

# Emisja metali ciężkich do powietrza z autobusów miejskich w Krakowie w latach 2010–2025<sup>1,2</sup>

**PAULINA BŹDZIUCH**

mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, e-mail: bzdziuch@agh.edu.pl

**MAREK BOGACKI**

dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, e-mail: bogacki@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Transport samochodowy jest źródłem emisji metali ciężkich do powietrza, powodując wzrost stężeń tych zanieczyszczeń w powietrzu oraz zanieczyszczanie gleb wzdłuż szlaków komunikacyjnych. Metale ciężkie emitowane są zarówno z procesu spalania paliw w silnikach samochodowych, jak również z procesu ścierania opon i hamulców. W artykule przedstawiono wyniki badań nad zmianami wielkości emisji: ołowiu (Pb), kadmu (Cd), miedzi (Cu), chromu (Cr), niklu (Ni), seleniu (Se) oraz cynku (Zn) z floty autobusów miejskich i aglomeracyjnych w Krakowie w latach 2010–2015 wraz z prognozą na lata 2017, 2020 i 2025. Obliczenia emisji dla lat 2010–2015 wykonano z uwzględnieniem rzeczywistych danych ruchowych floty autobusów miejskich dwóch operatorów, jakimi są Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne SA w Krakowie oraz firma Mobilis group Sp. z o.o. Obliczenia prognostyczne dla lat 2017–2025 uwzględniają plany operatorów w zakresie działań modernizacyjnych floty. Wyniki obliczeń ładunków rocznych emitowanych metali ciężkich przedstawiono w formie map, obrazujących rozkład emisji na obszarze gmin aglomeracji krakowskiej, jak również wzdłuż szlaków komunikacyjnych, po których poruszają się autobusy analizowanej floty.

**Słowa kluczowe:** komunikacja miejska, metale ciężkie, zanieczyszczenie powietrza, inwentaryzacja emisji.

## Wprowadzenie

Ostatnie dziesięciolecie charakteryzują się dynamicznym rozwojem sektora transportu drogowego, który będąc ważnym wskaźnikiem rozwoju gospodarczego świata, stał się jednocześnie istotnym źródłem problemów, szczególnie w dużych aglomeracjach miejskich [1]. Ze względu na fascynację samochodami osobowymi (która obecnie panuje w Polsce, a która w krajach Europy Zachodniej nastąpiła 20–30 lat temu) każdy mieszkaniec najchętniej podróżowałby swoim własnym samochodem. Następstwem zwiększonej mobilności ludzi jest wzrost negatywnego wpływu motoryzacji na środowisko, zwłaszcza na stan lokalnego powietrza oraz gleb sąsiadujących ze szlakami komunikacyjnymi. Pojazdy drogowe są źródłem emisji m.in. tlenków azotu, tlenku węgla, cząstek stałych, w tym metali ciężkich. Do tej ostatniej grupy zaliczane są: ołów (Pb), kadm (Cd), miedź (Cu), chrom (Cr), nikiel (Ni), selen (Se) oraz cynk (Zn). Metale te trafiają do powietrza wraz z gazami spalinowymi oraz w wyniku procesu ścierania opon, hamulców, nawierzchni drogi, ruchomych

części silnika, jak również korozji. Metale ciężkie stanowią też dodatek do olejów (jako środki uszlachetniające), które często przedostają się do środowiska na skutek wycieków [2–10]. Problem emisji metali ciężkich ze źródeł liniowych, jakimi są ruchliwe arterie komunikacyjne oraz ich depozycji powodującej skażenie gleb metalami ciężkimi wzdłuż dróg, najintensywniej występuje w obrębie dużych miast posiadających gęstą sieć komunikacyjną, wysoki stopień zaludnienia oraz duży udział zabudowy wysokiej utrudniającej przemieszczanie się mas powietrza. Duże natężenie ruchu pojazdów na stosunkowo małych obszarach skutkuje brakiem płynności ruchu, częstym i gwałtownym hamowaniem oraz przyspieszaniem. Prowadzi ono w konsekwencji do zwiększonej emisji spalin oraz pyłów będących produktami procesów ścierania [1, 2]. Zanieczyszczenia wydostające się z rur wydechowych pojazdów są dużo bardziej niebezpieczne dla zdrowia ludzi (ale także dla zwierząt, roślin czy budynków) niż zanieczyszczenia przemysłowe, a nawet pochodzące z palenisk domowych, ze względu na wysoki poziom ich stężeń oraz emisję występującą bezpośrednio w strefie oddychania ludzi [11]. Skład chemiczny i ilość emitowanych z pojazdu spalin zależą m.in. od rodzaju i wieku pojazdu, jego stanu technicznego oraz jakości i składu spalanego paliwa.

Wielkość emisji z pojazdów samochodowych zależy m.in. od rodzaju pojazdu. Przeciętny autobus miejski emituje relatywnie mniejszą ilość zanieczyszczeń niż samochód osobowy w odniesieniu do liczby przewożonych osób. Krakowskie autobusy miejskie, w zależności od ich typu, są w stanie przewieźć od 36 do 180 pasażerów. W związku z powyższym wzmocnienie roli transportu publicznego, poprawa jego jakości i konkurencyjności w stosunku do transportu indywidualnego oraz nadanie mu priorytetu w ruchu miejskim jest sprawą niezwykle istotną, nie tylko ze względu na zmniejszenie zatłoczenia ulic w centrum miasta, ale także ze względów środowiskowych, w tym ze względu na ograniczenie emisji do powietrza m.in. metali ciężkich.

Celem opisanych w niniejszym artykule badań była inwentaryzacja emisji metali ciężkich z floty autobusów miejskich obsługujących aglomerację krakowską oraz ocena wpływu przeprowadzonej w latach 2010–2015 modernizacji floty na wielkość emisji metali ciężkich do powietrza. Dodatkowym celem badań była analiza prognoz redukcji emisji metali ciężkich w oparciu o zaproponowane trzy scenariusze modernizacji floty krakowskich autobusów do roku 2025.

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2018. Wkład autorów w publikację: P. Bzdziuch 70%, M. Bogacki 30%.

<sup>2</sup> Artykuł powstał w wyniku badań wspartych z funduszy statutowych AGH nr 11.11.150.008 (Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska).

## Obszar i metodyka badań

Badania dotyczące inwentaryzacji emisji metali ciężkich z autobusów komunikacji miejskiej w Krakowie obejmowały flotę autobusów należących do dwóch krakowskich przewoźników tj.: Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego SA (MPK SA) w Krakowie oraz firmy Mobilis group Sp. z o.o., obsługujących główne trasy komunikacyjne miasta Kraków oraz gmin ościennych w latach 2010–2015. W roku 2015 analizowana flota obsługiwała 87 linii autobusowych miejskich (funkcjonujących wyłącznie na obszarze Krakowa) oraz około 69 linii autobusowych aglomeracyjnych (funkcjonujących na terenach gmin wchodzących w skład aglomeracji krakowskiej oraz częściowo na terenie Krakowa). Podstawą do wykonania badań były dane udostępnione przez obu krakowskich przewoźników. Obejmowały one inwentarze zawierające informacje o liczbie i strukturze aktualnej floty dla danego roku obliczeniowego, długości przejechanych przez autobusy kilometrów, ilości zużytego paliwa oraz ogólny wykaz pojazdów spełniających poszczególne normy emisji spalin. Dokładną charakterystykę zakresu modernizacji floty autobusów przedstawiono w pracach [16, 17]. Bazą do opracowania trzech możliwych scenariuszy modernizacji floty do roku 2025 (głównie dla MPK SA) były dane o stanie floty dla roku 2015.

Do oszacowania wielkości emisji metali ciężkich, takich jak: ołów (Pb), kadm (Cd), miedź (Cu), chrom (Cr), nikiel (Ni), selen (Se) oraz cynk (Zn) wykorzystano oprogramowanie COPERT 4 [18, 19]. Zaimplementowany w nim model szacowania wielkości emisji opracowany został zgodnie z europejską metodyką CORINAIR. Oprogramowanie COPERT 4 wspomaga obliczenia emisji do powietrza zanieczyszczeń pochodzących ze spalania paliwa, z parowania benzyny oraz ze ścierania opon i hamulców [20].

Obliczając emisję ze spalania oleju napędowego w autobusach, założono, że wszystkie autobusy wyjeżdżające na trasę mają rozgrzane silniki. Zgodnie z metodyką CORINAIR emisja do powietrza metali ciężkich szacowana jest na podstawie zużycia paliwa przez pojazd. W tabeli 1 przedstawiono (cytuując za COPERT 4) przyjęte do obliczeń wskaźniki zawartości metali ciężkich w paliwie.

Metale ciężkie emitowane są do atmosfery nie tylko ze spalania paliwa, ale również podczas eksploatacji opon i hamulców oraz elementów wchodzących w skład układu napędowego. Do tej części obliczeń została wykorzystana metodyka CORINAIR (rozdział dotyczący emisji pyłu ze

Tabela 1

Zawartość metali ciężkich w paliwie							
Paliwo	Pb [g/l]	Cd [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Se [mg/kg]	Zn [mg/kg]
Benzyna bezołowiowa	0,0249	0,0108	0,0418	0,0159	0,013	0,0002	2,164
Diesel	0,0435	0,0087	0,0212	0,03	0,0088	0,0001	1,738
LPG	0,0264	0,0106	0,0373	0,0093	0,0107	0	2,13
CNG	0,0245	0,0106	0,0373	0,0093	0,0107	0	2,13
Biodiesel	0,0453	0,0087	0,0212	0,03	0,0088	0,0001	1,738
Bioetanol	0,0249	0,0108	0,0418	0,0159	0,013	0,0002	2,164

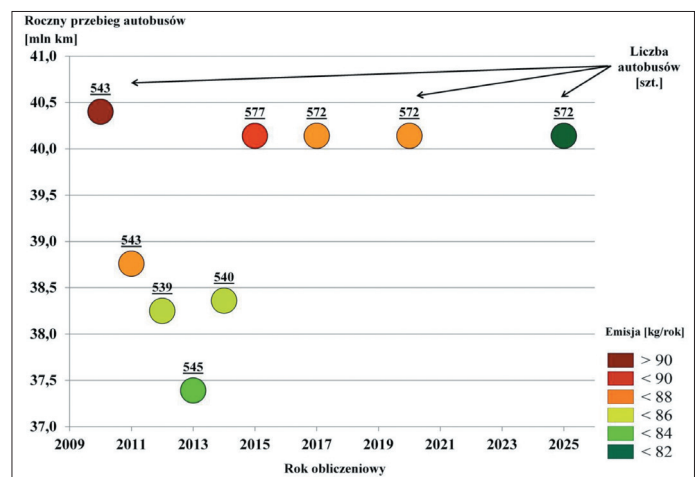
Źródło: [19, 20]

ścierania opon i hamulców) [20]. W związku z eksploatacją przez krakowskich przewoźników pojazdów zasilanych olejem napędowym emisja z parowania benzyny została pominięta.

Wykorzystując oprogramowanie COPERT 4 oraz udostępniony przez przewoźników zbiór danych ruchowych, wykonano inwentaryzację emisji do powietrza takich metali jak: Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, Se, Zn. Wyniki obliczeń, po odpowiednim ich przygotowaniu, zostały przetworzone za pomocą programu ArcGIS w celu stworzenia map rozkładu emisji rocznej analizowanych metali ciężkich na obszarze aglomeracji krakowskiej, jak również rozkładu emisji rocznej tych zanieczyszczeń wzdłuż szlaków, po których poruszają się autobusy miejskie.

## Wyniki badań emisji metali ciężkich

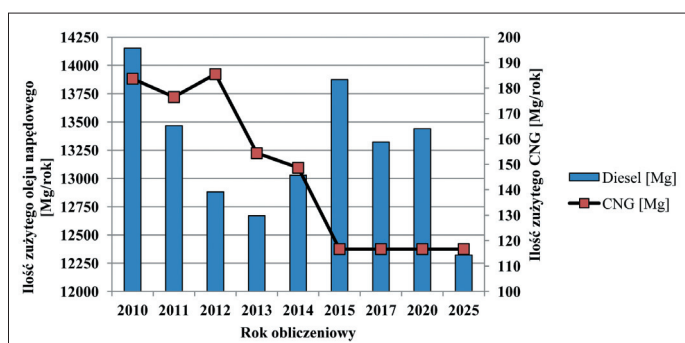
Bazując na danych obejmujących: liczbę autobusów, ich typ (midi, standard, przegubowy), spełnianą normę emisji spalin, roczny przebieg oraz ilość zużytego paliwa, wykonano obliczenia wielkości emisji poszczególnych metali ciężkich. Na rysunku 1 przedstawiono zależność sumarycznej rocznej emisji metali ciężkich od przebiegu rocznego autobusów w latach obliczeniowych 2010–2025. Ograniczenie emisji metali w latach 2010–2014 zostało osiągnięte poprzez modernizację floty autobusów MPK SA, polegającą na stopniowym wycofywaniu z użycia autobusów z silnikami spełniającymi normy emisji spalin Euro IV i niższe. Udział tej grupy autobusów spadł z 84% w 2010 roku do 60% w 2014 roku. W tym samym czasie flota autobusów Mobilis, stanowiąca zaledwie około 5% wszystkich pojazdów komunikacji miejskiej w Krakowie, nie została poddana żadnej modernizacji. Od 2015 roku 50% floty autobusów miejskich stanowiły pojazdy z silnikami spełniającymi normę emisji spalin Euro V i wyższą, w tym około 12% stanowiły autobusy firmy Mobilis (wszystkie z silnikami spełniającymi normę emisji spalin Euro VI). Zaproponowane w badaniach scenariusze modernizacji floty autobusów do roku 2025 zakładają ograniczenie emisji metali ciężkich o blisko 10 kg/rok w stosunku do roku 2015. Można to będzie osiągnąć poprzez stopniowe zastępowanie pojazdów z silnikami spełniającymi normy



Rys. 1. Wykres zależności sumarycznej emisji metali ciężkich od rocznego przebiegu autobusów w poszczególnych latach obliczeniowych

Euro IV i niższe pojazdami elektrycznymi lub spalinowymi z silnikami Euro VI. Scenariusze zakładają również, że udział autobusów spełniających normę EURO VI we flocie obsługującej krakowską komunikację miejską będzie stopniowo wzrastał z 19% w 2015 roku do około 38% w 2017, około 47% w 2020 i około 66% w 2025 roku.

Zamieszczona na rysunku 1 sumaryczna emisja metali ciężkich stanowi sumę zawartości analizowanych metali w spalonym paliwie oraz w pyłe emitowanym ze ścierania opon i hamulców. Została ona wyliczona zgodnie z wcześniej opisaną metodyką, z uwzględnieniem średniej, rocznej prędkości poruszania się autobusów po aglomeracji krakowskiej, liczby posiadanych przez autobusy osi oraz średniej liczby przewożonych przez nie pasażerów. Rysunek 2 przedstawia zużycie przez autobusy oleju napędowego oraz gazu ziemnego (CNG) w poszczególnych latach obliczeniowych.



Rys. 2. Ilość zużytego paliwa w poszczególnych latach obliczeniowych

Tabela 2 przedstawia wielkości emisji rocznej poszczególnych metali ciężkich z autobusów komunikacji miejskiej w latach 2010–2025. Wartości te zostały rozdzielone na poszczególne gminy aglomeracji krakowskiej w zależności od liczby przejeżdżanych kilometrów przez autobusy w danej gminie w danym roku obliczeniowym, a następnie zwizualizowane za pomocą oprogramowania ArcGIS (rysunki: 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17). Kolejnym etapem badań było oszacowanie wielkości emisji z każdej linii autobusowej oraz określenie obciążenia emisją metali ciężkich szlaków komunikacyjnych obsługiwanych przez krakowską komunikację miejską. Wyniki zostały przedstawione w postaci map rozkładu emisji rocznej poszczególnych metali ciężkich wzdłuż dróg (rysunki: 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18).

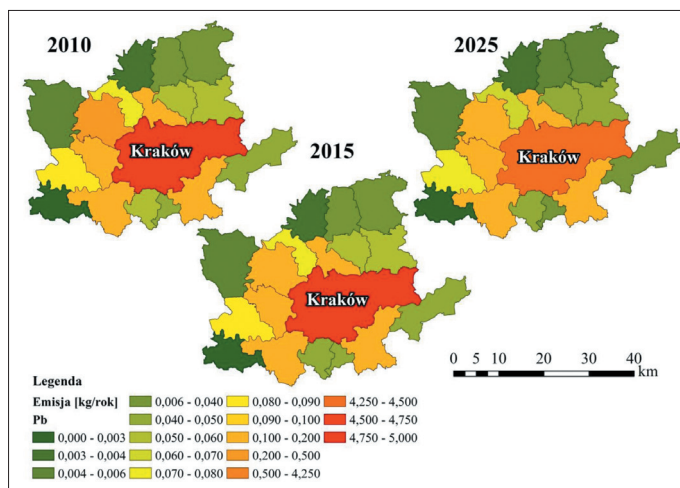
Tabela 2

Zestawienie sumarycznej emisji analizowanych metali ciężkich z floty krakowskich autobusów miejskich w latach 2010–2025									
Metal	Emisja [kg/rok]								
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2017	2020	2025
Pb	6,11	5,86	5,78	5,65	5,79	6,07	5,86	5,85	5,45
Cd	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,13
Cu	44,46	42,66	42,10	41,15	42,22	44,17	42,69	42,69	39,87
Cr	2,45	2,35	2,32	2,26	2,32	2,43	2,35	2,34	2,18
Ni	0,43	0,41	0,41	0,40	0,41	0,43	0,41	0,41	0,38
Se	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Zn	38,04	36,42	35,81	34,87	35,73	37,42	35,94	35,80	33,05
<b>SUMA</b>	<b>91,68</b>	<b>87,88</b>	<b>86,59</b>	<b>84,49</b>	<b>86,64</b>	<b>90,70</b>	<b>87,42</b>	<b>87,27</b>	<b>81,10</b>

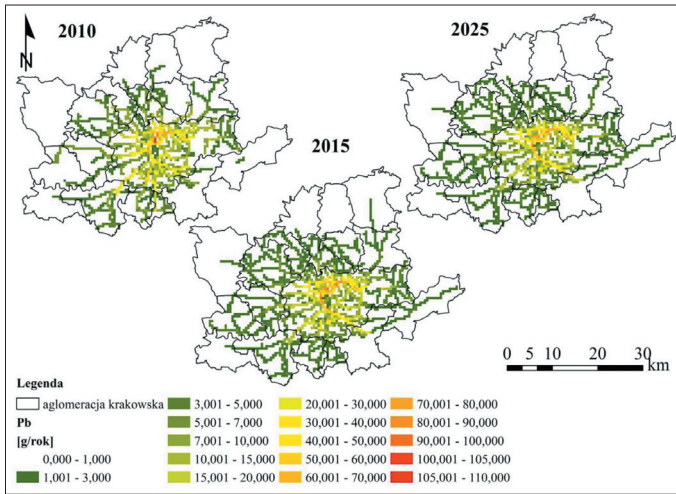
## Emisja ołowiu

Ołów jest metalem ciężkim najczęściej kojarzonym z emisją z pojazdów drogowych w związku ze stosowaniem do końca roku 2004 benzyny ołowiowej jako paliwa. Dodatek ołowiu do benzyny (w postaci czteroetylku ołowiu) był stosowany głównie jako środek przeciwstukowy, przeciwdziałający jej nieprawidłowemu spalaniu. Ołów wpływa negatywnie nie tylko na jakość powietrza i całego środowiska naturalnego, a co za tym idzie także na zdrowie i życie ludzi (wg zaleceń WHO bezpieczna dzienna dawka ołowiu dla dorosłego człowieka wynosi około 0,45 mg Pb, natomiast dla dzieci do 0,05 mg), ale również na katalityczne dopalacze spalin, przyczyniając się do ich niszczenia. Od roku 2005 stosowanie benzyny ołowiowej jest zabronione. Dopuszcza się stosowanie jedynie benzyny, która zawiera nie więcej niż 5 mg/l ołowiu (tzw. benzyna bezołowiowa). Jej wprowadzenie przyczyniło się do redukcji stężeń ołowiu w powietrzu, jednakże nie tylko spalane paliwo jest źródłem jego emisji. Ołów stosowany jest także jako dodatek m.in. w produkcji opon, okładzin hamulcowych oraz niektórych olejów silnikowych. Według badań przeprowadzonych w Danii największa emisja ołowiu pochodzi ze ścierania hamulców [4, 5, 9, 21–23].

Analizowana flota pojazdów była zasilana głównie olejem napędowym lub energią elektryczną. Pojazdy elektryczne (których było odpowiednio 5 sztuk w latach 2014–2015 oraz zakłada się, że będzie 25 sztuk w latach 2017–2020 i 71 – w 2025) uznano jako całkowicie bezemisyjne, dlatego zostały pominięte w obliczeniach (nieznacząca emisja ołowiu z tych pojazdów będzie związana ze ścieraniem opon i hamulców). Modernizacje MPK SA w latach 2010–2014 przyczyniły się do ograniczenia emisji ołowiu w Krakowie z 4,95 kg/rok do około 4,7 kg/rok. W roku 2015 wskutek wycofania z eksploatacji 21 pojazdów Euro IV firmy Mobilis i zastąpienia ich 67 pojazdami Euro VI zauważa się wzrost tej emisji do wartości około 4,9 kg/rok (rys. 3). Jednakże analizując wartości w tabeli 2, można stwierdzić, że pomimo większej liczby pojazdów sumaryczna emisja ołowiu jest niższa niż dla floty pojazdów z roku 2010. Jest to wynikiem zarówno poprawy stanu technicznego floty, jak i zmniejszonej ilości spalonego paliwa.



Rys. 3. Rozkład wielkości emisji ołowiu z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025



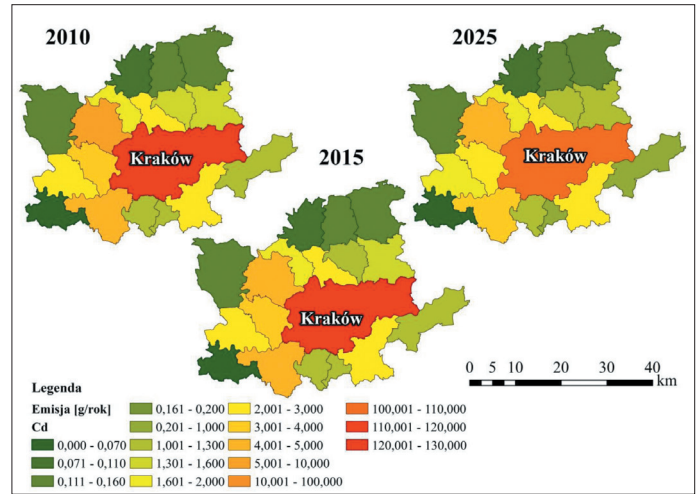
Rys. 4. Rozkład wielkości emisji ołowiu wzdłuż szlaków komunikacyjnych z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025

W kolejnych latach, dokonując modernizacji zgodnie z zaproponowanym kierunkiem, możliwe będzie zmniejszenie ilości spalanej oleju napędowego o ponad 1,8 tysiąca Mg, co spowoduje zmniejszenie emisji Pb o ponad 0,5 kg na rok. Jest to szczególnie ważne ze względu na fakt, iż do obszarów najbardziej narażonych na emisję ołowiu z autobusów miejskich należą ulice o największym natężeniu ruchu w Krakowie. Sytuację tę odzwierciedla rozkład rocznej emisji ołowiu z autobusów miejskich przedstawiony na rysunku 4. Najwyższe dawki ołowiu, jakie zostały wyemitowane w analizowanym obszarze, sięgają około 110 g/rok (okolice dworca autobusowego w Krakowie).

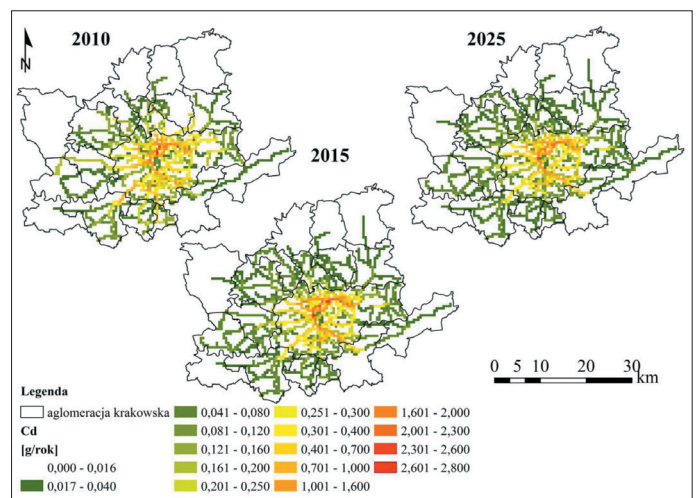
### Emisja kadmu

Kadm w wyniku antropogenicznej działalności człowieka stał się chemicznym zanieczyszczeniem środowiska naturalnego (w tym powietrza) ze względu na to, że metal ten jest naturalnie stosunkowo słabo rozpowszechniony w skorupie ziemskiej. Jest to zanieczyszczenie o tyle niebezpieczne, że nie podlega degradacji, a do organizmu człowieka przedostaje się głównie drogą oddechową. Dopuszczalna dzienna dawka kadmu dla człowieka wynosi zgodnie z zaleceniami WHO około 60–70  $\mu\text{g}$ . Kadm jest wykorzystywany m.in. do produkcji opon i hamulców, a także jako dodatek do olejów silnikowych, smarów oraz mas bitumicznych. Jego emisja do powietrza następuje także wskutek spalania oleju napędowego, a zgodnie z badaniami przeprowadzonymi w Danii największym źródłem emisji kadmu są oleje silnikowe [4, 7, 10, 23–25].

Sumaryczna roczna emisja kadmu w Krakowie z autobusów komunikacji miejskiej kształtowała się na poziomie około 124 g/rok w 2010 roku, 116 g/rok w 2014 roku, a po modernizacjach i zwiększeniu floty przez firmę Mobilis w 2015 roku wyniosła 121 g/rok. Dzięki zaproponowanym dalszym modernizacjom taboru komunikacji miejskiej możliwe jest ograniczenie emisji kadmu w 2025 roku do około 106 g/rok (rys. 5). Na rysunku 6 można zauważyć, że podobnie jak w przypadku ołowiu największa roczna emisja kadmu występuje na obszarach o największym natężeniu ruchu. Najwyższe wyemitowane przez autobusy miejskie dawki osiągnęły wartości na poziomie 2,8 g/rok.



Rys. 5. Rozkład wielkości emisji kadmu z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025



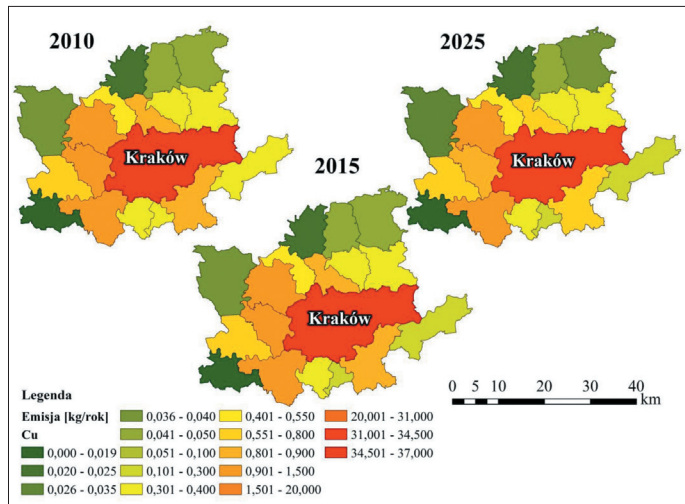
Rys. 6. Rozkład wielkości emisji kadmu wzdłuż szlaków komunikacyjnych z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025

### Emisja miedzi

Miedź stanowi jeden z komponentów ulepszczonego oleju napędowego, używana jest w produkcji opon i okładzin hamulcowych. Jest także głównym składnikiem rur w układzie chłodzenia silnika, klimatyzacji czy systemów wspomagania. Miedź znajduje się również w olejach silnikowych, smarach czy asfalcie. Jednakże badania wskazują, iż największa emisja miedzi do środowiska następuje podczas ścierania okładzin hamulcowych [4, 5, 7, 10, 23].

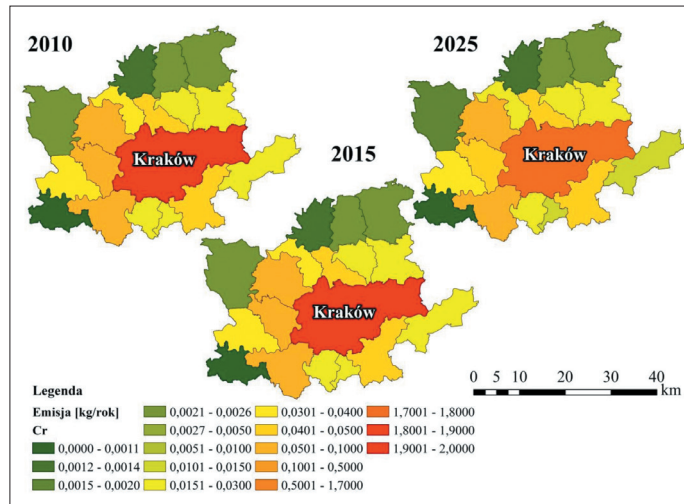
W Krakowie emisja miedzi kształtowała się na poziomie około 36 kg/rok w 2010 roku, około 34,2 kg/rok w 2014 roku, natomiast po modernizacji i zwiększeniu floty Mobilis w połowie 2014 roku, emisja Cu w 2015 roku wyniosła około 35,8 kg/rok. Przeprowadzenie dalszych modernizacji zgodnie z przyjętymi scenariuszami spowoduje ograniczenie emisji Cu w 2025 roku do wartości 32,3 kg/rok (rys. 7). Mapy rozkładu emisji miedzi wokół szlaków komunikacyjnych, po których poruszają się krakowskie autobusy (rys. 8), wskazują, że największa wartość emisji wynosząca około 0,8 kg/rok wystąpi głównie w obrębie Alei Trzech Wieszców. W związku z tym, że emisja miedzi związana jest przede wszystkim ze ścieraniem hamulców to

wzrasta ona wraz ze wzrostem liczby eksploatowanych pojazdów przez komunikację zbiorową (rok 2015). W latach kolejnych (2017–2025) zauważa się minimalny spadek emisji Cu, jednakże jest to związane z nieuwzględnieniem w obliczeniach pojazdów elektrycznych, które również wyposażone są w klocki hamulcowe, ulegające ścieraniu podczas eksploatacji.

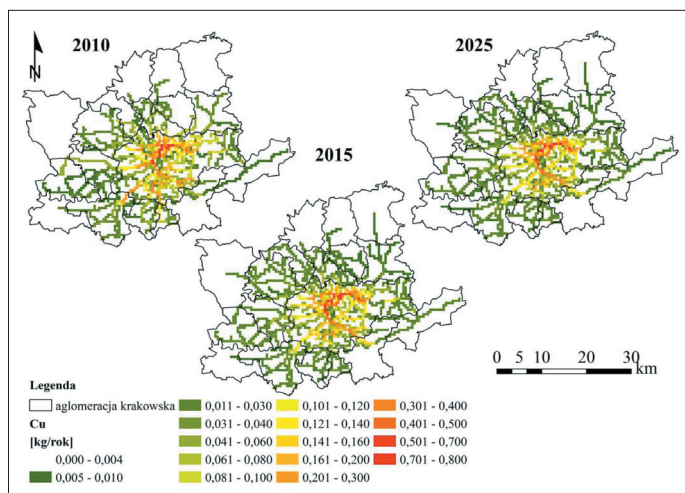


Rys. 7. Rozkład wielkości emisji miedzi z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025

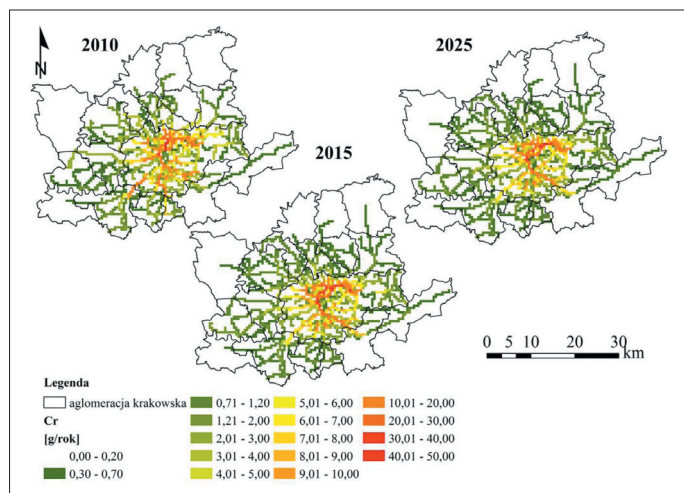
tego metalu na obszarze Krakowa wynosiła około 2 kg/rok w 2010 oraz 2015 roku (wskutek zwiększenia liczebności floty). Przeprowadzając zaproponowane modernizacje, do roku 2025 będzie można ograniczyć tą emisję do około 1,75 kg/rok. W obliczeniach nie została uwzględniona emisja chromu ze ścierania hamulców przez pojazdy elektryczne.



Rys. 9. Rozkład wielkości emisji chromu z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025



Rys. 8. Rozkład wielkości emisji miedzi wzdłuż szlaków komunikacyjnych z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025



Rys. 10. Rozkład wielkości emisji chromu wzdłuż szlaków komunikacyjnych z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025

### Emisja chromu

Chrom jest kolejnym metalem ciężkim emitowanym do powietrza z sektora transportu drogowego. Stosowany jest, jak większość analizowanych w pracy metali, jako dodatek do produkcji opon, w układzie hamulcowym czy olejach silnikowych. Duńskie badania wskazują, że największa emisja chromu występuje wskutek ścierania hamulców, a następnie z olejów silnikowych i spalania paliwa [4, 8, 10].

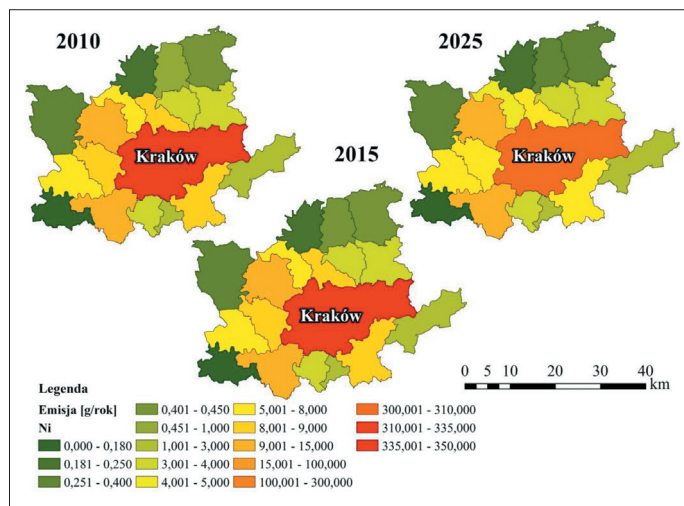
Najwyższa, powodowana przez krakowską komunikację miejską wartość emisji chromu wynosi około 50 g/rok i występuje w obrębie dworca autobusowego oraz niektórych fragmentów Alei Trzech Wieszców (rys. 10). Natomiast, jak przedstawiono na rysunku 9, sumaryczna emisja

### Emisja niklu

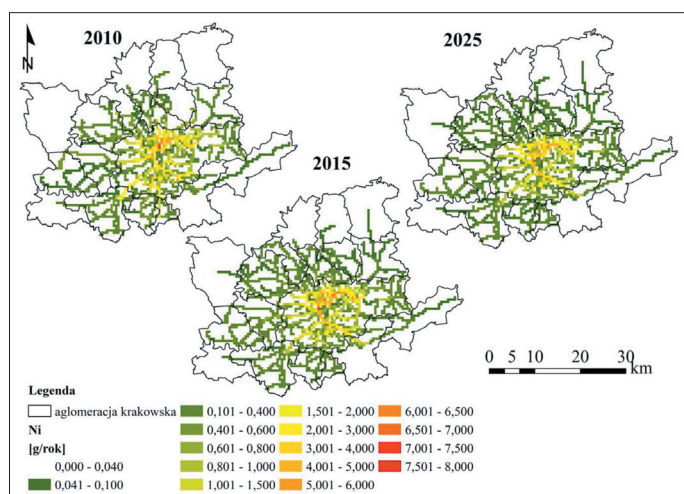
Metal ten jest komponentem różnych metalizowanych części samochodowych, a także opon, hamulców i masy bitumicznej. W niektórych przypadkach stanowi także domieszkę w konstrukcji reaktorów katalitycznych, które w głównej mierze zawierają platynę, rod i pallad. W większości badań przyjmuje się, że głównym źródłem emisji niklu jest spalanie oleju napędowego, jednakże badania przeprowadzone w Danii wskazują na to, że najwyższa jego emisja pochodzi ze ścierania hamulców [4, 10, 26].

W aglomeracji krakowskiej sumaryczna emisja niklu z autobusów miejskich kształtowała się na poziomie 0,40–0,43 kg/rok w latach 2010–2015, z czego około 80%

zostało wyemitowane w mieście Kraków (rys. 11). Wskutek przeprowadzenia dalszych modernizacji taboru do roku 2025 będzie możliwe ograniczenie emisji chromu do poziomu 0,38 kg/rok (tabela 2). Jak wynika z rysunku 12 najwyższa wyemitowana z komunikacji miejskiej wartość emisji niklu wyniosła około 0,8 g/rok i nastąpiło to w okolicach dworca autobusowego w Krakowie.



Rys. 11. Rozkład wielkości emisji niklu z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025

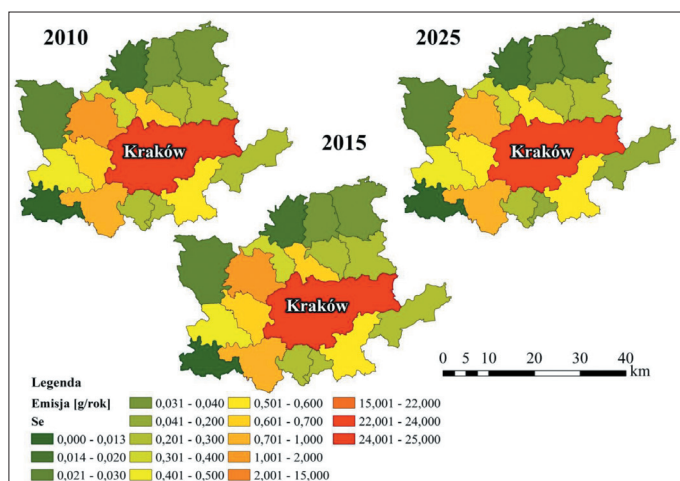


Rys. 12. Rozkład wielkości emisji niklu wzdłuż szlaków komunikacyjnych z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025

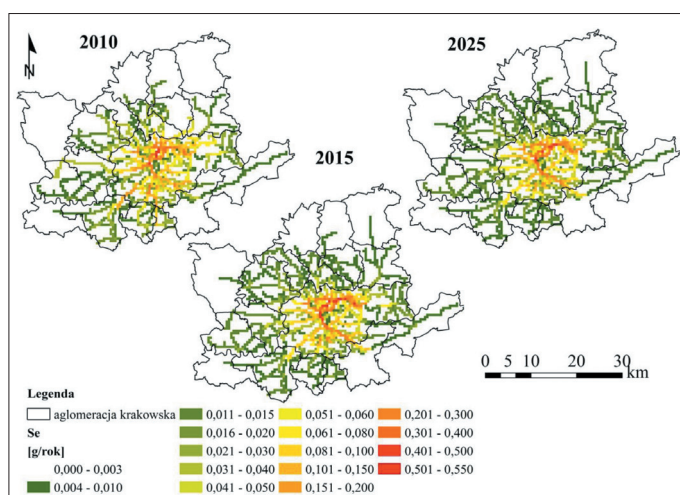
## Emisja selenu

Selen jest składnikiem spalanych paliw oraz komponentem opon oraz okładzin hamulcowych. Według badań przeprowadzanych w Danii największa jego emisja selenu w sektorze transportu drogowego pochodzi ze ścierania opon [6, 10, 27].

Sumaryczna emisja selenu w Krakowie z autobusów miejskich kształtowała się w latach 2010–2015 na poziomie około 24–25 g/rok. Prowadzenie dalszych modernizacji taboru może wpłynąć na zmniejszenie tej emisji do około 23 g/rok w 2025 roku (rys. 13). Najwyższa roczna emisja selenu wynosząca około 0,55 g/rok występuje w rejonie Alei Trzech Wieszczów i dworca autobusowego w Krakowie (rys. 14).



Rys. 13. Rozkład wielkości emisji selenu z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025

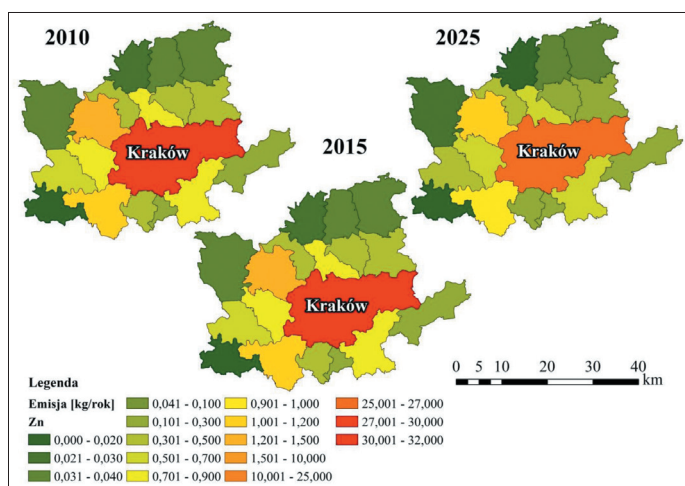


Rys. 14. Rozkład wielkości emisji selenu wzdłuż szlaków komunikacyjnych z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025

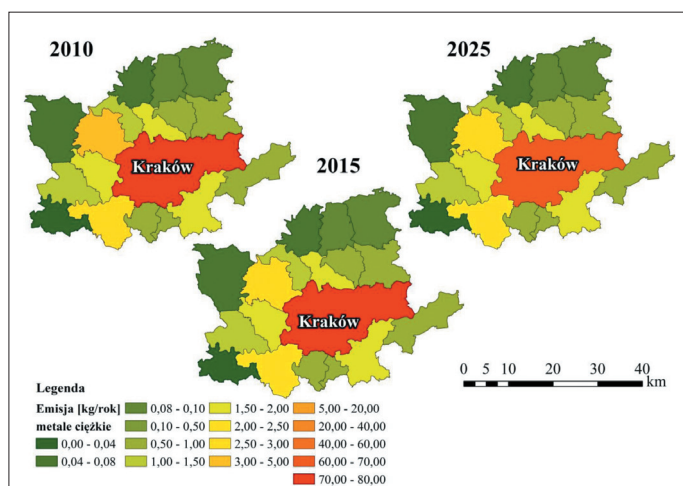
## Emisja cynku

Wielkość emisji cynku związana jest ze spalaniem oleju napędowego, który zawiera znaczne ilości tego metalu, jednakże wchodzi on również w skład opon, okładzin hamulcowych, smarów, olejów silnikowych, a także mas bitumicznych. Badania przeprowadzone w Danii wskazują, iż największym źródłem emisji cynku w transporcie drogowym jest ścieranie opon i hamulców, jak również ścieranie nawierzchni drogi [4, 10].

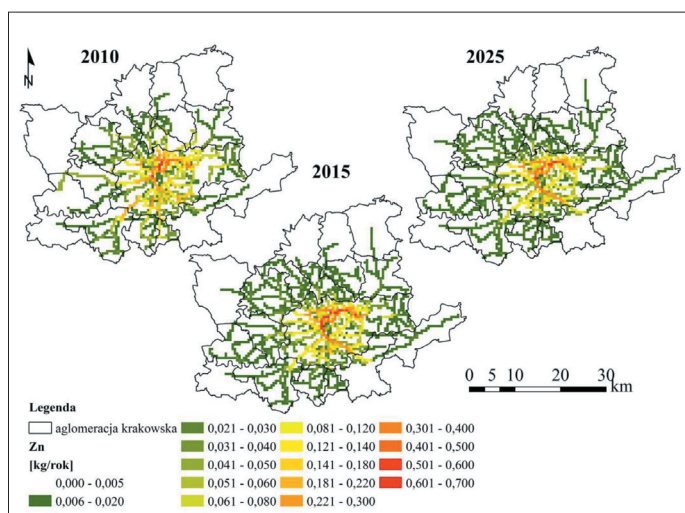
Inwentaryzowane autobusy miejskie charakteryzowały się sumaryczną emisją cynku w latach 2010–2015 na obszarze Krakowa na poziomie 27–32 kg/rok. Z kolei najwyższa obszarowa emisja tego metalu wyniosła około 0,7 kg/rok. Zauważa się, że wraz ze wzrostem liczebności pojazdów w 2015 roku, wzrosła również emisja cynku na terenie najbardziej obciążonej ruchem autobusowym Alei Trzech Wieszczów (rys. 16). Prowadzone w dalszym ciągu modernizacje mogą przyczynić się do zmniejszenia emisji tego zanieczyszczenia do wartości około 25 kg/rok w 2025 roku (rys. 15). Wyniki te są jednak obarczone błędem związanym z nieuwzględnieniem w obliczeniach emisji ze ścierania opon i hamulców w pojazdach elektrycznych.



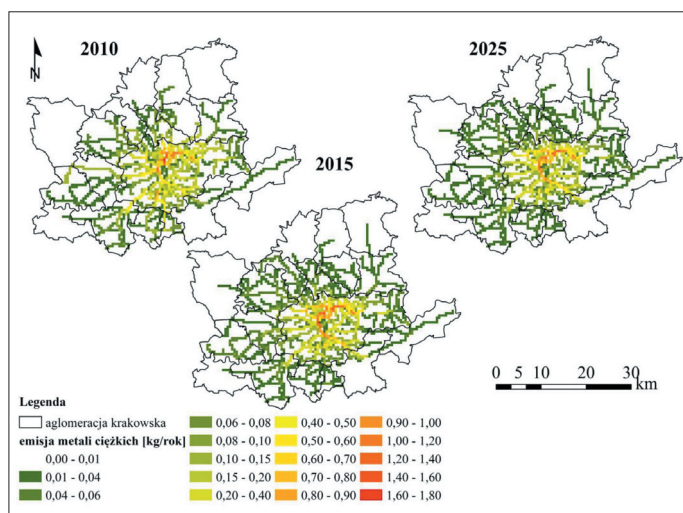
Rys. 15. Rozkład wielkości emisji cynku z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025



Rys. 17. Sumaryczny rozkład wielkości emisji metali ciężkich z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025



Rys. 16. Rozkład wielkości emisji cynku wzdłuż szlaków komunikacyjnych z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025



Rys. 18. Sumaryczny rozkład wielkości emisji metali ciężkich wzdłuż szlaków komunikacyjnych z komunikacji miejskiej na terenie aglomeracji krakowskiej w latach 2010, 2015 i 2025

### Sumaryczna emisja metali ciężkich

Na rysunku 17 zwizualizowano przedstawione w tabeli 2 wartości sumarycznej emisji analizowanych metali ciężkich, powodowanej przez krakowskie autobusy, z rozdziałem na poszczególne gminy aglomeracji krakowskiej. Na przestrzeni lat 2010–2014 emisja metali ciężkich malała wraz z zaawansowaniem prowadzonych modernizacji, natomiast w roku 2015 w skutek rozbudowania floty pojazdów o 67 nowych autobusów zasilających wyłącznie linie miejskie nastąpił ponowny jej wzrost, przede wszystkim w najbardziej ruchliwym rejonie Krakowa (rys. 18). Miejscowa roczna emisja metali ciężkich na tych obszarach osiągała wartości od 0,8–1,8 kg/rok. Prowadzenie dalszych modernizacji taboru autobusów przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne SA w Krakowie, ukierunkowanych na całkowite odnowienie floty pojazdów spalinowych oraz zastąpienia części z nich pojazdami elektrycznymi (zgodnie z założeniami przyjętymi w badaniach), będzie skutkowało dalszymi redukcjami emisji zanieczyszczeń komunikacyjnych, w tym także metali ciężkich nawet o 10 kg/rok do roku 2025.

### Podsumowanie

Emisja metali ciężkich z transportu drogowego oraz określenie jej wielkości jest niezwykle istotnym problemem, gdyż powoduje ona zanieczyszczenie nie tylko powietrza w strefie oddychania ludzi, ale również gleb znajdujących się w pobliżu ruchliwych szlaków komunikacyjnych. Z kolei depozycja i przechodzenie metali w głębsze strefy gleby powoduje najczęściej jej długoletnie skażenie, gdyż większość z analizowanych w pracy zanieczyszczeń nie ulega degradacji lub jest ona długotrwała. Opracowane w pracy mapy rozkładu wielkości emisji poszczególnych metali ciężkich oraz rozkładu sumarycznej wielkości emisji metali ciężkich w obrębie tras komunikacyjnych obsługiwanych przez flotę krakowskich autobusów miejskich pozwoliły na ocenę obszarów najbardziej narażonych na tę emisję. Obszarami tymi są najruchliwsze ulice Krakowa, czyli Aleje Trzech Wieszców oraz obszar dworca autobusowego, w obrębie których najwyższe wartości emisji poszczególnych metali ciężkich osiągnęły: Cu (800 g/rok), Zn (700 g/rok), Pb (110 g/rok), Cr (50 g/rok), Ni (8 g/rok), Cd (2,8 g/rok), Se (0,55 g/rok). Sumaryczna emisja wszystkich

analizowanych w badaniach metali ciężkich z krakowskich autobusów miejskich w roku 2010 w rejonie dworca autobusowego osiągnęła wartość około 1,8 kg/rok, a wskutek przeprowadzonych działań modernizacyjnych udało się ją zmniejszyć w 2015 roku nawet o 0,6 kg/rok. Obszar Alei Trzech Wieszców charakteryzował się wzrostem miejscowej sumarycznej emisji metali ciężkich z ok. 0,7 kg/rok w 2010 roku do nawet 1,4 kg/rok w 2015. Sytuacja ta jest wynikiem prowadzonej na przestrzeni lat 2010–2015 maksymalizacji transportu zbiorowego polegającej na zwiększeniu częstotliwości kursowania pojazdów w tym rejonie (wzrost liczebności floty). Przeprowadzane i planowane modernizacje floty autobusów miejskich wpływały i będą w przyszłości wpływać na zmniejszenie emisji metali do powietrza, głównie pochodzących z procesu spalania paliwa. W przypadku emisji metali z procesu ścierania opon bądź hamulców nie jest możliwe jej znaczne ograniczenie nawet w przypadku całkowitej wymiany floty autobusów na bardziej niskoemisyjną. Związane jest to z używaniem do produkcji opon i tarcz ciernych komponentów zawierających analizowane metale ciężkie. Przełom w tym zakresie może zostać osiągnięty tylko w przypadku znaczącego ograniczenia stosowania przedmiotowych metali w technologii produkcji tych najczęściej zużywanych elementów eksploatacyjnych pojazdów.

## Literatura

- Badyda A.J., *Zagrożenia środowiskowe ze strony transportu*, Wydawnictwo Nauka, 2010, vol. 4, Dostęp: [http://www.pan.poznan.pl/nauki/N\\_410\\_15\\_Badyda.pdf](http://www.pan.poznan.pl/nauki/N_410_15_Badyda.pdf)
- Plak A., Bartmiński P., Dębicki R., *Wpływ transportu publicznego na zawartość wybranych metali ciężkich w glebach sąsiadujących z ulicami Lublina*, w: Proceedings of ECOpole, 2010.
- Ociepa-Kubicka A., Ociepa E., *Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi*, „Inżynieria i Ochrona Środowiska”, 2012, vol. 15.
- Kwapuliński J., Bebek M., Mitko K., Fischer A., Wiechuła D., *Analiza oddziaływania stacji paliw na stopień zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi*, „Problemy Ekologii”, 2007, vol. 11.
- Muschack W., *Pollution of Street Run-Off by Traffic and Local Conditions*, „Science of Total Environment”, 1990, vol. 93.
- Dmochowski D., Dmochowska A., *Ocena zagrożeń związanych z emisją metali ciężkich z tras komunikacyjnych w aspekcie bezpieczeństwa ekologicznego na terenach o wysokim stopniu zurbanizowania*, „Zeszyty Naukowe SGSP”, 2011, vol. 41.
- Achadu O.J., Goler E.E., Ayejuyo O.O., Olaoye O.O., Ochimana O.I., *Assessment of heavy metals (Pb, Cd, Zn and Cu) concentrations in soils along a major highway in Wukari, North-Eastern Nigeria*, „Journal of Biodiversity Environmental Sciences”, 2015, vol. 6.
- Kummer U., Pacyna J., Pacyna E., Friedrich R., *Assessment of heavy metal releases from the use phase of road transport in Europe*, „Atmospheric Environment”, 2009, vol. 43. Dostęp: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.007>
- Denier van der Gon H., Appelman W., *Lead emissions from road transport in Europe: A revision of current estimates using various estimation methodologies*, „Science of Total Environment”, 2009, vol. 407. Dostęp: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.027>
- Winther M., Slentø E., *Heavy Metal Emissions for Danish Road Transport*, National Environmental Research Institute, Aarhus University, 2010. Dostęp: <http://www.dmu.dk/Pub/FR780.pdf>.
- Walendzik M., Łepkowski M., Nowacki G., *Wpływ transportu drogowego na środowisko naturalne człowieka i zagrożenia występujące w transporcie drogowym rzeczy*, „Bezpieczeństwo i Ekologia”, 2016, vol. 6.
- Karpiesiuk Ł., Lisiewska K., *Automotive Industry – Yearbook 2016*, Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego, 2016. Dostęp: [www.pzpm.org.pl](http://www.pzpm.org.pl)
- Portal Zarządu Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie. Dostęp: <http://zikit.krakow.pl/>
- Bździuch P., Zemelka A., Kozieł K., Żołyński J., Bączek E., Rososińska B., Oleniacz R., Bogacki M., *Przykład wykorzystania próbników pasywnych do oceny przestrzennego różnicowania stężeń zanieczyszczeń w powietrzu miejskim*, w: V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna – INFRAEKO 2016 Nowoczesne Miasta, Infrastruktura i Środowisko, 2016.
- Bogacki M., Oleniacz R., Szulecka A., *Ocena ekspozycji budynku wielorodzinnego na wpływ emisji benzenu ze stacji paliw oraz transportu drogowego w okresie letnim*, Ochrona Powietrza Atmosferycznego. Wybrane zagadnienia, 2015.
- Bździuch P., Bogacki M., *Autobusowy transport publiczny w Krakowie na tle najlepszych światowych systemów komunikacji miejskiej oraz ocena wpływu jego modernizacji na wielkość emisji zanieczyszczeń*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2017, nr 4.
- Bździuch P., Bogacki M., *Evaluating the influence of modernization of the urban bus fleet in Krakow in the years 2010–2015 on the amount of pollutants emitted into the air*, „Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych”, 2017, vol. 28 (2).
- EMISIA mission for environment, Dostęp: <http://emisiamission.com/products/copert>
- Gkatzofilias D., Kouridis Ch., Mellios G., Ntziachristos L., Samaras Z., *COPERT 4 Computer programme to calculate emission from road transport*, 2012.
- Ntziachristos L., Samaras Z., Kouridis C., Samaras C., Hassel D., Mellios G., *EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013*, Update July 2014, CORINAIR, 2013. Dostęp: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/>
- Orlen Laboratorium. Dostęp: <http://www.ornlaboratorium.pl/PL/>
- Rozporządzenie ministra gospodarki w dnia 9 października 2015 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw ciekłych, Dziennik Ustaw, poz. 1680, Warszawa 2015.
- Piontek M., Fiedyszak Z., Łuszczynska K., Lechów H., *Toksyczność miedzi, cynku oraz kadmu, rtęci i ołowiu dla człowieka, kregowców i organizmów wodnych*, „Inżynieria Środowiska”, 2014, vol. 155 (35).
- Czeczot H., Majewska M., *Kadm – zagrożenie i skutki zdrowotne*, „Toksykologia”, 2010, vol. 66(4). Dostęp: [http://ptfarm.pl/pub/File/Farmacja Polska/2010/04-2010/02\\_Kadm.pdf](http://ptfarm.pl/pub/File/Farmacja%20Polska/2010/04-2010/02_Kadm.pdf)
- Trojanowska M., *Inhalacyjne narażenie środowiskowe mieszkańców miast Polski na metale ciężkie kadm i nikiel oraz arsen*, 2012, vol. 15(2).
- Czora M., Gambuś F., *Automobile exhaust catalysts and their impact on the environment*, „Mechanics. Technical Transactions”, 2012, vol. 26 (26).
- Dmochowski D., Prędecka A., Mazurek M., Pawlak A., *Ocena zagrożeń związanych z emisją metali ciężkich w aspekcie bezpieczeństwa ekologicznego na przykładzie ogródków działkowych w aglomeracji miejskiej*, „Polski Przegląd Medycyny i Psychologii Lotniczej”, 2011, vol. 17 (3).