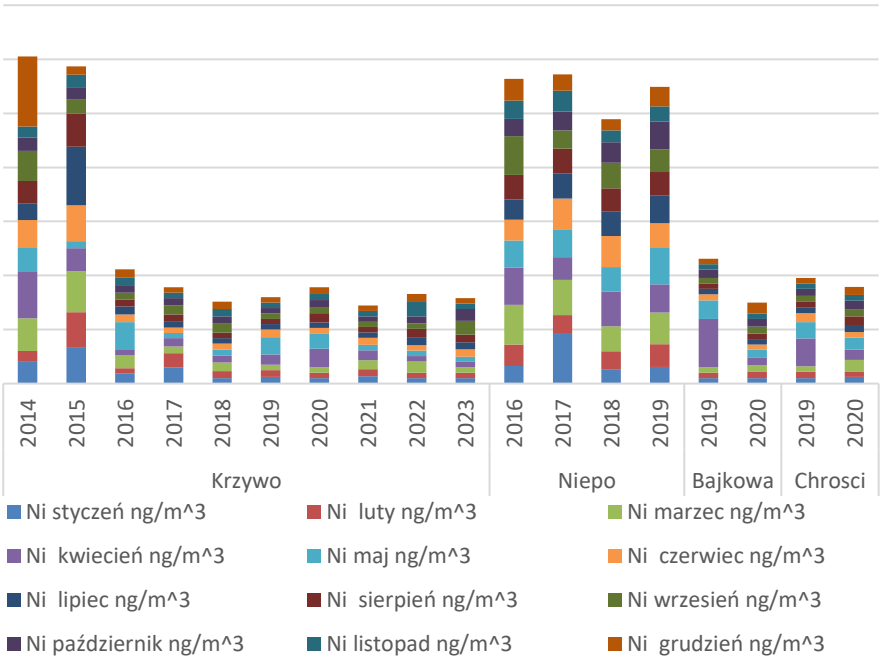
Pomiaru czynnika BaP(PM10) dokonano w 5 stacjach, z czego w pełnym okresie badawczym tylko w jednej mianowicie MzWarAKrzywo (Krzywo). W 2 stacjach odnotowano wzrost badanego czynnika w roku 2021. W każdej placówce badawczej pod koniec okresu pomiarowego (dotyczy 2022-2023) odnotowano tendencje spadkową.



Rys. 5. Występowanie czynnika CO w latach 2014-2023 w podziale na miesiące

Źródło: opracowanie własne na podstawie [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives , 28.06.2024].

Pomiaru czynnika CO dokonano w 2 stacjach, z czego w pełnym okresie badawczym tylko w jednej mianowicie MzWarANiepo (Niepo), średnia ważona 8-godzinna dla tego zanieczyszczenia wynosi 10mg/m^3 [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/info/552, 29.06.2024]. W 2 stacjach odnotowano wysoki poziom badanego czynnika w roku 2014 oraz w 2021. Ostatecznie w każdej placówce badawczej pod koniec okresu pomiarowego odnotowano tendencje spadkową badanej wielkości czynnika.

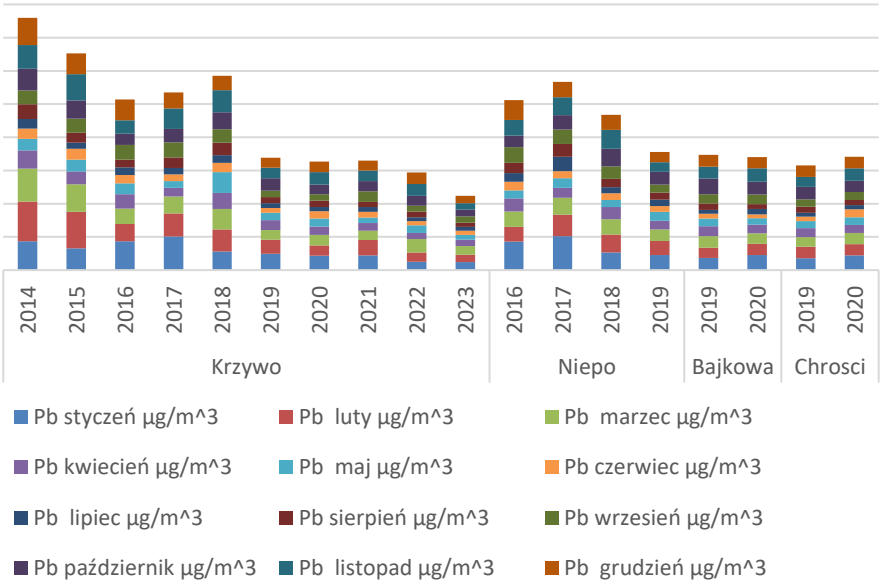


Rys. 6. Występowanie czynnika Ni(PM10) w latach 2014-2023 w podziale na miesiące

Źródło: opracowanie własne na podstawie [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives , 28.06.2024].

Pomiaru czynnika Ni(PM10) dokonano w 4 stacjach, z czego w pełnym okresie badawczym tylko w jednej mianowicie MzWarAKrzywo (Krzywo), średnioroczna dopuszczalna wartość stężenia dla wyżej wymienionego zanieczyszczenia wynosi 20ng/m^3 [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/info/552, 29.06. 2024].

Badania nie pokrywają się dostatecznie w czasie, aby była możliwość przeprowadzenia dodatkowej analizy porównawczej. Bardzo ciekawym przypadkiem jest Ni(PM10) ponieważ jego wzrost odnotowano 2020 roku. Dopiero szczegółowe dane pozwalają dostrzec, że na ogólny wynik miał wpływ ogromny wzrost w tzw. miesiącach przejściowych: październik i kwiecień. Ostatecznie w każdej placówce badawczej pod koniec okresu pomiarowego odnotowano tendencje spadkową badanego wskaźnika.



Rys. 7. Występowanie czynnika Pb(PM10) w latach 2014-2023 w podziale na miesiące

Źródło: opracowanie własne na podstawie [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives , 28.06.2024].

Badany czynnik powstaje w wyniku spalania paliwa konwencjonalnego i jest niebywale niebezpieczny dla zdrowia i życia człowieka, jego normatywne stężenie wynosi 0,5µg/m^3, jako średnioroczna wartość dopuszczalna [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/info/552, 29.06.2024]. Pomiaru czynnika Pb(PM10) dokonano w 4 stacjach, z czego w pełnym okresie badawczym tylko w jednej mianowicie MzWarAKrzywo (Krzywo). Badania nie pokrywają się dostatecznie w czasie, aby była możliwość przeprowadzenia dodatkowej analizy porównawczej, nie mniej jednak i tutaj odnotowany został wzrost stężenia badanego czynnika w roku 2021. Ostatecznie w każdej placówce badawczej pod koniec okresu pomiarowego odnotowano tendencje spadkową badanego wykładnika.

Podsumowując wyniki pomiarów metali ciężkich oraz PaB(PM10) należy wyróżnić stację, w której odbyły się pełne dane empiryczne dotyczące okresu 2014-2023, mianowicie obiekt MzWarAKrzywo (Krzywo). Z przeprowadzonych badań nasuwa się wniosek, że analizowane wielkości w znaczący sposób malały na przestrzeni badanego okresu, oraz że wzrosły w 2021. Podsumowując wyniki badań CO należy podkreślić, że poziom wskaźnika stale spada i również w 2021 roku odnotowano wzrost jego stężenia w powietrzu. Wzrost wszystkich badanych wskaźników

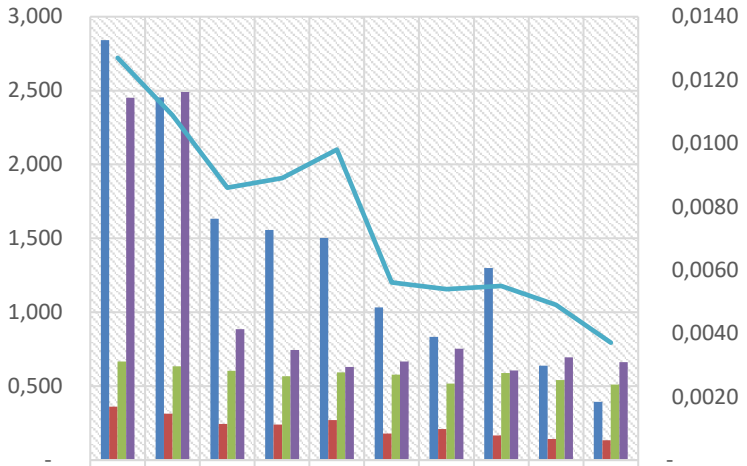
prawdopodobnie podyktowany był obostrzeniami w związku z Covid19 i wywołany nasileniem natężenia ruchu aut osobowych napędzanych paliwami konwencjonalnymi. Natomiast spadek mierzonych wartości (dotyczy 2022-2023) jest wynikową działań a dokładnie: zniesienie obostrzeń Covd19, wprowadzenie do floty autobusów elektrycznych, rozbudowa infrastruktury rowerowej oraz wprowadzenie silnych programów wspierających komunikację miejską.

5. Dyskusja wyników badań

Na podstawie wyników badań pochodzących ze stacji pomiarowej dokonuje się klasyfikacji stref. Każde zanieczyszczenie jest rozpatrywane osobno i dla każdego przypadku nadaję się osobną klasyfikację- strefę, podczas standaryzowania czynników brane są pod uwagę czasy uśrednienia normowanych stężeń- - poziomów dopuszczalnych lub docelowych: rok, 24 godz., 8 godz., 1 godz. w przypadku kryteriów związanych z ochroną zdrowia oraz: rok, pora zimowa [Kobus i in., 2022, s. 17-22].

Każde skażenie ma nadpisaną strefę wynikową oddzielną ze względu na ochronę roślin i oddzielną ze względu na ochronę zdrowia ludzkiego. Klasę wynikową ustala się wg najmniej korzystnego wyniku uzyskanego podczas badań, biorąc pod uwagę parametry dla tego zanieczyszczenia. Reasumując, ostateczny wynik oceny i klasyfikacji danej strefy zależy od największego stopnia zanieczyszczenia daną substancją. Uzyskany wynik przekłada się na określone wymagania w zakresie działań na rzecz poprawy jakości powietrza (w przypadku, gdy nie są spełnione odpowiednie kryteria) lub na rzecz utrzymania tej jakości (jeżeli spełnia ona przyjęte standardy) [Kobus i in., 2022, s. 12].

Badane poziomy zanieczyszczenia w powietrzu uzyskały w 2022 roku klasę A, a to oznacza, iż poziom stężenia zanieczyszczenia nie przekroczył poziomu dopuszczalnego /docelowego, potwierdzając wcześniejsze wyniki badań.



	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
BaP(PM10)-ng/m^3	2,84	2,45	1,633	1,55	1,50	1,03	0,83	1,30	0,63	0,39
Cd(PM10)-ng/m^3	0,36	0,31	0,244	0,24	0,27	0,17	0,20	0,16	0,14	0,13
CO-mg/m^3	0,66	0,63	0,605	0,56	0,59	0,57	0,51	0,58	0,54	0,51
Ni(PM10)-ng/m^3	2,45	2,49	0,886	0,74	0,63	0,66	0,75	0,60	0,69	0,66
Pb(PM10)-µg/m^3	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rys. 8. Średnioroczne występowanie czynników negatywnych w powietrzu na przestrzeni 2014-2023

Źródło: opracowanie własne na podstawie [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives , 28.06.2024].

Jakość powietrza w mieście stołecznym Warszawa znacząco się poprawiła. Odnotowano spadek wielkości zanieczyszczeń, ponadto poddane badaniu czynniki zakwalifikowano do strefy A. Nasuwa się zatem pytanie co było determinantą takich spadków? W odniesieniu do powyższego pytania nasuwają się dwa rozwiązania wprowadzone w życie w okresie badawczym.

Pierwszą teoretyczną determinantą jest rozwój infrastruktury rowerowej. Rozrost infrastruktury rowerowej powinien teoretycznie pozytywnie wpłynąć na jakość powietrza. Potencjalne korzyści klimatyczne wynikające z jazdy rowerem wg najnowszych badań opublikowanych w Communications Earth & Environment powinny obniżyć emisję zanieczyszczeń powietrza o 686 mln ton CO warunkiem do tego jest zamiana transportu samochodowego na rowerowy zaś pokonamy dystans musiałby wynieść 2,6 km dziennie [Chen i in., 2022].

Transport rowerowy jest obarczony pewnymi słabościami, na jego charakter wpływa temperatura, sezonowość oraz pogoda. Niemniej jednak jest to najzdrowszy

sposób przemieszczania się. Ten rodzaj transportu powinien zostać wybrany do pokonania krótkich oraz średnich dystansów np.: w drodze do pracy, sklepu czy też na uczelnie. Taka forma transportu nie tylko korzystnie wpływa na stan powietrza, ale również na naszą kondycje, mobilność (nie stoimy w korkach), na nasze samopoczucie oraz rosnącą świadomość ekologiczną. Jak zostało zauważone wcześniej ten środek transportu jest niezwykle czuły na zmianę pogody, wówczas rekomendujemy komunikację publiczną.

Tab. 1. Miary statystyczne dynamiki absolutne

Rok	Infrastruktura rowerowa / km	Miary statystyczne dynamiki absolutne		
t	xt	Łańcuchowe	Jednopodstawowe 2009	Jednopodstawowe 2023
		Δxt/t-1	Δxt/2009	Δxt/2023
2009	255		-	-518
2010	266	11	11	-507
2011	289	23	34	-484
2012	319	30	64	-454
2013	368	49	113	-405
2014	416	48	161	-357
2015	467	51	212	-306
2016	495	28	240	-278
2017	533	38	278	-240
2018	585	52	330	-188
2019	628	43	373	-145
2020	674	46	419	-99
2021	709	35	454	-64
2022	736	27	481	-37
2023	773	37	518	-

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Dziubiński i in., 2023, s. 43].

Analiza statystyczna infrastruktury rowerowej w mieście stołecznym Warszawa: Ilość kilometrów infrastruktury rowerowej w Warszawie w 2023 roku wyniosła 773 co stanowiło wzrost o 37 km w porównaniu do roku ubiegłego, a w porównaniu do roku 2009 wzrost wyniósł aż 518 km, dla porównania w 2013 tras rowerowych było mniej o 405 km w stosunku do roku 2023. Do niezbędnych obliczeń został wykorzystany wzór (1).

Tab. 2. Miary statystyczne dynamiki indeksy

Rok	Infrastruktura rowerowa / km	Miary statystyczne dynamiki indeksy		
t	xt	Łańcuchowe	Jednopodstawowe 2009	Jednopodstawowe 2023
		i t/t-1	i t/2009	i t/2023
2009	255		100%	33%
2010	266	104%	104%	34%
2011	289	109%	113%	37%
2012	319	110%	125%	41%
2013	368	115%	144%	48%
2014	416	113%	163%	54%
0215	467	112%	183%	60%
2016	495	106%	194%	64%
2017	533	108%	209%	69%
2018	585	110%	229%	76%
2019	628	107%	246%	81%
2020	674	107%	264%	87%
2021	709	105%	278%	92%
2022	736	104%	289%	95%
2023	773	105%	303%	100%

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Dziubiński i in., 2023, s. 43].

Analiza statystyczna infrastruktury rowerowej w mieście stołecznym Warszawa: Rozrost infrastruktury rowerowej w Warszawie w 2023 stanowił 105% poziomu w porównaniu do roku ubiegłego, a w odniesieniu do roku 2009 wynosił aż 303% z tego wynika, że ponad trzykrotnie zwiększono kilometraż tras rowerowych. Największy przyrost % infrastruktury rok do roku odnotowano w 2013 i tak: rozrost infrastruktury rowerowej wyniósł 115% w stosunku do roku 2012, do roku 2009 wyniósł 144%, oraz 48% wzrostu infrastruktury do roku 2023. Do niezbędnych obliczeń został wykorzystany wzór (2).

Tab. 3. Miary statystyczne dynamiki względne

Rok	Infrastruktura rowerowa / km	Miary statystyczne dynamiki względne		
T	Xt	Łańcuchowe	Jednopodstawowe 2009	Jednopodstawowe 2023
		d t/t-1	d t/2009	d t/2023
2009	255		0%	-67%
2010	266	4%	4%	-66%

Rok	Infrastruktura rowerowa / km	Miary statystyczne dynamiki względne		
T	Xt	Łańcuchowe	Jednopodstawowe 2009	Jednopodstawowe 2023
		d t/t-1	d t/2009	d t/2023
2011	289	9%	13%	-63%
2012	319	10%	25%	-59%
2013	368	15%	44%	-52%
2014	416	13%	63%	-46%
2015	467	12%	83%	-40%
2016	495	6%	94%	-36%
2017	533	8%	109%	-31%
2018	585	10%	129%	-24%
2019	628	7%	146%	-19%
2020	674	7%	164%	-13%
2021	709	5%	178%	-8%
2022	736	4%	189%	-5%
2023	773	5%	203%	0%

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Dziubiński i in., 2023, s. 43].

Analiza statystyczna infrastruktury rowerowej w mieście stołecznym Warszawa: Wzrost infrastruktury rowerowej w porównaniu do roku 2022 wyniósł 5% a w porównaniu do roku bazowego 2009 wzrósł o 203%, Z kolei w roku 2013 wzrost w stosunku do 2012 wyniósł 15%, a do roku bazowego (2009) 44% w porównaniu do roku 2023 był mniejszy o 52%. Do niezbędnych obliczeń został wykorzystany wzór(3).

Stale powiększająca się infrastruktura transportu rowerowego to nie tylko drogi, ale również zintegrowane przystanki B+R. Jest to system parkingów rowerowych umożliwiających pozostawienie w bezpiecznym miejscu roweru i kontynuację dalszej podróży przy użyciu transportu masowego tj. metra, autobusu, kolei bądź tramwaju. W Warszawie istnieje 68 tego typu przystanków na 1464 pojazdów (dane z 2014 roku) dodatkowo miasto oddało do użytku publicznego stacje naprawcze dla rowerów. Tego typu działania znacznie zwiększyły zainteresowanie transportem rowerowym.

Miary statystyczne dynamiki umożliwiają pomiar (w określonym czasie) zmiany, eskalacji badanych cech. Na postawie miar absolutnych możemy określić

różnicę między poziomem badanego zjawiska w dwóch momentach, w dwóch okresach. Do obliczeń wykorzystano następujące wzory:

Przyrosty absolutne łańcuchowe:

$$\Delta x_{2/1} = x_2 - x_1$$
$$\Delta x_{3/2} = x_3 - x_2$$
.
.
.
$$\Delta x_{T/T-1} = x_T - x_{T-1}$$

Przyrosty absolutne jednopodstawowe:

$$\Delta x_{1/c} = x_1 - x_c$$
$$\Delta x_{2/c} = x_2 - c$$
.
.
.
$$\Delta x_{T/c} = x_T - x_c$$

c- numer okresu (momentu) wybranego jako podstawowy (1) [Madras-Kobus, 2022, s. 61].

Na podstawie miar dynamiki indeksy możemy określić stosunek badanego poziomu zjawiska do poziomu zjawiska w okresie przyjętym za podstawę porównań, informują nas o procentowej zmianie badanego zjawiska. Do obliczeń wykorzystano następujące wzory:

Indeksy łańcuchowe:

$$i_{2/1} = \frac{x_2}{x_1}$$
$$i_{3/2} = \frac{x_3}{x_2}$$
.
.
.
$$i_{T/T-1} = \frac{x_T}{x_{T-1}}$$

Indeksy jednopodstawowe:

$$i_{1/C} = \frac{x_1}{x_C}$$
$$i_{2/C} = \frac{x_2}{x_C}$$
.

.
.

$$i_{T/C} = \frac{x_T}{x_C}$$

c- numer okresu (momentu) wybranego jako podstawowy (2) [Madras-Kobus, 2022, s. 63].

Na podstawie miar dynamiki względnych możemy określić iloraz przyrostów względnych do jego poziomu w okresie (momencie) przyjętym za podstawę porównań, mówią o ile procent zmieniło się dane zjawisko. Do obliczeń wykorzystano następujące wzory:

Przyrosty względne łańcuchowe:

$$d_{2/1} = \frac{\Delta x_{2/1}}{x_1} = \frac{x_2 - x_1}{x_1}$$

$$d_{3/2} = \frac{\Delta x_{3/2}}{x_2} = \frac{x_3 - x_2}{x_2}$$

.
.
.

$$d_{T/T-1} = \frac{\Delta x_{T/T-1}}{x_{T-1}} = \frac{x_T - x_{T-1}}{x_{T-1}}$$

Przyrosty względne jednopodstawowe:

$$d_{1/C} = \frac{\Delta x_{1/C}}{x_C} = \frac{x_1 - x_C}{x_C}$$

$$d_{2/C} = \frac{\Delta x_{2/C}}{x_C} = \frac{x_2 - x_C}{x_C}.$$

.
.
.

$$d_{T/c} = \frac{\Delta x_{T/c}}{x_c} = \frac{x_T - x_c}{x_c}$$

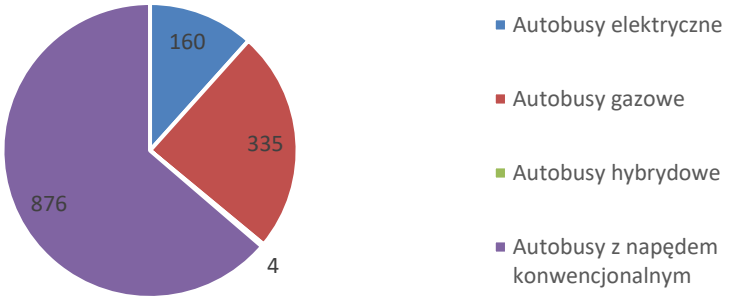
c- numer okresu (momentu) wybranego jako podstawowy (3) [Madras-Kobus, 2022, s. 62].

Drugą determinantą jest elektryfikacja pojazdów miejskiej komunikacji. Należy pamiętać, iż paliwa konwencjonalne spalane przez autobusy są jednym z największych źródeł emisji CO, metali ciężkich w pyle zawieszonym oraz benzo(a)pirenu (BaP) [Motowidlak i in., 2019, s. 3].

Kluczowym znaczeniem dla zmniejszenia emisji szkodliwych związków do powietrza pochodzących z transportu jest wprowadzenie do miejskiej floty coraz to większej liczby pojazdów elektrycznych. Szacuje się, że do roku 2025 globalna flota elektrycznych autobusów będzie stanowić 47% ogółu autobusów miejskich [Motowidlak i in., 2019, s. 3].

Obiecujące są wyniki badań przeprowadzonych w Krakowie z przełomu lat 2010-2015. Badania dotyczyły autobusów hybrydowych i wykazały one redukcje wielkości emisji zanieczyszczeń do powietrza na poziomie ok. 35% PM10 oraz redukcje hałasu o ok. 40% [Jóźwiak i Dzuguryan, 2017, s.182-185].

Pierwsze autobusy elektryczne rozpoczęły swoja pracę w Warszawie w lipcu 2017 roku i było to 10 pojazdów marki Ursus City Smile 12 LFE, kolejne 10 autobusów marki Solaris dostarczono w marcu 2018, do roku 2023 stan pojazdów elektrycznych wyniósł 160 sztuk. Wszystkie zamówione pojazdy zostały wytypowane na podstawie obserwacji tzw. potoków pasażerskich, monitowaniu liczby pasażerów w autobusach i w tramwajach. Analiza tych obserwacji jest wynikową potrzeb przewozowych miasta.

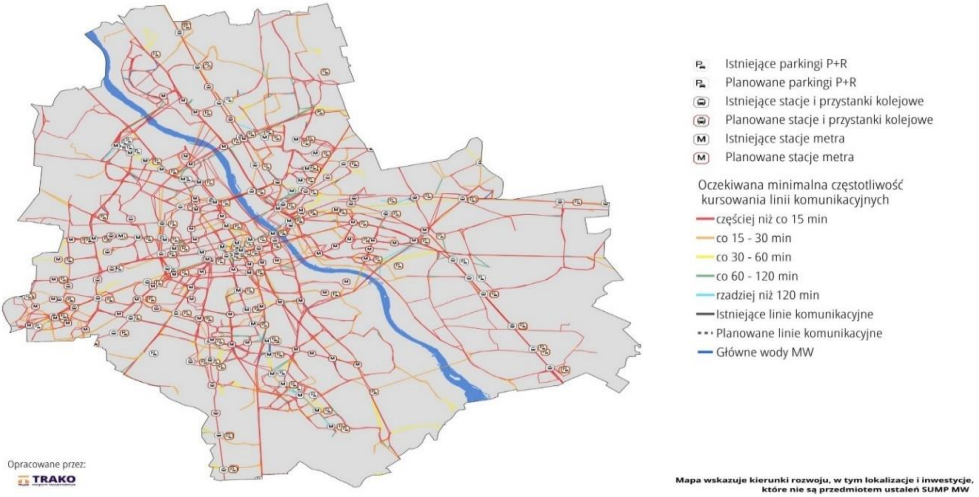


Rys. 9. Autobusy miejskie Warszawa stan na 2023r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [https://um.warszawa.pl/-/komunikacja-miejska-podsumowanie-2023-roku, 30.06.2024].

W wyniku wdrożenia elektrycznych pojazdów miejskich już w 2019 roku odnotowano znaczący spadek wartości zanieczyszczeń w powietrzu Cd(PM10), CO,

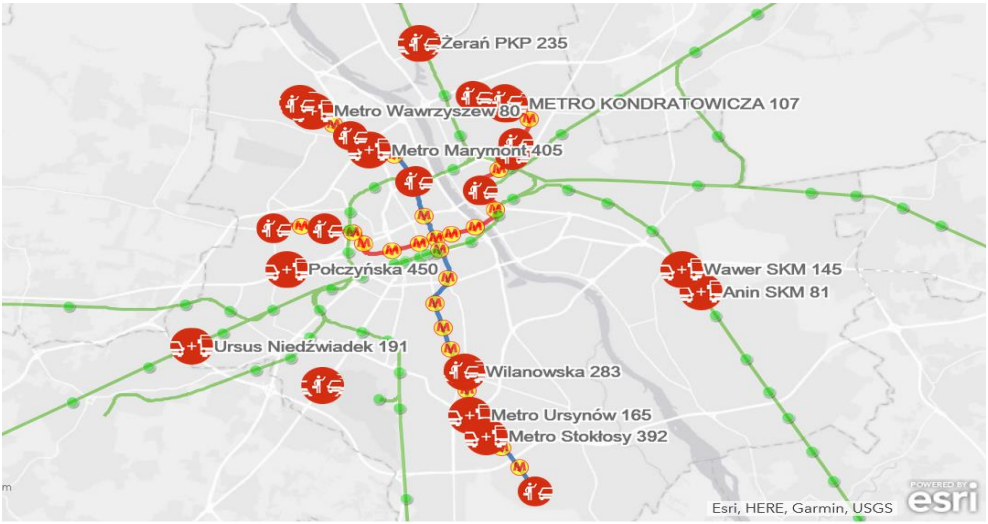
Pb(PM10) oraz BaP(PM10), zauważono równoczesny wzrost Ni(PM10) o 6% w stosunku do roku 2018.



Rys. 10. Mapa istniejących oraz planowanych: parkingów P+R (zaparkuj i jedź), przystanków i stacji kolejowych, stacji metra

Źródło: [https://sm.waw.pl/wp-content/uploads/2023/11/m.st_.-Warszawa-scaled.jpeg, 06.07.2024].

Dodatkowo wprowadzono bliźniaczy program P+R, w odniesieniu do B+R, polegający na tym, iż pojazdy osobowe mogą parkować bezpłatnie na tego typu parkingach pod warunkiem, iż zostanie przedstawiony dokument, który uprawnia do przejazdów środkami lokalnego transportu zbiorowego.



Rys. 11. Mapa parkingów typu P+R oraz K+R

Źródło: [https://www.wtp.waw.pl/parkingi/#StrefyKissRide, 13.07.2024].

Kolejnym projektem zachęcającym do korzystania z masowych środków komunikacji są specjalne strefy Kiss & Ride. Są to wyjątkowe miejsca mające na celu ułatwienie dojazdu/ dotarcia do wybranego środka transportu masowego. Jest to po prostu wyznaczone miejsce, w którym można zatrzymać pojazd osobowy, tak aby pasażer mógł opuścić auto w bezpieczny sposób, nie narażając siebie ani innych uczestników ruchu drogowego. Tego typu strefy parkingowe oznaczone są specjalnymi tabliczkami. Zarząd Transportu Miejskiego do tej pory uruchomił 10 stref tego typu.

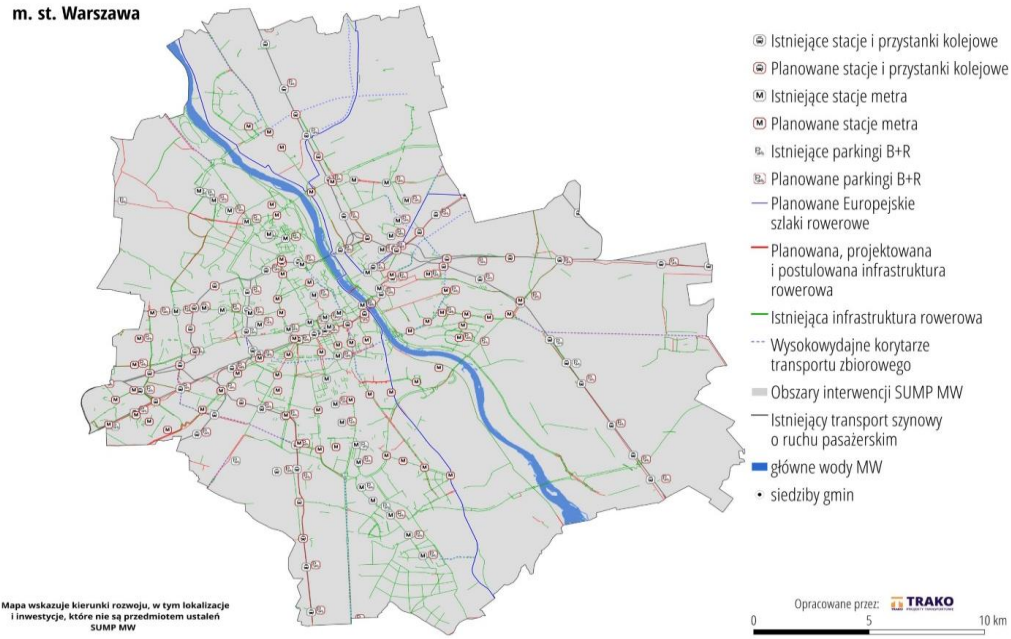
Podsumowanie

Z przedstawionych badań wynika, że jakość powietrza w Warszawie znacząco uległa poprawie. Czynniki, które podlegały analizie wykazały tendencje spadkową, a ich poziom w powietrzu nie przekroczył dopuszczalnej normy, przez to wszystkie czynniki osiągnęły klasę powietrza A [https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives 28.06.2024].

Związek obostrzeń związanych z pandemią koronawirusa, a nagły wzrost stężenia zanieczyszczeń jest wyraźny i wykazuje w jednoznaczny sposób jak ogromne znaczenie na jakość powietrza ma transport masowy, a przede wszystkim jego do-

stępność, ilość, oraz w dużej mierze jakość świadczonych usług, np. niskopodłogowe autobusy umożliwiają korzystanie z infrastruktury również osobom starszym lub schorowanym.

Komplementarność całego transportu, zarówno rowerowego, osobowego jak i masowego ma ogromny wpływ na jakość powietrza. Ta cecha transportu w badanej aglomeracji została zauważona i wysoko rozwijana. Zauważono jej ogromny potencjał sprawczy, poprzez wprowadzanie licznych programów, tj. budowa miejsc parkingowych typu B+R, typu P+R, K+R, a przez to mobilizacja i aktywacja miejskiej komunikacji. Tego typu działania w sposób znaczący wpłynęły na wyniki dotyczące jakości powietrza w badanym okresie 2014-2023.



Rys. 12. Mapa istniejących oraz planowanych: przystanków kolejowych, stacji metra, parkingów B&R, infrastruktury rowerowej, wysokowydajnych korytarzy transportu zbiorowego

Źródło: [https://sm.waw.pl/wp-content/uploads/2023/11/m.st_.-Warszawa-scaled.jpeg, 06.07. 2024].

Kontynuując, kluczowe determinanty utrzymania trendów spadkowych zanieczyszczeń w powietrzu to wprowadzanie w życie nowych programów wspierających komunikację miejską, rozbudowa już istniejącej infrastruktury, zwiększenie jej dostępności, ilości połączeń, uatrakcyjnienie ceny przejazdów, a także wprowadzanie

specjalnych stref pozbawionych możliwości wjazdu pewnej grupie pojazdów z napędem konwencjonalnym.

W Warszawie od 1 lipca ruszył program Pierwsza w Polsce strefa czystego transportu. Strefa ta dotyczy większości Śródmieścia, pewnej części dzielnic Praga-Północ, Praga-Południe…, w sumie obejmując 34 kilometrów kwadratowych co daje około 7% powierzchni Warszawy. Po tym terenie nie mogą poruszać się pojazdy z silnikiem benzynowym, które mają 27 lat lub są starsze, oraz z silnikiem diesla, które mają 19 lat i więcej. Obostrzenia nie dotyczą samych mieszkańców oraz osób, które płacą podatki w stolicy. Wdrożenie tego typu programów ma na celu ograniczenie intensyfikacji ruchu pojazdów osobowych indywidualnych oraz zachęcenie do korzystania ze środków transportu masowego. Szacuje się, że efekt wprowadzenia tej strefy będzie widoczny dopiero w 2028 roku i przyniesie on znaczną redukcję zanieczyszczeń powietrza [https://fakty.tvn24.pl/zobacz-fakty/w-warszawie-od-1-lipca-bedzie-dzialac-pierwsza-w-polsce-strefa-czystego-transportu-st7985348, 13.07.2024].

Reasumując, zwiększenie infrastruktury rowerowej w widoczny sposób wpłynęło na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do powietrza. Wzrost udziału pojazdów elektrycznych we flocie autobusów miejskich znacząco przyczynił się do zmniejszenia czynników szkodliwych w powietrzu. Wprowadzenie silnych programów wspierających komunikację masową również przełożyło się na znaczną poprawę stanu powietrza w badanej aglomeracji. Zniesienie obostrzeń związanych z koronawirusem w sposób wyraźny i klarowny pokazało jak zmniejszenie natężenia ruchu aut osobowych wpływa na stan powietrza.

ORCID ID

Łukasz Dragun: http://orcid.org/0000-0001-6768-6818

Literatura

1. *Bank Danych pomiarowych,* Inspekcja Ochrony Środowiska 2014-2023, https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives [28.06.2024].
2. Bednarska J., Strzemińska W., Tarasiuk B., Madras-Kobus B. (2023), *Komunikacja miejska w Polsce w latach 2009-2021*, Akademia Zarządzania, 7(2), s. 163-183.
3. Bąkowski W. (2022), *Warunki efektywnego wdrożenia nowoczesnego transportu miejskiego*, Transport Miejski i Regionalny, 11-12.

4. Chen W., Carstensen,T.A., Wang, R. (2022), *Historyczne wzorce i konsekwencje zrównoważonego rozwoju związane z własnością i użytkowania rowerów na całym świecie,* Comun Earth Environ, 3, 171.
5. *Geoportal krajowy* https://warszawa.geoportal-krajowy.pl/na-mapie#teryt=1465011&map=solarmap&x=21.02781612771452&y=52.24159450368086&z=11.22&details=plot [24.07.2024].
6. https://www.gov.pl/web/wuf11/miejska-wyspa-ciepla-czyli-dlaczego-w-obszarach-zurbanizowanych-jest-goraco-i-co-zrobic-zeby-bylo-chlodniej2 [28.06.2024].
7. Kobus D., Skotak K. (2022), *Ocena jakości powietrza w strefach w Polsce za rok 2022*, Państwowy Monitoring Środowiska – Główny Inspektorat Ochrony Środowiska.
8. Madras-Kobus B. (2022), *Materiały dydaktyczne do wykładów ze Statystyki,* s. 59-63.
9. Portal Miasta stołecznego Warszawa https://um.warszawa.pl/waw/metropolia-warszawska/-/miasto-stoleczne-warszawa-1 [24.07.2024].
10. *Raport roczny 2023*, *Państwowy Monitoring Środowiska – Główny Inspektorat Ochrony Środowiska*, https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/publications/publication [29.06.2024].
11. *Serwis informacyjny VEHIS,* https://moto.rp.pl/tu-i-teraz/art17272391-samorzady-buduja-floty-aut-na-prad [01.07.2024].
12. *Stanowiska pomiarowe*, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/sensors [30.06.2024].
13. *Strona internetowa Urzędu Miasta Warszawa – Drogi*, https://transport.um.warszawa.pl/-/drogi [03.07.2024].
14. *Strona internetowa Urzędu Miasta Warszawa – Komunikacja Miejska podsumowanie 2023*, https://um.warszawa.pl/-/komunikacja-miejska-podsumowanie-2023-roku [03.07.2024].
15. *Strona internetowa Urzędu Miasta Warszawa- Raport o stanie miasta 2023*, https://um.warszawa.pl/waw/strategia/raport-o-stanie-miasta [03.07.2024].
16. *Strona internetowa Urzędu Miasta Warszawa- Stolica 5 linii metra*, https://um.warszawa.pl/-/stolica-pieciu-linii-metra [03.07.2024].
17. *Szczegółowe informacje o stacjach badawczych,* Państwowy Monitoring Środowiska – Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/info/552 [29.06.2024].
18. *Warszawski transport publiczny*, https://www.wtp.waw.pl/parkingi/#StrefyKissRide [13.07.2024].
19. Zegara T., Bieńkowska M., Błaszczak E., Cieciora I., Czyżkowska A., Kaźmierczak E., Kwiecień T., Kotowoda J., Pasterkowska A., Podolska J., Sońta I., Stępień G., Suchec M. (2021), *Panorama dzielnic Warszawy 2020r., Urząd Statystyczny w Warszawie,* Mazowiecki Ośrodek Badań Regionalnych.

The impact of EV implementation and the expansion of cycling infrastructure on air quality based on the experiences of the city of Warsaw

Abstract

Road transport plays a significant role in shaping the state of the natural environment, being one of the main sources of air pollution. Emissions resulting from the combustion of conventional fuels, the wear and tear of vehicle components such as brake discs and tire treads, as well as the corrosion of vehicle bodies, have a substantial impact on the quality of the air we breathe. The aim of this article is to diagnose the potential of zero-emission transport in reducing pollution and combating climate change. The presented research focuses on methods for measuring and classifying negative environmental factors and illustrates changes in their levels between 2014 and 2023. The findings highlight an unexpected increase in pollution in 2021, followed by an improvement in subsequent years. The final conclusions emphasize the necessity of intensifying efforts to promote eco-friendly transport, including the introduction of incentives and benefits for local governments, as well as support from society and policymakers.

Key words

air, pollution, measurement, zero-emission transport, Warsaw