WRZESIEŃ 2020

Teledetekcja emisji spalin z pojazdów silnikowych w Krakowie

Autorzy: Yoann Bernard, Uwe Tietge, Izabela Pniewska

PODZIĘKOWANIA

Autorzy dziękują partnerom konsorcjum CONOX oraz inicjatywie TRUE za dostarczenie zbiorów danych z miast europejskich, które wykorzystano w niniejszym raporcie jako punkt odniesienia dla porównania z pomiarami wykonanymi w Krakowie.

Badanie to zostało zlecone przez Zarząd Transportu Publicznego w Krakowie.

International Council on Clean Transportation
1500 K Street NW Suite 650
Waszyngton DC 20005 USA

communications@theicct.org | www.theicct.org | @TheICCT

© 2020 International Council on Clean Transportation

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE **1**

METODYKA **3**

ŹRÓDŁA DANYCH 3

PRZYGOTOWANIE DANYCH 4

PRZEGLĄD PRÓBEK 5

ANALIZA I WYNIKI **8**

EMISJE TLENKÓW AZOTU PRZEZ POJAZDY DOSTAWCZE 8

EMISJA TLENKU WĘGLA PRZEZ POJAZDY DOSTAWCZE 13

EMISJA CZĄSTEK STAŁYCH PRZEZ POJAZDY DOSTAWCZE 14

STUDIUM PRZYPADKU: TAKSÓWKI 17

STUDIUM PRZYPADKU: AUTOBUSY 19

STUDIUM PRZYPADKU: SAMOCHODY OSOBOWE Z SILNIKAMI DIESLA Z WYSOKIM POMIAREM PM 22

WNIOSKI **24**

WPROWADZENIE

Cząstki stałe w powietrzu ($PM_{2,5}$), ozon (O_3) i dwutlenek azotu (NO_2) były odpowiedzialne za ponad 45 tys. przedwczesnych zgonów w Polsce w 2016 roku[1], a ludzie w Polsce są bardziej narażeni na śmierć z powodu zanieczyszczenia powietrza niż przeciętny mieszkaniec[2] Unii Europejskiej (UE). Problem ten jest szczególnie powszechny w polskich miastach, które regularnie naruszają unijne limity jakości powietrza. Spośród 50 miast w Unii Europejskiej (UE) o najwyższych wskaźnikach zanieczyszczenia powietrza, 36 znajduje się w Polsce[3].

Transport drogowy w Polsce jest drugim co do wielkości źródłem zanieczyszczenia powietrza i jednym z największych źródeł tlenków azotu (NO_x). Wśród innych czynników przyczyniających się do tego stanu rzeczy, podobnie jak w wielu krajach UE, Polska posiada wysoki udział pojazdów napędzanych silnikami Diesla, o których wiadomo, że przekraczają limity certyfikacyjne laboratorium emisji NO_x podczas rzeczywistej jazdy. Ponadto, Polska posiada jedną z najstarszych flot samochodowych w UE, ze średnią wieku 14 lat dla samochodów osobowych w 2018 r., w porównaniu do średniej unijnej wynoszącej 11 lat[4]. Starsze pojazdy zostały zaprojektowane pod kątem mniej rygorystycznych limitów emisji niż ich nowoczesne odpowiedniki i są one bardziej narażone na zużycie się ich systemów kontroli emisji.

Aby rozwiązać problem zanieczyszczenia powietrza przez transport drogowy, Polska przyjęła w styczniu 2018 r. ustawę o elektromobilności i paliwach alternatywnych. Ustawa ta zawiera środki mające na celu pobudzenie rynku pojazdów elektrycznych, takie jak zezwolenie miastom na tworzenie „stref czystego transportu". Na podstawie tego rozporządzenia, Miasto Kraków ustanowiło pierwszą pilotażową strefę czystego transportu w kraju. Została ona wprowadzona na dziewięć miesięcy począwszy od stycznia 2019 roku. Dostęp do strefy ograniczono do pojazdów zasilanymi elektrycznie, ogniwami paliwowymi (FCV) i sprężonym gazem ziemnym (CNG), ale zezwolono na wyjątki dla mieszkańców. Miasto Kraków rozważa obecnie nową politykę ograniczania emisji zanieczyszczeń z pojazdów, w tym utworzenie nowej strefy niskiej emisji.

Opracowanie to wpisuje się w szerszy plan miasta Krakowa mający na celu rozwiązanie problemu emisji związanych z ruchem drogowym oraz zidentyfikowanie najistotniejszych czynników wpływających na zmniejszenie emisji. Władze miasta zleciły przeprowadzenie kampanii testowej w czerwcu 2019 r. w celu lepszego zrozumienia rzeczywistego wpływu emisji z pojazdów silnikowych na jakość powietrza. Do pomiaru rzeczywistej emisji NO_x, tlenku węgla i cząstek stałych przez około 100 000 pojazdów użyto urządzeń teledetekcyjnych. Pomiarów dokonano za pomocą spektroskopii, która może mierzyć emisje zdalnie, gdy pojazdy przejeżdżają obok urządzeń. Ta nieinwazyjna metoda pomiaru rzeczywistej emisji zanieczyszczeń może uchwycić obraz smugi spalin z tysięcy pojazdów w ciągu jednego dnia, co czyni ją szczególnie skuteczną w monitorowaniu dużej części floty pojazdów. Po zestawieniu wyników można uzyskać dokładny obraz danej grupy pojazdów w różnych warunkach eksploatacji.

Miasto Kraków zleciło sporządzenie tego raportu w celu przedstawienia analizy rzeczywistych danych dotyczących emisji zanieczyszczeń przez swoją flotę pojazdów. Dokument zawiera przegląd składu floty pojazdów w Krakowie oraz porównanie pomiarów emisji pochodzących z teledetekcji w Krakowie z pomiarami przeprowadzonymi w innych miastach europejskich w ciągu ostatniej dekady na podstawie bazy danych CONOX[5] oraz pomiarów

[1] Europejska Agencja Środowiska, "Air Quality in Europe 2019", sprawozdanie EEA nr 10/2019, (październik 2019 r.), https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019.

[2] Europejska Agencja Środowiska, "Poland - Air Pollution Country Fact Sheet 2019", dostęp: 17 czerwca 2020 r, https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/2019-country-fact-sheets/poland.

[3] Grupa Banku Światowego, "Air Quality in Poland, What Are the Issues and What Can Be Done?" Policy research working paper 144191, (2019), http://documents1.worldbank.org/curated/en/426051575639438457/pdf/Air-Quality-in-Poland-What-are-the-Issues-and-What-can-be-Done.pdf.

[4] ACEA, "ACEA Report: Vehicles in Use - Europe 2019," (2019), https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2019.pdf.

[5] W 2016 r. Bundesamt für Umwelt (Szwajcarski Federalny Urząd ds. Środowiska) sfinansował projekt CONOX mający na celu gromadzenie europejskich danych pochodzących z teledetekcji. Dane z poszczególnych kampanii dotyczących teledetekcji w latach 2011-2017 we Francji, Hiszpanii, Szwecji, Szwajcarii i Wielkiej Brytanii zostały zebrane i ujednolicone w jednej bazie danych.

zebranych przez The Real Urban Emissions Initiative w Londynie[6] i Paryżu[7]. W szczególności, różnica w emisji NO_x z samochodów osobowych z silnikami Diesla jest badana przez normę emisji w zależności od warunków dynamicznych pojazdu i temperatury otoczenia. Dodatkowe analizy w niniejszym raporcie badają udział całkowitej emisji NO_x z samochodów osobowych w Krakowie według normy emisji spalin pojazdu i rodzaju paliwa. Dwa studia przypadków dotyczą emisji z krakowskich taksówek i autobusów oraz emisji cząstek stałych z samochodów osobowych z silnikami Diesla, koncentrując się na dowodach ingerencji lub wadliwego działania filtrów cząstek stałych. Badanie kończy się sugestiami dotyczącymi polityki i zaleceniami dotyczącymi badań.

[6] Tim Dallmann, Yoann Bernard, Uwe Tietge, and Rachel Muncrief, *Remote Sensing of Motor Vehicle Emissions in London*, (ICCT: Waszyngton, D.C., 2018), https://theicct.org/publications/true-london-dec2018.

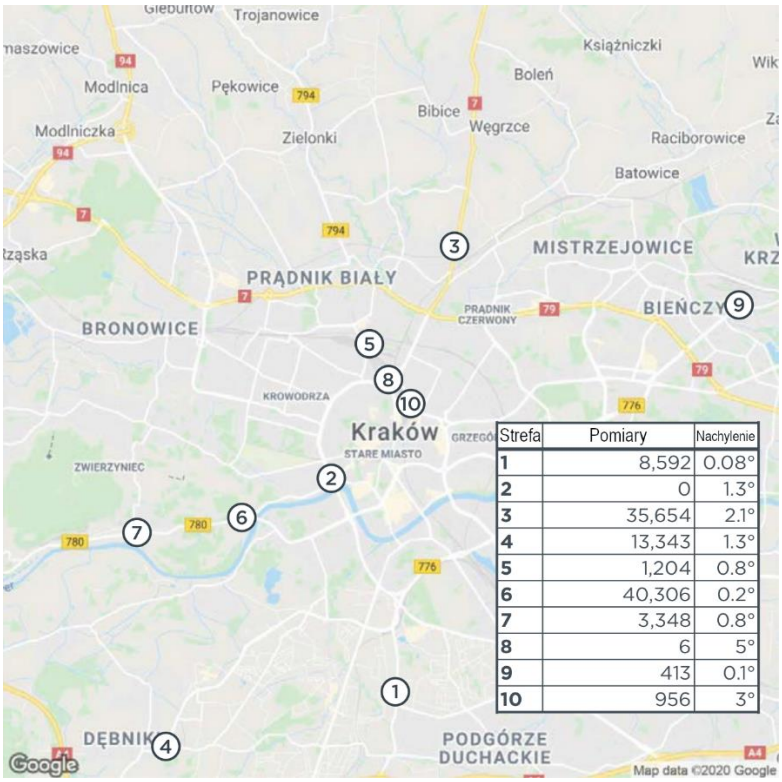
[7] Tim Dallmann, Yoann Bernard, Uwe Tietge, and Rachel Muncrief, *Remote Sensing of Motor Vehicle Emissions in Paris*, (ICCT: Waszyngton, D.C., 2019), https://theicct.org/publications/on-road-emissions-paris-201909.

METODYKA

ŹRÓDŁA DANYCH

Teledetekcja jest nieinwazyjną metodą pomiaru emisji zanieczyszczeń z pojazdów w czasie rzeczywistym, w ruchu drogowym[8]. Obraz zawartości smugi spalin i warunków jazdy, w tym prędkości i przyspieszenia pojazdu, jest zbierany z przejeżdżających pojazdów w miejscach pobierania próbek. Rejestrowane są również warunki otoczenia, takie jak temperatura oraz wykonywane są zdjęcia tablicy rejestracyjnej w celu pobrania z rejestrów pojazdów danych technicznych pojazdu[9].

Pomiary teledetekcyjne były zbierane w okresie 17 dni od 10 czerwca do 1 lipca 2019 r. W sumie zebrano 103 827 pomiarów za pomocą urządzenia teledetekcyjnego Opus RSD5000. Szczegóły dotyczące kampanii zostały przedstawione w anglojęzycznym raporcie Opus RSE[10], a polskie streszczenie jest dostępne w Zarządzie Transportu Publicznego w Krakowie[11]. Rysunek 1 przedstawia lokalizację dziesięciu miejsc poboru próbek oraz liczbę pomiarów zebranych w każdym z nich.



Strefa	Pomiary	Nachylenie
1	8,592	0.08°
2	0	1.3°
3	35,654	2.1°
4	13,343	1.3°
5	1,204	0.8°
6	40,306	0.2°
7	3,348	0.8°
8	6	5°
9	413	0.1°
10	956	3°

Rys. 1. Mapa punktów pomiarowych metodą teledetekcji w Krakowie

Dla potrzeb tej analizy, pomiary w Krakowie są porównywane z europejskimi pomiarami teledetekcyjnymi z bazy danych CONOX. Baza danych, finansowana przez Szwajcarski Federalny Urząd ds. Środowiska, zawiera dane

[8] Jens Borken-Kleefeld and Tim Dallmann, *Remote Sensing of Motor Vehicle Exhaust Emissions*, (ICCT: Waszyngton, D.C., 2018), https://theicct.org/publications/vehicle-emission-remote-sensing.

[9] W europejskich kampaniach teledetekcyjnych numery rejestracyjne są usuwane z danych, gdy tylko proces ten zostanie zakończony. Informacje o właścicielach lub kierowcach pojazdów nie są pobierane, a wszelkie dane, które mogą być uznane za dane osobowe, są anonimowe, zgodnie z ogólnym rozporządzeniem o ochronie danych osobowych.

[10] Opus RSE, "Characterization of Real-World Motor Vehicle Emissions in Krakow" (maj 2020), https://www.opusrse.com/projects/public-administrations-1/krakow/.

[11] "Innovative Exhaust Gas Research in Krakow," dostęp: 10 czerwca, 2020, http://mobilnykrakow.pl/wp-content/uploads/2019/12/Badania-spalin-Krakow_final.pdf.

zebrane we Francji, Hiszpanii, Szwecji, Szwajcarii i Wielkiej Brytanii[12]. Najnowszą bazę danych uzupełniliśmy o dane z kampanii teledetekcyjnej w Paryżu przeprowadzonej w połowie 2018 roku[13]. Proszę zauważyć, że w całym raporcie elementy wykresu w kolorze niebieskim stosuje się dla Krakowa, a brązowe dla danych z teledetekcji CONOX. Wszystkie linie i zacienione obszary na wykresach odnoszą się do 95% przedziałów ufności.

PRZYGOTOWANIE DANYCH

Metody analizy i sumowania pomiarów teledetekcyjnych zastosowane w niniejszym raporcie zostały udokumentowane w poprzednich badaniach[14]. Przeliczanie stosunku stężenia zanieczyszczeń z układu wydechowego na szacunki zależne od odległości w gramach na kilometr (g/km), jednostkę stosowaną w europejskich przepisach dotyczących pojazdów lekkich, przeprowadza się poprzez połączenie średniej emisji zanieczyszczeń z wielu zapisów pochodzących z teledetekcji z wartościami emisji CO2 i danymi dotyczącymi rzeczywistego zużycia paliwa[15]. Obciążenie silnika jest szacowane przy użyciu mocy właściwej pojazdu (VSP), podawanej umownie w kilowatach na tonę (kW/tonę), która zależy od prędkości i przyspieszenia pojazdu, klasy drogi oraz średnich wartości oporu aerodynamicznego i oporu toczenia pojazdów w celu oszacowania chwilowego zapotrzebowania na moc.

Pomiary za pomocą teledetekcji są najbardziej przydatne, gdy podstawowe właściwości techniczne, takie jak rodzaj paliwa, norma emisji, marka, model i wiek pojazdów objętych próbą, można uzyskać z rejestrów pojazdów za pomocą numeru tablicy rejestracyjnej. W danych dla Krakowa informacje o normie emisji spalin były dostępne tylko dla 14% pojazdów, które były przede wszystkim nowszymi pojazdami homologowanymi zgodnie z Euro 6 i Euro 6d-TEMP. Ponieważ norma emisji spalin jest niezbędną zmienną do analizy emisji spalin pojazdów, opracowano metodologię szacowania norm emisji w oparciu o datę rejestracji pojazdu. Europejskie przepisy wprowadzają normy emisji najpierw poprzez zastosowanie nowych limitów emisji do nowych rodzajów homologacji, a następnie zastosowanie ich do wszystkich nowych rejestracji pojazdów. Okres stopniowego wprowadzania trwa zazwyczaj jeden rok. W celu dokonania ostrożnych szacunków dla porównań obejmujących dane z Krakowa, stopniowo wycofywana norma emisji spalin została przypisana do pojazdów zarejestrowanych w okresie stopniowego wprowadzania. W celu zilustrowania niepewności związanej z szacowaniem norm emisji, rysunek 2 przedstawia udział samochodów osobowych według norm emisji, dla których wartość została zgłoszona, oszacowana poza okresem wdrażania lub oszacowana w okresie wdrażania. Podana norma została wykorzystana do określenia pojazdów Euro 6d-TEMP, ponieważ okres wdrażania zakończył się we wrześniu 2019 r., po zakończeniu kampanii teledetekcji w Krakowie.

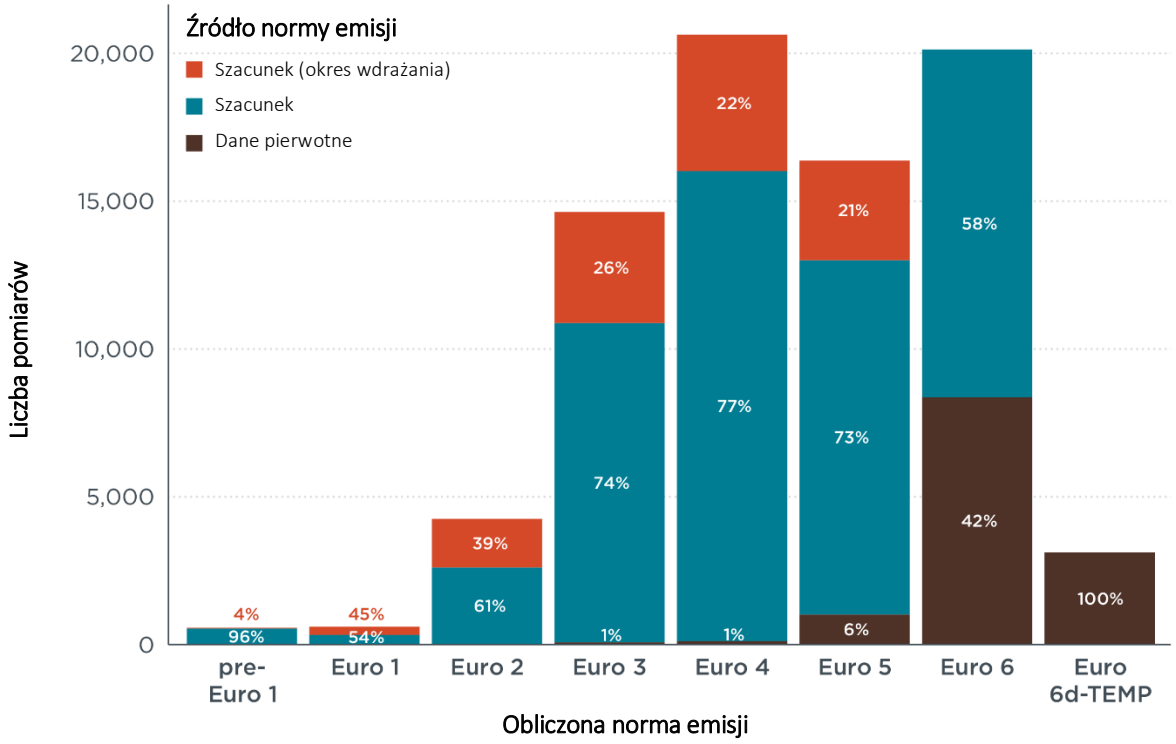
---

[12] Jens Borken-Kleefeld, Stefan Hausberger, Peter McClintock, James Tate, David Carslaw, Yoann Bernard i Åke Sjödin, "Comparing Emission Rates Derived from Remote Sensing with PEMS and Chassis Dynamometer Tests-CONOX Task 1 Report" (Szwajcarski Federalny Urząd ds. Środowiska, maj 2018), https://www.ivl.se/download/18.2aa26978160972788071cd7b/1529408235244/comparing-emission-rates-derived-from-remote-sensing-with-pems-and-chassis-dynamometer-tests-conox-task1-report.pdf;
Å Sjödin i in., "Real-Driving Emissions from Diesel Passenger Cars Measured by Remote Sensing and as Compared with PEMS and Chassis Dynamometer Measurements-CONOX Task 2 Report" (Federalne Biuro ds. Środowiska, Szwajcaria, maj 2018 r.), https://www.ivl.se/download/18.2aa26978160972788071cd79/1529407789751/real-driving-emissions-from-diesel-passengers-cars-measured-by-remote-sensing-and-as-compared-with-pems-and-chassis-dynamometer-measurements-conox-task-2-r.pdf;
Jens Borken-Kleefeld, Stefan Hausberger, Peter McClintock, James Tate, David Carslaw, Yoann Bernard, Åke Sjödin1, "Contribution of Vehicle Remote Sensing to In-Service/Real Driving Emissions Monitoring CONOX Task 3 Report" (Szwajcarski Federalny Urząd ds. Środowiska, maj 2018 r.), https://www.ivl.se/download/18.2aa26978160972788071cd7b/1529408235244/comparing-emission-rates-derived-from-remote-sensing-with-pems-and-chassis-dynamometer-tests-conoxtask1-report.pdf.

[13] Dallmann i in., *Remote Sensing of Motor Vehicle Emissions in Paris*.

[14] Yoann Bernard, Uwe Tietge, John German i Rachel Muncrief, *Determination of Real-World Emissions from Passenger Vehicles Using Remote Sensing Data*, (TRUE Initiative: Waszyngton, D.C., 2018), https://theicct.org/publications/real-world-emissions-using-remote-sensing-data; Uwe Tietge, Yoann Bernard, John German i Rachel Muncrief, *A Comparison of Light-Duty Vehicle NOx Emissions Measured by Remote Sensing in Zurich and Europe* (Kanton Zurychu Urząd ds. Gospodarki Odpadami, Wody, Energii i Powietrza, 2019), https://theicct.org/publications/LDV-comparison-NOx-emissions-Zurich.

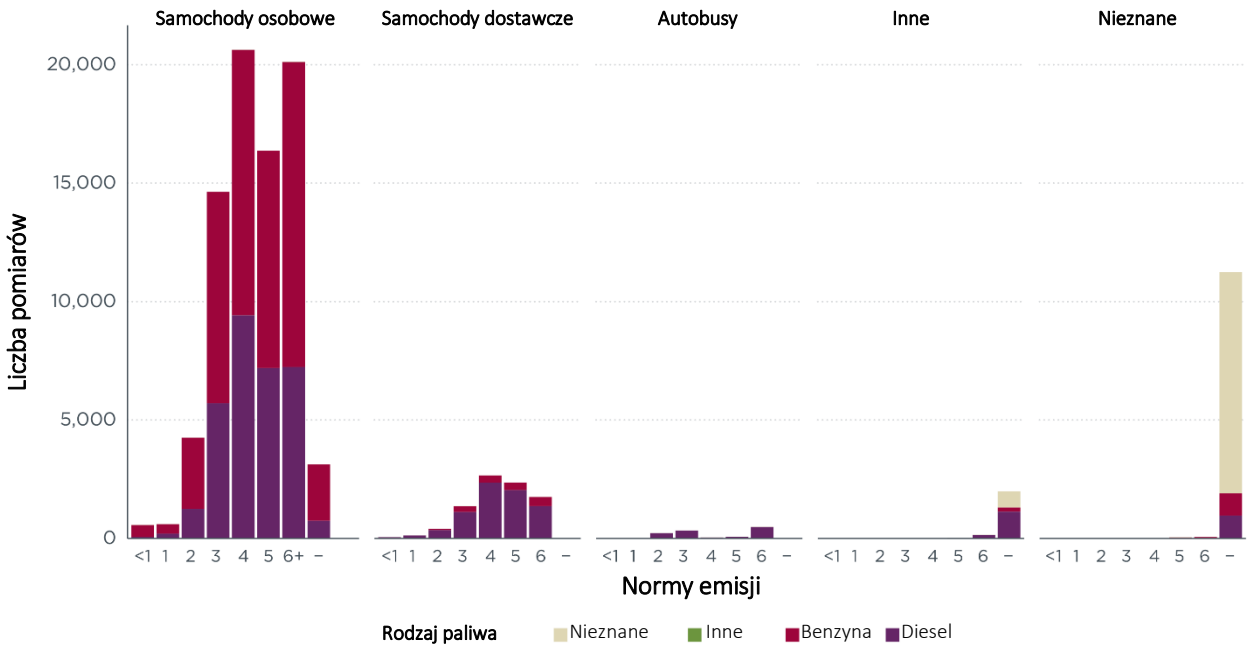
[15] Zakłada się, że informacje o homologacji typu pojazdów CO_2 są oparte na nowym WLTP dla pojazdów Euro6d-TEMP oraz na NEDC dla innych norm Euro. Rozbieżności między homologacją typu a rzeczywistym CO_2 zostały uwzględnione w: Jan Dornoff, Uwe Tietge, Peter Mock, *On the way to "real-world" CO2 values: European passenger car market in its first year after introducing the WLTP*, (ICCT: Waszyngton, D.C., 2020), https://theicct.org/publications/way-real-world-co2-values-european-passenger-car-market-its-first-year-after.



Rys. 2. Źródło wartości norm emisji dla samochodów osobowych.

PRZEGLĄD PRÓBEK

Rysunek 3 przedstawia przegląd próbek z Krakowa według kategorii pojazdu, rodzaju paliwa i normy emisji spalin. Większość (77%) pomiarów dotyczyła samochodów osobowych, z czego samochody dostawcze (8%) i autobusy (1%) stanowiły większość pozostałych możliwych do zidentyfikowania pojazdów. W przypadku 11% pomiarów nie udało się ustalić kategorii pojazdu. Większość (54%) samochodów osobowych stanowiły pojazdy benzynowe, natomiast zdecydowana większość (83%) samochodów dostawczych to pojazdy z silnikiem diesla. Mniej niż 1% samochodów osobowych poddanych pomiarom w Krakowie poprzedza europejskie normy emisji spalin, a około 4% samochodów osobowych zostało przypisanych do obecnie obowiązującej normy emisji spalin, Euro 6d-TEMP. W porównaniu z ostatnią kampanią w bazie danych CONOX, kampanią w Paryżu w 2018 r., udział starszych pojazdów jest znacznie wyższy w pomiarach w Krakowie, o czym świadczy fakt, że Euro 4 była najbardziej rozpowszechnioną normą emisji spalin w Krakowie, podczas gdy Euro 6 była najbardziej rozpowszechnioną normą emisji spalin w Paryżu. W związku z tym pomiary w Krakowie są kluczowym źródłem danych zarówno dla starszych, jak i nowoczesnych pojazdów.



Rys. 3. Liczba pomiarów teledetekcyjnych według kategorii pojazdu, szacunkowej normy emisji zanieczyszczeń i rodzaju paliwa. Euro <1 odnosi się do pojazdów poprzedzających normy Euro; 6+ odnosi się do norm emisji Euro 6 i 6d-TEMP; kreski (-) oznaczają wartości nieznane.

W tabeli 1 przedstawiono przegląd danych pojazdów i warunków pomiarowych w Krakowie oraz dane CONOX. Pojazdy poddane pomiarom w Krakowie były średnio o dwa lata starsze od pojazdów znajdujących się w bazie danych CONOX. Efekt ten jest bardziej widoczny w przypadku wczesnych norm emisji zanieczyszczeń, w przypadku których pojazdy w Krakowie były do 11 lat starsze od średniej w bazie danych CONOX. Mediana emisji CO_2 była konsekwentnie niższa w Krakowie dla norm Euro 3-4 i konsekwentnie wyższa niż mediana wartości CONOX od Euro 5. Pomiary w Krakowie przeprowadzono podczas fali upałów, gdzie mediana temperatury otoczenia wynosiła blisko 30°C, przekraczając medianę temperatury podczas kampanii pomiarowej w Paryżu w 2018 r. o prawie 4°C i czyniąc z Krakowa najgorętszą kampanię teledetekcyjną w bazie danych CONOX. Szacowane wartości mocy właściwej pojazdu (VSP) wahały się od 2 do 10 kW/tonę, a wartość mediany wynosząca około 7 kW/tonę była znacznie niższa od mediany obciążenia silnika w bazie danych CONOX, szczególnie w porównaniu z warunkami dużego obciążenia w pomiarach z Zurychu[16]. Wzorzec ten znajduje odzwierciedlenie w średniej prędkości poniżej 40 km/h i średnim przyspieszeniu poniżej 2 km/h/s w Krakowie, przy czym obie wartości są niezmiennie niższe od średnich CONOX.

[16] Tietge i in., *A Comparison of Light-Duty Vehicle NOx Emissions Measured by Remote Sensing in Zurich and Europe.*

Tabela 1: Podsumowanie warunków badań teledetekcyjnych i charakterystyki floty samochodów osobowych w Krakowie (niebieski) oraz baza danych CONOX (brązowy). W tabeli tej grupa Euro 6 obejmuje pojazdy Euro 6d-TEMP.

	Pomiary	Śr. wiek pojazdu (lata)	Śr. jakość dróg	Certyfikowana emisja CO_2 (g/km₂EDC)	Temperatura otoczenia (°C)	Moc właściwa pojazdu (kW/tonę)	Przyspieszenie (km/h/s) względem prędkości (km/h)
przed-Euro 2 Diesel	258 681	25 19	2.4% 5.0%	218	21.6 28.9	7 9.2	
przed-Euro 2 Benzyna	907 5,979	33 22	2.2% 7.7%	137 194	21.8 29.9	6.8 14.6	
Euro 2 Diesel	1,246 5,076	20 17	2.2% 3.6%	163	22.2 29.6	6.9 8.1	
Euro 2 Benzyna	3,009 20,828	20 16	2.0% 6.0%	183 232	21.5 29.4	6.8 12.3	
Euro 3 Diesel	5,705 33,564	16 12	2.1% 3.4%	147 159	22 29.9	6.8 7.5	
Euro 3 Benzyna	8,928 43,923	16 12	2.0% 4.5%	156 172	19.7 29.7	6.8 9.3	
Euro 4 Diesel	9,416 77,876	11 7	2.0% 3.7%	145 154	21.7 29.6	6.8 7.9	
Euro 4 Benzyna	11,212 103,094	11 9	2.0% 5.7%	153 163	20.6 29.9	6.8 12.2	
Euro 5 Diesel	7,191 113,084	6 4	1.9% 4.1%	130 139	21.9 29.9	6.8 8.3	
Euro 5 Benzyna	9,176 84,374	6 4	1.9% 5.8%	134 139	20.7 30	6.8 12.1	
Euro 6 Diesel	7,981 64,546	2 1	1.8% 2.9%	114 130	23 29.8	6.2 6.8	
Euro 6 Benzyna	15,251 40,691	2 2	1.9% 3.7%	118 132	22.3 29.8	6.9 7.9	
Łącznie	80,280 593,716	9 7	2.0% 4.5%	139 139	21.6 29.8	6.8 9.2	

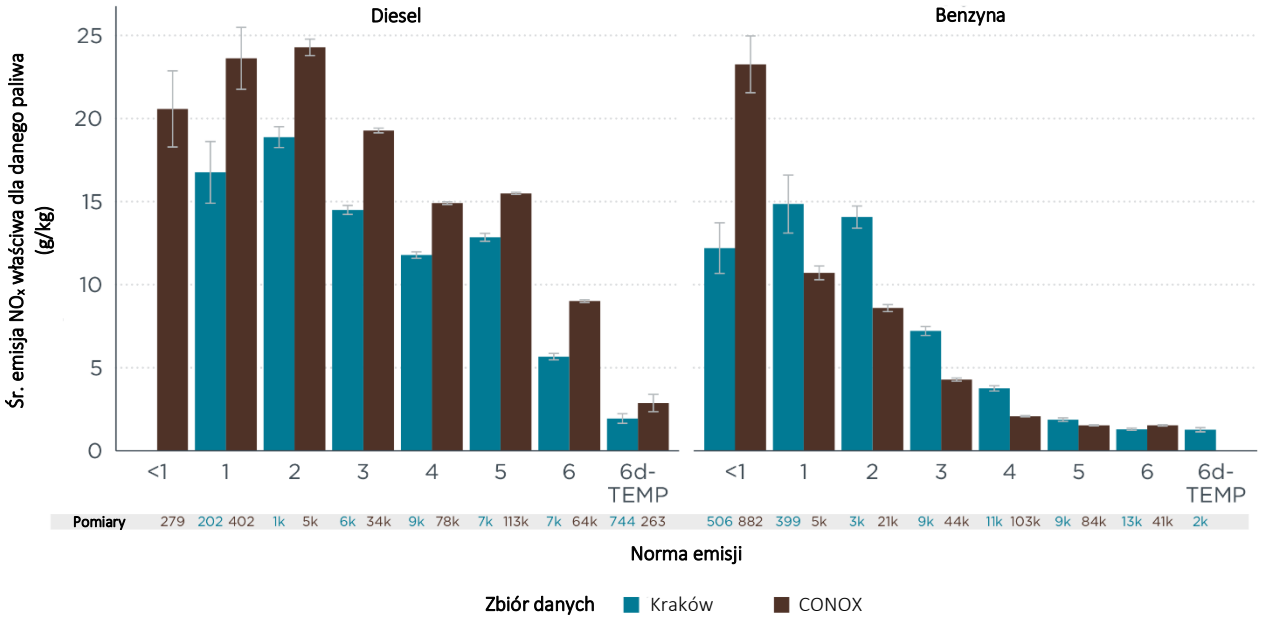
Pomiary kampanii teledetekcyjnej Kraków 2019 wyróżniają się na tle bazy danych CONOX z trzech powodów. Po pierwsze, pomiary w Krakowie są pierwszą kampanią prowadzoną w Polsce, gdzie pozostałe kampanie miały miejsce we Francji, Hiszpanii, Szwecji, Szwajcarii i Wielkiej Brytanii. Po drugie, średni wiek pojazdu w Krakowie był znacznie wyższy niż w innych kampaniach teledetekcyjnych. Wbrew pozorom kampania pomiarów w Krakowie, jako najnowsza kampania, jest również największym źródłem danych dla pojazdów Euro 6d-TEMP w porównaniu z danymi historycznymi w bazie danych CONOX. Po trzecie, warunki pomiarowe były wyjątkowe, z niższym od przeciętnego szacowanym obciążeniem silnika i najcieplejszymi warunkami pogodowymi wśród wszystkich kampanii.

ANALIZA I WYNIKI

EMISJE TLENKÓW AZOTU PRZEZ POJAZDY DOSTAWCZE

Podczas eksploatacji pojazdy emitują tlenki azotu w postaci tlenku azotu (NO) i dwutlenku azotu (NO_2). Oba te czynniki zanieczyszczające zostały zmierzone w tej kampanii. NO nie jest uważany za niebezpieczny dla ludzi w zwyczajnych warunkach otoczenia, ale w ciągu kilku godzin od kontaktu z tlenem w powietrzu zamienia się w szkodliwy NO_2. Dlatego niniejsza analiza jest zgodna z powszechną praktyką sporządzania sprawozdań na temat emisji zanieczyszczeń z pojazdów w masie NO_x, sumy emisji NO_2 i NO, przy czym ta ostatnia wyrażona jest w odpowiednikach NO_2 aby uwzględnić jej ewentualne przeliczenie na NO_2.

Rysunek 4 przedstawia średnie właściwe dla danego paliwa emisje NO_x w gramach NO_x emitowanego na kilogram spalonego paliwa (g/kg) z samochodów osobowych w podziale na rodzaj paliwa i normę emisji oraz porównuje poziomy stwierdzone w danych dotyczących Krakowa i CONOX. Podczas gdy emisje NO_x z samochodów osobowych napędzanych benzyną zmniejszyły się wraz z zaostrzaniem norm emisji, emisje z samochodów osobowych napędzanych silnikiem Diesla zmniejszyły się znacznie dopiero po wprowadzeniu norm Euro 6 i Euro 6d-TEMP. Porównując wyniki uzyskane w Krakowie i systemie CONOX, emisje NO_x z samochodów osobowych z silnikami Diesla były stale niższe w Krakowie niż w systemie CONOX, przy czym różnica wynosiła od 17 % do 37 %. Odwrotnie było w przypadku pojazdów napędzanych benzyną, przy czym dane dotyczące emisji NO_x w Krakowie zazwyczaj przewyższają poziomy określone w normie CONOX, przy czym różnica ta jest bardziej wyraźna w przypadku wczesnych norm emisji. Różnica między emisjami benzyny w Krakowie i CONOX prawdopodobnie wynika z efektów pogorszenia jakości: Wykazano, że emisje NO_x z samochodów osobowych napędzanych benzyną wzrastają wraz z przebiegiem pojazdu, a pojazdy napędzane benzyną o wczesnych normach emisji były w Krakowie znacznie starsze niż w bazie danych CONOX (zob. tabela 1).[17]

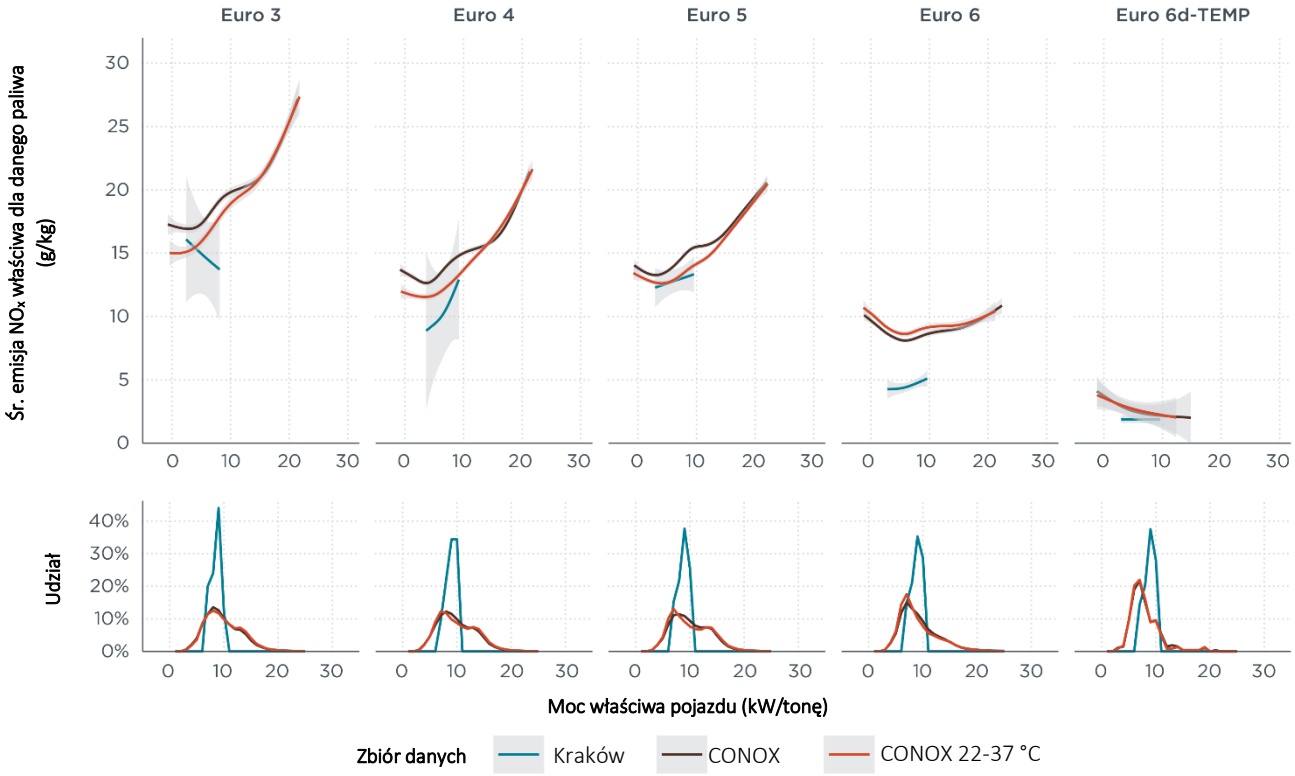


Rys. 4. Średnia emisja NO_x właściwa dla danego paliwa z samochodów osobowych z silnikami Diesla i benzynowymi, pogrupowana według normy emisji spalin, dla danych z teledetekcji w Krakowie i CONOX. Liczba pomiarów przedstawiona jest pod każdym słupkiem. Linie reprezentują 95% przedziału ufności. Wyniki są prezentowane tylko dla grup, dla których wykonano co najmniej 100 pomiarów.

Rys. 5 ilustruje różnice w emisji NO_x z samochodów osobowych z silnikami Diesla pomiędzy Krakowem a CONOX. Wykazano, że zarówno VSP, jak i temperatura otoczenia mają wpływ na emisję NO_x z samochodów osobowych z

[17] Jens Borken-Kleefeld i Yuche Chen, "New Emission Deterioration Rates for Gasoline Cars - Results from Long-Term Measurements," *Atmospheric Environment 101* (styczeń 2015): 58-64, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.013.

silnikami Diesla[18]. Rysunek przedstawia zależność pomiędzy VSP a emisją NO_x według normy emisji spalin przy użyciu uogólnionych modeli addytywnych, wdrożonych w pakietach *mgcv19*[19] i *ggplot220*[20] dla środowiska oprogramowania R[21]. Zakresy VSP zostały skrócone, z piątego do dziewięćdziesiątego piątego percentyla na grupę, aby uniknąć wykresów zależności dla zakresów, dla których dane są niewystarczające. Rysunek różnicuje również zakresy temperatury otoczenia w danych CONOX, gdzie linie brązowe reprezentują pełny zakres temperatur, a pomarańczowe reprezentują dane CONOX filtrowane dla zakresu temperatury otoczenia w pomiarach w Krakowie.



Rys. 5. Górny wykres: Porównanie emisji NO_x charakterystycznych dla danego paliwa z samochodów osobowych z silnikiem Diesla spełniających normę od Euro 3 do Euro 6d-TEMP jako funkcji VSP w wielu zbiorach danych teledetekcji: Kraków (niebieski), CONOX (brązowy) i CONOX filtrowane dla zakresu temperatury otoczenia w Krakowie (pomarańczowy). Zależność między emisją NO_x a VSP jest reprezentowana przez uogólnione modele addytywne z 95% przedziałami ufności. Wykres dolny: Udział pomiarów w każdym zbiorze danych dla każdego bloku VSP (szerokość bloku: 2 kW/tonę).

Rysunek 5 wskazuje, że pomiary NO_x przy stosunkowo niskim poborze mocy w Krakowie na ogół pokrywają się z poziomami NO_x w bazie danych CONOX przy podobnych zakresach VSP. Filtrowanie dla podobnych zakresów

[18] Stuart Kenneth Grange i in., "Strong Temperature Dependence for Light-Duty Diesel Vehicle NOx Emissions", *Environmental Science & Technology*, 16 maja 2019, acs.est.9b01024, https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01024; Borken-Kleefeld i in., "Comparing Emission Rates Derived from Remote Sensing with PEMS and Chassis Dynamometer Tests-CONOX Task 1 Report"; Dallmann i in., Remo*te Sensing of Motor Vehicle Emissions in Paris*; Tietge i in., *A Comparison of Light-Duty Vehicle NOx Emissions Measured by Remote Sensing in Zurich and Europe*; David C. Carslaw i in., "The Importance of High Vehicle Power for Passenger Car Emissions", *Atmospheric Environment 68* (kwiecień 2013): 8-16, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.033.

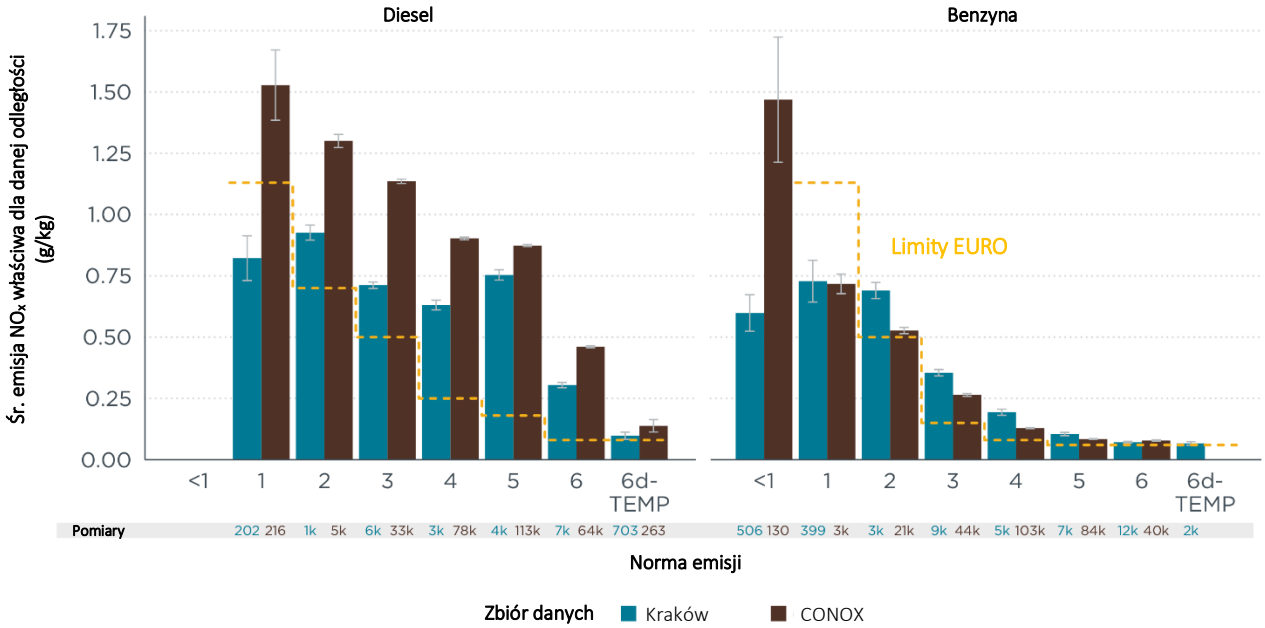
[19] 19 Simon N. Wood, "Fast Stable Restricted Maximum Likelihood Restricted and Marginal Likelihood Estimation of Semiparametric Generalized Linear Models: Estimation of Semiparametric Generalized Linearalized Models", *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology) 73*, nr 1 (styczeń 2011): 3-36, https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x.

[20] Hadley Wickham, *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis - Rev 2016, Use R!* (Cham: Springer International Publishing, 2016), https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4.

[21] R Core Team, "R: A Language and Environment for Statistical Computing" (R Foundation for Statistical Computing, 2020), http://www.R-project.org/.

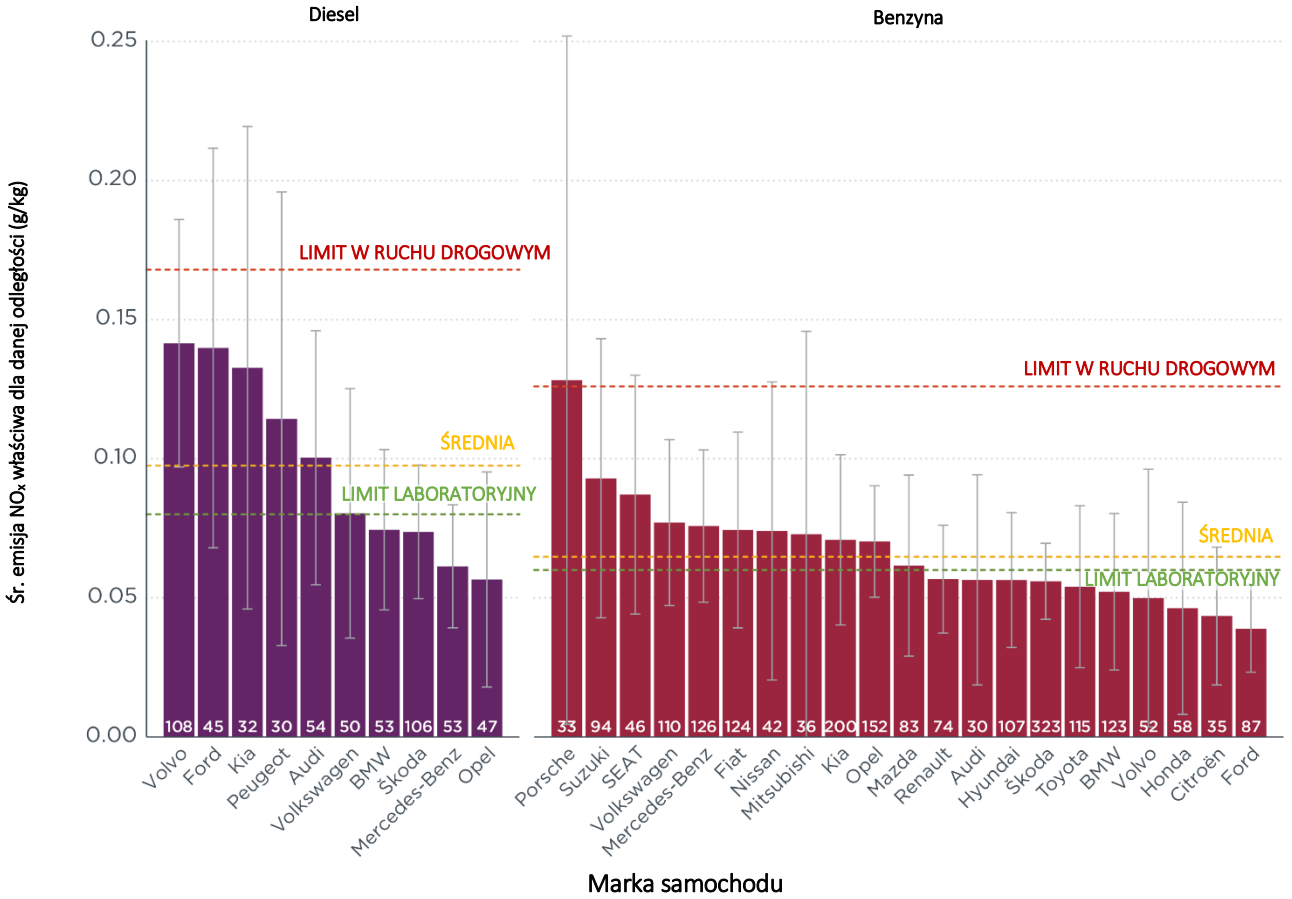
temperatury otoczenia w danych CONOX dodatkowo zmniejsza poziomy emisji NO_x dla Euro 3-5 i zbliża średnie dla Krakowa i CONOX. Wyjątek stanowią pojazdy spełniające normę Euro 6: ani VSP, ani temperatura otoczenia nie uwzględniają różnic między pomiarami przeprowadzanymi w Krakowie i pomiarami CONOX. Zakładamy, że pomiary z Krakowa obejmują pojazdy spełniające normę Euro 6d-TEMP, które zostały zgłoszone jako pojazdy spełniające normę Euro 6 - ponad 80% samochodów osobowych spełniających normę Euro 6 z silnikami Diesla, których próbki pobrano w Krakowie, zostało zarejestrowanych po rozpoczęciu wdrażania normy Euro 6d-TEMP we wrześniu 2017 r. - co sztucznie zmniejsza średnie emisje NO_x z grupy Euro 6.

Rysunek 6 przedstawia średnie poziomy emisji NO_x dla poszczególnych odległości w zależności od rodzaju paliwa i normy emisji w Krakowie oraz dane CONOX. Ogólnie rzecz biorąc, tendencje w zakresie poziomów emisji i różnice między wynikami dla Krakowa i CONOX są podobne do tych przedstawionych na rysunku 4. Emisje NO_x z pojazdów napędzanych benzyną zmniejszyły się wraz z zaostrzaniem norm emisji, ale nadal przekraczały laboratoryjne wartości graniczne emisji, chociaż przy znacznie niższych poziomach przekroczenia (do 0,21 g/km) niż ich odpowiedniki z silnikiem Diesla (do 0,57 g/km).



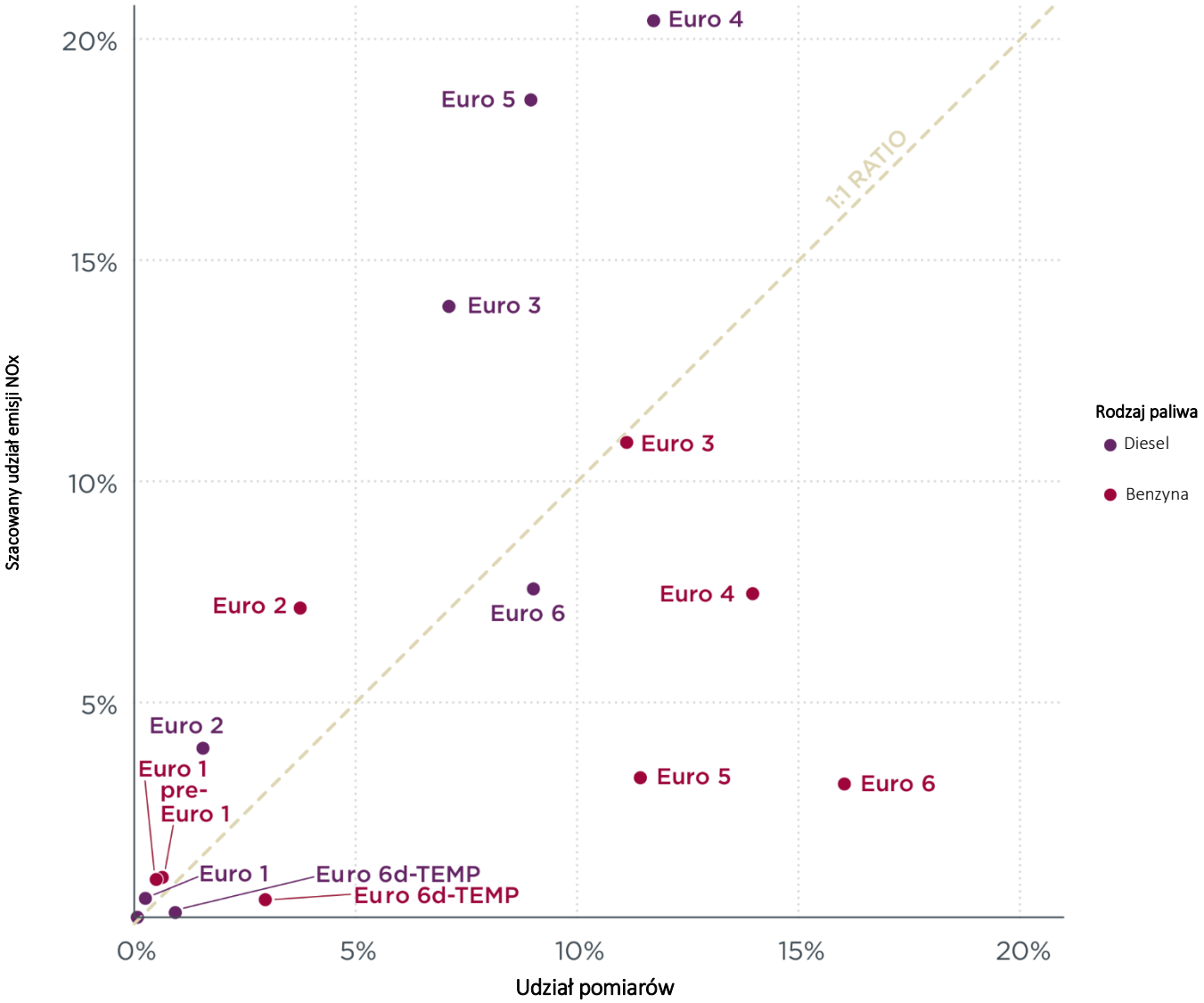
Rys. 6. Średnia szacunkowa emisja NO_x właściwa dla danej odległości z samochodów osobowych z silnikami Diesla i benzynowymi, pogrupowana według normy emisji spalin, dla danych z teledetekcji w Krakowie i CONOX. Liczba pomiarów przedstawiona jest pod każdym słupkiem. Linie reprezentują 95% przedziału ufności. Wyniki są prezentowane tylko dla grup, dla których wykonano co najmniej 100 pomiarów.

Przy średniej emisji NO_x poniżej 0,1 g/km, samochody osobowe z silnikami Diesla Euro 6d-TEMP w Krakowie zbliżyły się do przepisowych limitów 0,08 g/km i znalazły się w granicach nieprzekraczających 0,168 g/km dla pomiarów na drodze. Rysunek 7 przedstawia średnie wartości emisji NO_x dla poszczególnych dróg dla samochodów osobowych Euro 6d-TEMP w zależności od rodzaju paliwa i marki pojazdu. Pojazdy z silnikami Diesla emitowały średnio o 0,033 g/km (51%) więcej niż pojazdy benzynowe. Praktycznie wszystkie marki pojazdów osiągnęły wartość graniczną nieprzekraczającą 0,168 g/km dla pojazdów z silnikiem Diesla i 0,126 g/km dla pojazdów z silnikiem benzynowym w przypadku pomiarów rzeczywistej emisji zanieczyszczeń podczas jazdy po drogach. Około połowa marek spełniła również laboratoryjną wartość dopuszczalną w zakresie homologacji typu wynoszącą 0,08 g/km dla pojazdów z silnikiem Diesla i 0,06 g/km dla pojazdów z silnikiem benzynowym. Ze względu na małe rozmiary próbek szacunki średniej pozostają niepewne, o czym świadczą szerokie zakresy w 95 % przedziałach ufności. Ponadto konieczne są pomiary przy różnym obciążeniu silnika i w różnych warunkach jazdy, aby ocenić zewnętrzną ważność tych wyników.



Rys. 7. Średnia emisja NO_x właściwa dla danej odległości z samochodów osobowych spełniających normę Euro 6d-TEMP, pogrupowanych według rodzaju paliwa i marki, dla danych z teledetekcji w Krakowie. Liczba pomiarów przedstawiona jest na dole każdego słupka. Linie reprezentują 95% przedziału ufności. Wyniki prezentowane są tylko dla grup z co najmniej 30 pomiarami.

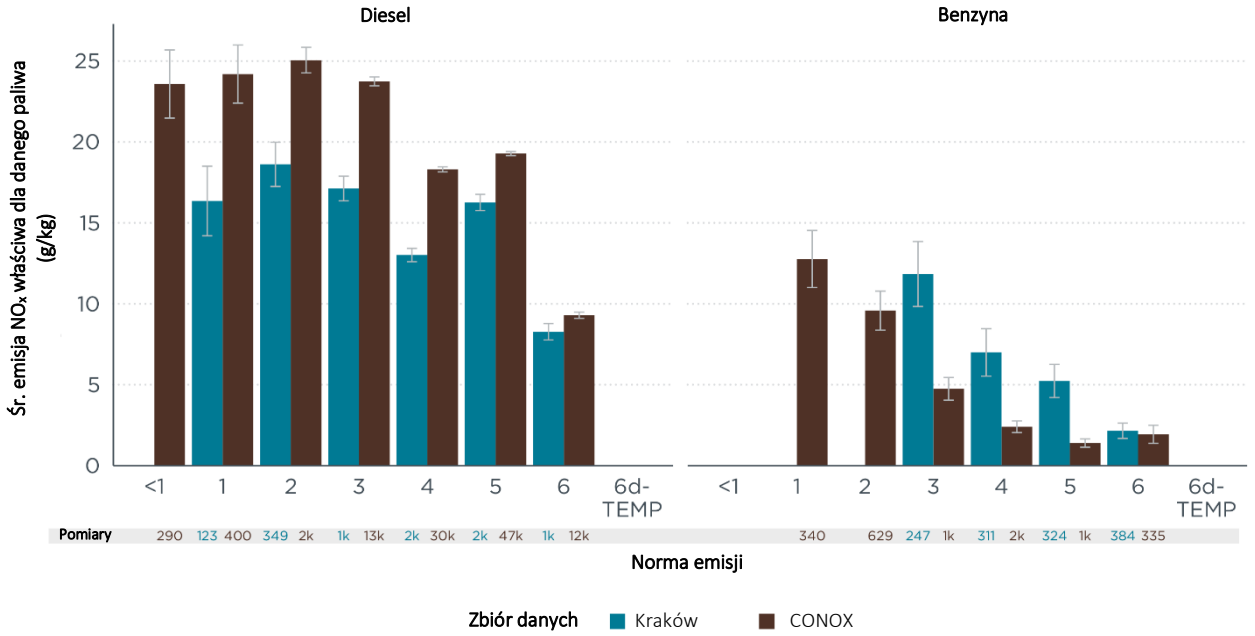
Rysunek 8 przedstawia szacunkowy udział emisji NO_x z samochodów osobowych oraz udział pomiarów według rodzaju paliwa i normy emisji. Większość samochodów osobowych z silnikami Diesla i benzynowymi poprzedzających normę Euro 3 ma wyższy udział emisji NO_x niż udział zmierzonych pojazdów. Samochody osobowe spełniające normę Euro 4 z silnikiem Diesla mają najwyższy udział w emisji NO_x, około 20%, ale stanowią jedynie 12% pomiarów. Pojazdy z silnikiem Diesla stanowią 40 % pomiarów i odpowiadają za około 65 % całkowitej emisji NO_x. Mimo to wpływ samochodów osobowych z silnikami Diesla na całkowitą emisję NO_x jest w Krakowie niższy niż w innych ostatnich europejskich kampaniach teledetekcyjnych, takich jak kampania w Paryżu w 2018 r., ze względu na wyższy udział benzynowych samochodów osobowych sprzed Euro 4 w Krakowie.



Rys. 8. Udział pomiarów i szacunkowy udział całkowitej emisji NO_x w Krakowie z samochodów osobowych według normy emisji i rodzaju paliwa. Udział pomiarów teledetekcyjnych traktowany jest jako przybliżony stosunek liczby kilometrów przejechanych przez każdą z grup pojazdów.

Na rysunku 9 przedstawiono średni poziom emisji NO_x z samochodów dostawczych w zależności od rodzaju paliwa i normy emisji, porównując poziomy w Krakowie i dane CONOX. Poziomy emisji i tendencje w czasie są zbliżone do wyników dla samochodów osobowych przedstawionych na rysunku 4: poziom emisji dla silników Diesla pozostał stosunkowo bez zmian przez normy Euro 1-5, natomiast poziom emisji NO_x dla benzyny spadł. Wyniki dla pojazdów napędzanych benzyną są skąpe, ponieważ zdecydowana większość samochodów dostawczych jest napędzana silnikami Diesla[22]. Podobnie jak w przypadku samochodów osobowych, emisja NO_x z silników Diesla była niższa, a emisja NO_x z benzyny wyższa w Krakowie niż w CONOX. Przyczyny tych różnic są prawdopodobnie takie same jak w przypadku samochodów osobowych: mniejsze zapotrzebowanie na moc i gorąca pogoda wyjaśniają niższą emisję spalin z silników Diesla, a wiek krakowskiej floty benzynowej tłumaczy wyższą emisję spalin z benzyny. W Krakowie zebrano tylko 48 pomiarów samochodów dostawczych spełniających normę Euro 6d-TEMP, w związku z czym nie przedstawiono ich na rysunku. Wyjaśnieniem tej niskiej liczby jest fakt, że norma emisji dla samochodów dostawczych jest stopniowo wprowadzana od września 2018 r. do września 2020 r., rok później niż dla samochodów osobowych.

[22] Georg Bieker, Uwe Tietge, Felipe Rodriguez i Peter Mock, "European Vehicle Market Statistics, 2019/2020" (ICCT: Waszyngton, D.C., 2019), https://theicct.org/publications/european-vehicle-market-statistics-20192020.



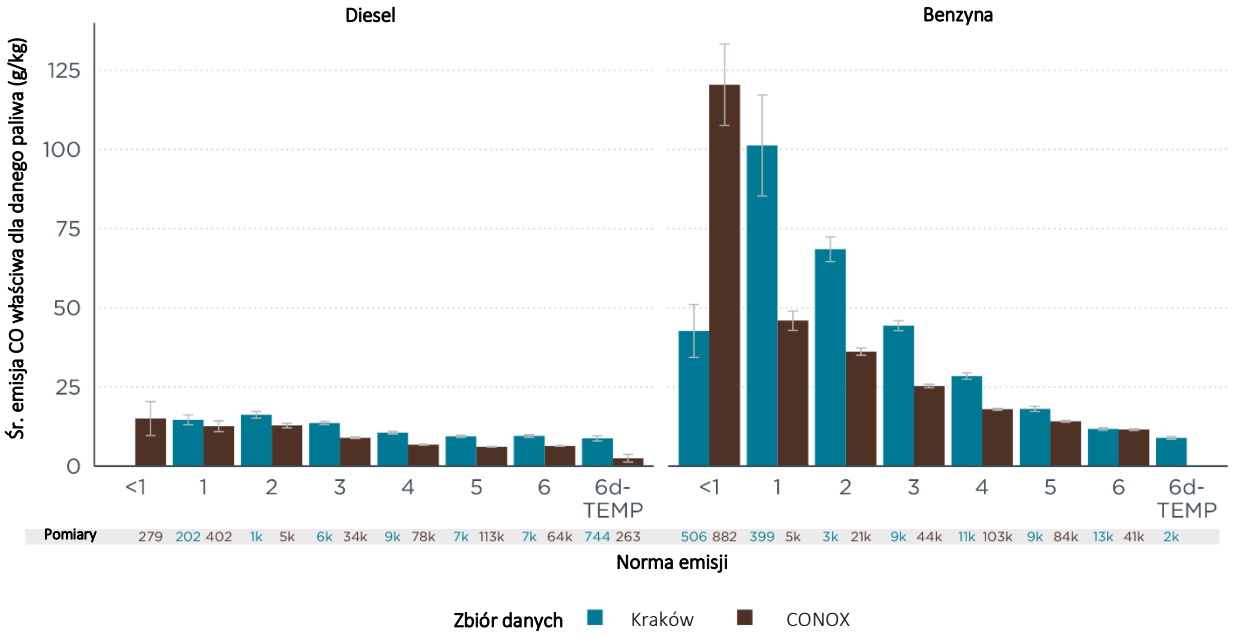
Rys. 9. Średnia emisja NOx dla poszczególnych paliw w samochodach dostawczych z silnikami Diesla i benzynowymi, pogrupowana według normy emisji spalin, dla danych z teledetekcji w Krakowie i CONOX. Liczba pomiarów przedstawiona jest poniżej każdego słupka. Linie reprezentują 95% przedziału ufności. Wyniki są prezentowane tylko dla grup, dla których wykonano co najmniej 100 pomiarów.

EMISJA TLENKU WĘGLA PRZEZ POJAZDY DOSTAWCZE

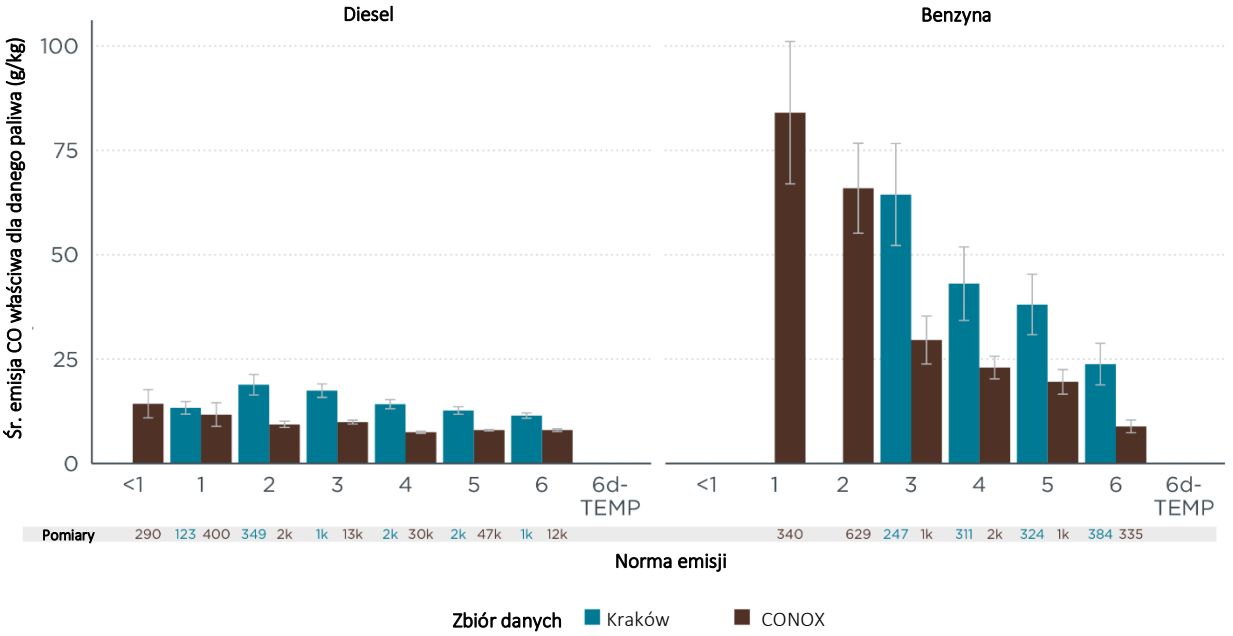
Rysunki 10 i 11 przedstawiają średnie właściwe dla danego paliwa emisje tlenku węgla (CO) odpowiednio z samochodów osobowych i samochodów dostawczych. Wyniki pogrupowano według rodzaju paliwa i normy emisji oraz porównano poziomy emisji w Krakowie i CONOX. Podobnie jak w poprzednich kampaniach teledetekcji, emisja CO z pojazdów benzynowych w Krakowie zmniejsza się wraz z zaostrzaniem norm emisji, podczas gdy emisje z pojazdów z silnikami Diesla w przeszłości były stosunkowo niskie. Średnia emisja CO z samochodów osobowych napędzanych benzyną Euro 6 była o około 23% wyższa niż w przypadku pojazdów napędzanych silnikami Diesla. Różnica ta jest większa w przypadku samochodów dostawczych, przy czym pojazdy benzynowe Euro 6 w Krakowie emitują ponad dwukrotnie więcej CO niż pojazdy z silnikiem Diesla. Różnica ta ma prawdopodobnie swoje źródło w normach emisji, które zezwalają samochodom osobowym Euro 6 napędzanym benzyną emitować dwa razy więcej CO niż ich odpowiedniki z silnikiem Diesla podczas uzyskiwania homologacji, podczas gdy samochody dostawcze napędzane benzyną mogą emitować do trzech razy więcej CO niż ich odpowiedniki z silnikiem Diesla.

Rysunki 10 i 11 wskazują również, że emisje CO były znacznie wyższe w Krakowie niż w poprzednich kampaniach CONOX. W przypadku samochodów osobowych różnica ta jest szczególnie widoczna w przypadku pojazdów spełniających normy Euro 1-4. Pogorszenie się stanu pojazdów prawdopodobnie wyjaśnia różnicę między wynikami uzyskanymi w Krakowie i w ramach kampanii CONOX, ponieważ pojazdy benzynowe w Krakowie były znacznie starsze niż pojazdy w bazie CONOX (zob. tabela 1), a poziom emisji CO wzrastał wraz z wiekiem pojazdu[23].

[23] Dallmann i in., *Remote Sensing of Motor Vehicle Emissions in Paris*; Dallmann i in., *Remote Sensing of Motor Vehicle Emissions in London*; Borken-Kleefeld i Chen, "New Emission Deterioration Rates for Gasoline Cars - Results from Long-Term Measurements".



Rys. 10. Średnia emisja CO z samochodów osobowych z silnikami Diesla i benzynowymi, pogrupowana według normy emisji, dla danych z teledetekcji w Krakowie i CONOX. Liczba pomiarów przedstawiona jest na dole każdego słupka. Linie reprezentują 95% przedziału ufności. Wyniki są prezentowane tylko dla grup, dla których wykonano co najmniej 100 pomiarów.



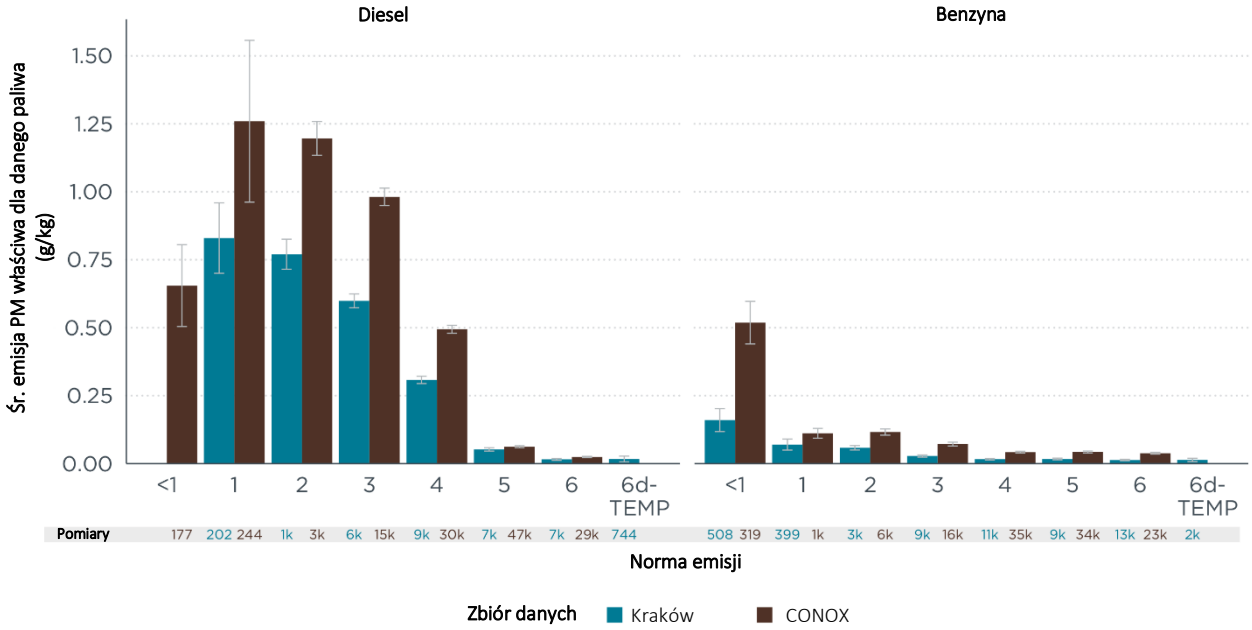
Rys. 11. Średnia emisja CO właściwa dla danego paliwa w samochodach dostawczych z silnikami Diesla i benzynowymi, pogrupowana według normy emisji, dla danych z teledetekcji w Krakowie i CONOX. Liczba pomiarów przedstawiona jest na dole każdego słupka. Linie reprezentują 95% przedziału ufności. Wyniki są prezentowane tylko dla grup, dla których wykonano co najmniej 100 pomiarów.

EMISJA CZĄSTEK STAŁYCH PRZEZ POJAZDY DOSTAWCZE

Urządzenie do teledetekcji Opus RSD5000 zastosowane w kampanii w Krakowie mierzy stopień nieprzezroczystości smugi spalin jako wskaźnik zastępczy dla emisji cząstek stałych (PM). Pomiar nieprzezroczystości dostarcza pewnych informacji na temat emisji cząstek stałych, ale różni się zasadniczo od metod stosowanych do ilościowego określania masy i liczby cząstek stałych w certyfikacji regulacyjnej i badaniach zgodności. Ogólnie rzecz biorąc,

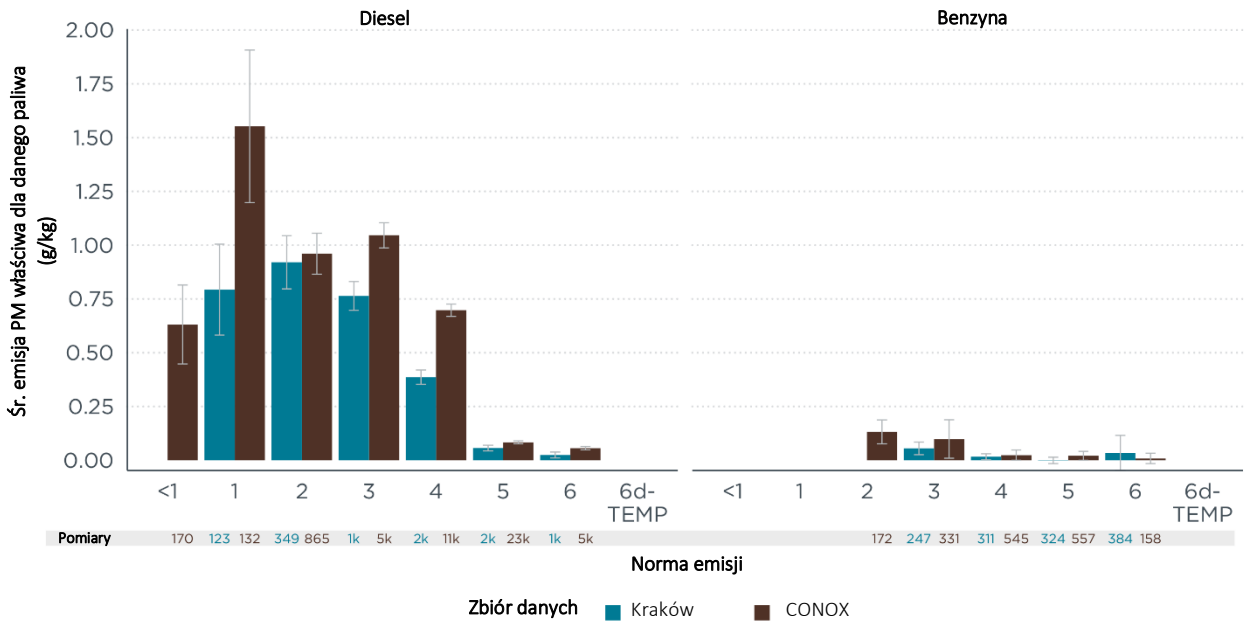
pomiar nieprzezroczystości jest przydatny do oceny emisji PM ze starszych pojazdów z silnikami Diesla i pojazdów wysokoemisyjnych. Podejście to jest mniej przydatne do ilościowego określania emisji PM z prawidłowo funkcjonujących pojazdów z silnikami benzynowymi i nowoczesnych pojazdów z silnikami Diesla wyposażonych w filtry cząstek stałych, ponieważ oczekuje się, że odczyty nieprzezroczystości spalin dla tych pojazdów mieszczą się w zakresie dopuszczalnych poziomów urządzenia. Ponadto metoda ta nie pozwala na pomiar liczby cząstek stałych, która jest regulowana dodatkowo do ich masy od czasu wprowadzenia normy Euro 5b dla silników Diesla i Euro 6 dla silników benzynowych z bezpośrednim wtryskiem.

Rysunki 12 i 13 pokazują średnie emisje PM odpowiednio z samochodów osobowych i samochodów dostawczych. Wyniki pogrupowano według rodzaju paliwa i normy emisji oraz porównano poziomy emisji w Krakowie i CONOX. Należy zauważyć, że pomiary nieprzezroczystości z kampanii w 2018 r. w Paryżu nie zostały włączone do średniej CONOX, ponieważ pomiary w Paryżu zostały zebrane przy użyciu urządzenia Hager Environmental & Atmospheric Technologies (HEAT) Emissions Detection and Reporting (EDAR)[24] , a wyniki nie są bezpośrednio porównywalne z pomiarami Opus RSD5000[25] . W Krakowie, podobnie jak w bazie CONOX, emisje PM z pojazdów Euro 5 i Euro 6 z silnikami Diesla są podobne do nowoczesnych pojazdów z silnikami benzynowymi i zbliżone do poziomu wykrywalności urządzeń teledetekcyjnych. I odwrotnie, emisje PM z samochodów osobowych i samochodów dostawczych z silnikami Diesla sprzed Euro 5 były wyraźnie wykrywalne za pomocą urządzeń teledetekcji. Stwierdzono, że poziomy emisji w Krakowie są stale niższe od średnich CONOX.



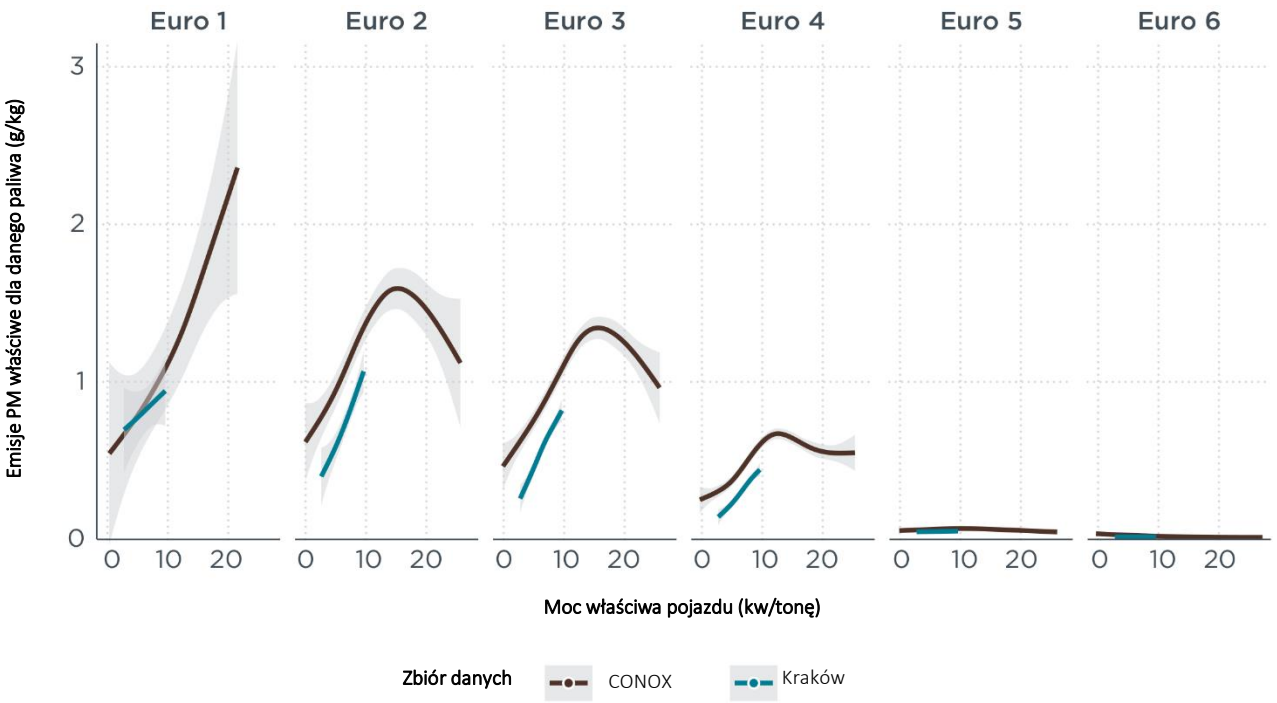
Rys. 12. Średnia emisja PM właściwa dla danego paliwa z samochodów osobowych z silnikami Diesla i benzynowymi, pogrupowana według normy emisji spalin, dla danych z teledetekcji w Krakowie i CONOX. Liczba pomiarów przedstawiona jest na dole każdego słupka. Linie reprezentują 95% przedziału ufności. Wyniki są prezentowane tylko dla grup, dla których wykonano co najmniej 100 pomiarów.

[24] Zob. Karl Ropkins i in., "Evaluation of EDAR Vehicle Emissions Remote Sensing Technology", *Science of the Total Environment 609* (grudzień 2017): 1464-74, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.137.
[25] Dallmann i in., *Remote Sensing of Motor Vehicle Emissions in Paris*.



Rys. 13. Średnia emisja PM właściwa dla danego paliwa w samochodach dostawczych napędzanych silnikami Diesla i benzynowymi, pogrupowana według normy Euro, dla danych z teledetekcji w Krakowie i CONOX. Liczba pomiarów przedstawiona jest na dole każdego słupka. Linie reprezentują 95% przedziału ufności. Wyniki są prezentowane tylko dla grup, dla których wykonano co najmniej 100 pomiarów.

Rysunek 14 bada różnice w emisji PM z samochodów osobowych z silnikami Diesla pomiędzy zestawem danych z Krakowa i CONOX. Rysunek przedstawia zależność między VSP i emisją PM na normę emisji przy użyciu uogólnionych modeli addytywnych. Zakresy VSP są skrócone, od 5. do 95. percentyla na grupę, aby uniknąć wykreślania zależności dla zakresów, dla których brakuje danych. W przypadku pojazdów z silnikami Diesla spełniających normy Euro 5 i Euro 6 liczba ta wskazuje, że poziom emisji PM jest niski na wszystkich poziomach VSP, zgodnie z oczekiwaną wydajnością filtrów cząstek stałych (DPF). W przypadku pojazdów spełniających normę Euro 1-4 emisje wzrastają wraz z VSP do około 15 kW/tonę w danych CONOX, a w przypadku danych z Krakowa - do pełnego zakresu VSP. Ta tendencja wzrostowa wydaje się być zgodna ze spalaniem płomienia dyfuzyjnego - paliwo spala się podczas kontaktu z powietrzem znajdującym się w nadmiernej ilości – w oleju napędowym, co zazwyczaj wymaga wyższego stosunku paliwa do powietrza przy zwiększonym obciążeniu silnika. Brak tlenu w komorze spalania, występujący przy wyższej mocy, powoduje słabsze spalanie paliwa i przyspieszone tworzenie się cząstek stałych. Sądząc po średniej emisji PM i VSP (patrz okrągłe znaczniki), dostosowanie do VSP stanowi ponad połowę różnicy między pomiarami CONOX a Krakowem dla pojazdów Euro 1-4. Niemniej jednak pewne różnice między poziomami emisji cząstek stałych CONOX i PM w Krakowie pozostają niewyjaśnione.

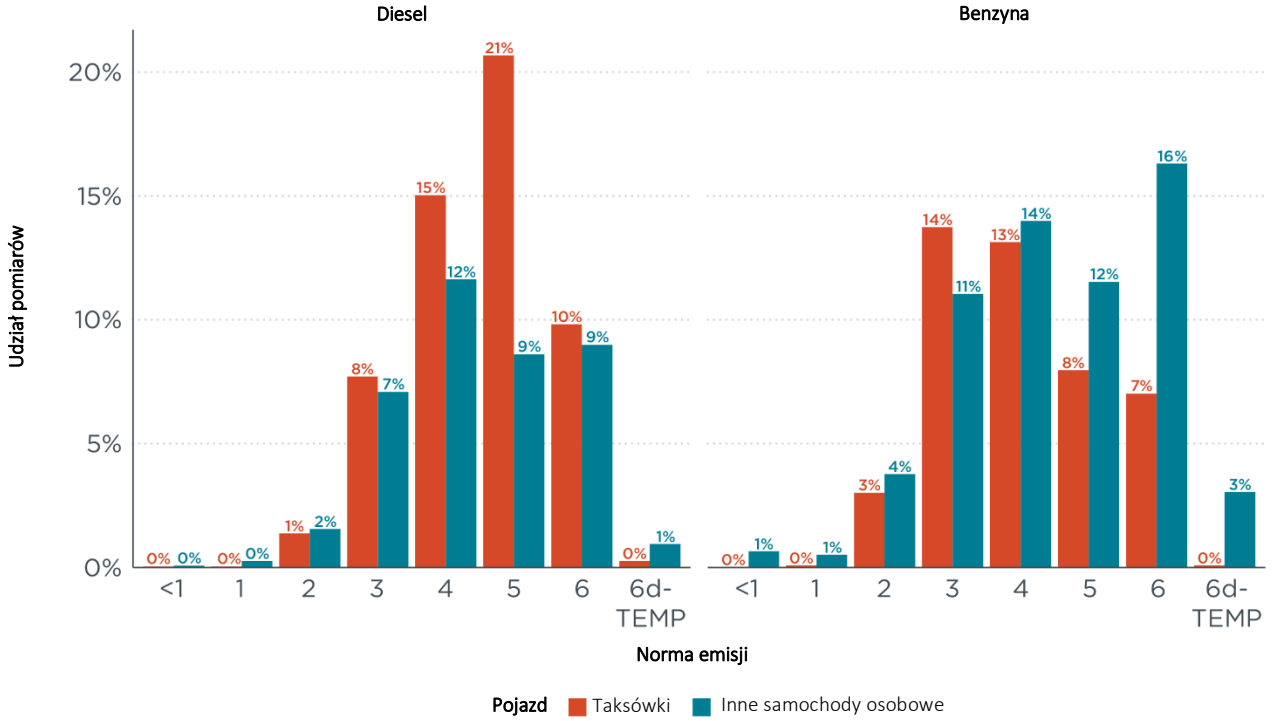


Rys. 14. Porównanie emisji PM właściwych dla danego paliwa z samochodów osobowych z silnikiem Diesla Euro 1 do Euro 6 w funkcji VSP w Krakowie (niebieski) i CONOX (brązowy). Zależność między emisją PM i VSP jest reprezentowana za pomocą uogólnionych modeli addytywnych z 95% przedziałem ufności. Okrągłe znaczniki reprezentują średnie poziomy emisji PM i VSP.

STUDIUM PRZYPADKU: TAKSÓWKI

Niniejsze studium przypadku analizuje zdalne pomiary floty taksówkowej w Krakowie. W porównaniu z samochodami osobowymi, taksówki stanowią niewielki ułamek ogólnej liczby samochodów dostawczych, ale ich stosunkowo wysoki roczny przebieg oznacza, że mają one nieproporcjonalnie duży udział w ogólnej emisji zanieczyszczeń. W Krakowie w ramach kampanii teledetekcji taksówki stanowiły około 3%, czyli 2300 z 78 000, pomiarów samochodów osobowych.

Rysunek 15 porównuje skład floty taksówek pod względem rodzaju paliwa i normy emisji zanieczyszczeń z innymi samochodami osobowymi. Taksówki były średnio o 6 miesięcy starsze od innych samochodów osobowych, ze średnią wieku 9,7 roku w porównaniu do 9,1 roku. Różnica ta odpowiada średniemu standardowi Euro dla pojazdów w całej flocie, przy czym taksówki były starsze niż inne samochody osobowe. Ponadto flota taksówek miała większy udział pojazdów z silnikiem Diesla, przy czym większość (55%) taksówek była napędzana silnikiem Diesla, a większość (61%) samochodów osobowych była napędzana benzyną. Łącznie, pojazdy Euro 4-5 z silnikiem Diesla i Euro 3 z silnikiem benzynowym są znacznie bardziej powszechnie używane jako taksówki niż samochody osobowe.



Rys. 15. Porównanie pomiarów krakowskich taksówek i innych samochodów osobowych pod względem rodzaju paliwa i normy emisji spalin.

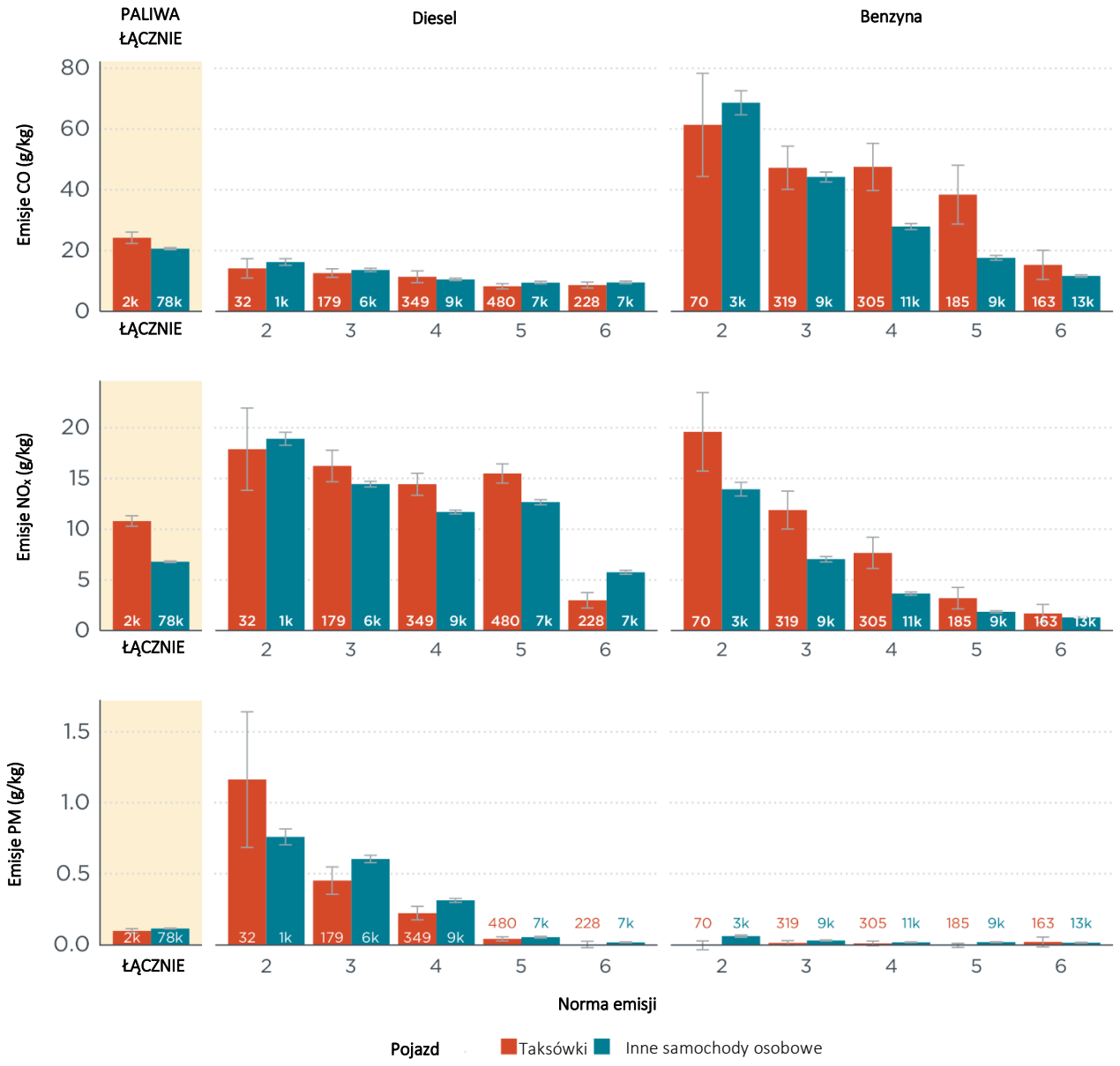
Rysunek 16 przedstawia średnie wartości emisji CO, NO_x i PM właściwe dla danego paliwa we wszystkich flotach taksówek i samochodów osobowych, dla całej floty oraz według normy emisji i rodzaju paliwa.

Średnia emisja NO_x z taksówek w całej flocie była o 59 % wyższa niż z samochodów osobowych i była wyższa we wszystkich kombinacjach paliw i norm emisji, z wyjątkiem silników Diesla Euro 2 i Diesla Euro 6. Taksówki napędzane silnikiem benzynowym charakteryzują się wyższą emisją NO_x niż inne samochody osobowe napędzane silnikiem benzynowym we wszystkich generacjach norm emisji, a różnica ta powiększa się wraz z wiekiem. Zakładając, że taksówki są użytkowane w większym stopniu niż inne samochody osobowe, tendencja ta jest spójna z pogarszaniem się stanu katalizatorów w miarę upływu czasu, szczególnie w pojazdach posiadających homologację zgodną ze starszymi normami emisji[26]. Pojazdy z silnikami Diesla sprzed Euro 6 nie są w tak dużym stopniu uzależnione od tych urządzeń w celu zmniejszenia emisji NO_x, co mogłoby wyjaśnić pozornie ograniczony wpływ przebiegu na emisje NO_x.

Taksówki spełniające normę Euro 6 są jedynymi pojazdami z silnikiem Diesla, w przypadku których emisje NO_x są znacznie niższe niż ich odpowiedniki dla samochodów osobowych. Strategie redukcji emisji NO_x w nowoczesnych silnikach Diesla różnią się znacznie zarówno pod względem konstrukcji, jak i skuteczności w zależności od producenta[27], i jest prawdopodobne, że dominacja niektórych marek we flocie taksówek miała wpływ na te dane. Pojazdy produkowane przez Mercedes-Benz stanowiły blisko 60 % wszystkich badanych taksówek Euro 6 z silnikiem Diesla, w porównaniu z mniej niż 18 % innych samochodów osobowych Euro 6 z silnikiem Diesla. Emisja NO_x z pojazdów marki Mercedes-Benz była średnio o 70% niższa niż w przypadku innych samochodów osobowych Euro 6 z silnikiem Diesla w Krakowie.

Wyniki pokazują mniej rozbieżności pomiędzy taksówkami a innymi samochodami osobowymi w zakresie emisji CO i PM. Pod względem emisji CO, pojazdy z silnikami Diesla stanowią większość floty taksówek i, jak pokazano na rysunkach 10 i 16, emitują mniej CO niż pojazdy benzynowe. Natomiast, mimo że taksówki napędzane benzyną stanowią mniejszość floty taksówkowej, związana z przebiegiem degradacja układów oczyszczania spalin oznacza, podobnie jak w przypadku emisji NO_x, że na ogół emitują one więcej CO niż inne samochody osobowe. Emisje PM w całej flocie są zbliżone do granicy wykrywalności urządzeń teledetekcji.

[26] Borken-Kleefeld i Chen, "New Emission Deterioration Rates for Gasoline Cars - Results from Long-Term Measurements".
[27] Vicente Franco, Francisco Posada Sánchez, John German i Peter Mock, Real-World Exhaust Emissions from Modern Diesel Cars, (ICCT: Waszyngton, D.C., 2014), http://www.theicct.org/real-world-exhaust-emissions-modern-diesel-cars.



Rys. 16. Średnia emisja CO, NOx i PM właściwa dla danego paliwa z taksówek krakowskich i innych samochodów osobowych ogółem oraz w podziale na rodzaj paliwa i normę emisji. Liczba pomiarów przedstawiona jest na dole każdego słupka. Linie reprezentują 95% przedziału ufności.

STUDIUM PRZYPADKU: AUTOBUSY

Niniejsze studium przypadku koncentruje się na autobusach badanych w ramach kampanii teledetekcji w Krakowie. W mieście funkcjonują zarówno usługi publiczne, jak i zarządzane prywatnie floty komercyjne. Ta ostatnia kategoria jest podzielona na dwa rodzaje - te, które są wymienione w rejestrze miejskim i te, które nie są nim objęte.

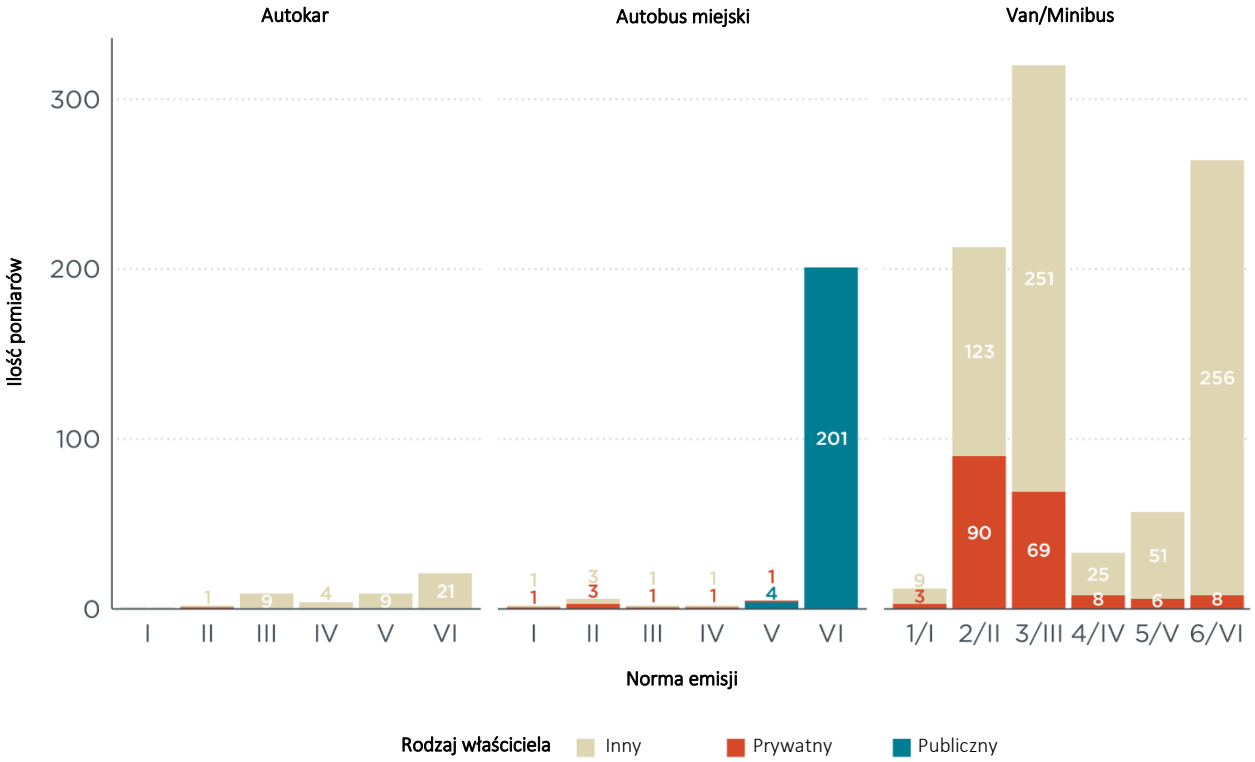
Omawiane dane nie pozwoliły na wyraźne rozróżnienie autobusów ze względu na kategorię pojazdu lub klasę wagową. Dlatego też pogrupowaliśmy autobusy według typu nadwozia w oparciu o nazwy modeli. Wśród typów nadwozi znajdują się autokary (autobusy przeznaczone na długie trasy), autobusy miejskie (autobusy przeznaczone na krótsze trasy) oraz vany/minibusy. Ta ostatnia grupa jest zazwyczaj ograniczona do mniej niż 20 pasażerów i posiada homologację na normy emisji spalin dla pojazdów dostawczych (LDV) lub ciężarowych (HDV), w zależności od masy pojazdu i liczby pasażerów.

Dane dotyczące norm emisji pochodzą z różnych źródeł, w tym z rejestrów krakowskiego Zarządu Transportu Publicznego i krajowego rejestru pojazdów. Tam, gdzie dane nie były dostępne z tych źródeł, norma emisji została

oszacowana na podstawie daty rejestracji pojazdu. Dotyczy to głównie tych pojazdów, których własność jest nieznana. Ponieważ nie jest znana masa i pojemność ładunkowa niektórych vanów/minibusów, stosujemy w cyfrach zarówno dostawcze (cyfry arabskie), jak i ciężarowe (cyfry rzymskie) zapisy normy emisji spalin. Wszystkie autobusy w tym studium przypadku są napędzane silnikiem Diesla.

Rysunek 17 przedstawia liczbę pomiarów według typu nadwozia, normy emisji spalin i rodzaju właściciela. Praktycznie wszystkie badane autobusy miejskie są eksploatowane przez ten sam samorząd lokalny, co oznacza, że odnowa floty będzie w dużym stopniu wyrównana i wdrożona w cyklach. Może to wyjaśnić, dlaczego prawie wszystkie te pojazdy otrzymały homologację zgodnie z Euro 6.

Natomiast mniejsze vany i minibusy są eksploatowane przez szereg podmiotów prywatnych i nieznanych właścicieli, co wskazuje na większe zróżnicowanie. Trzy najczęstsze normy emisji zanieczyszczeń w przypadku vanów i minibusów to stosunkowo nowe pojazdy Euro 6/VI i stosunkowo stare pojazdy Euro 2/II i Euro 3/III, ale niewiele jest pojazdów, które otrzymały homologację zgodnie z normami emisji zanieczyszczeń pomiędzy tymi dwoma skrajnymi wartościami. Prywatne autobusy spełniają zazwyczaj starsze normy emisji spalin.

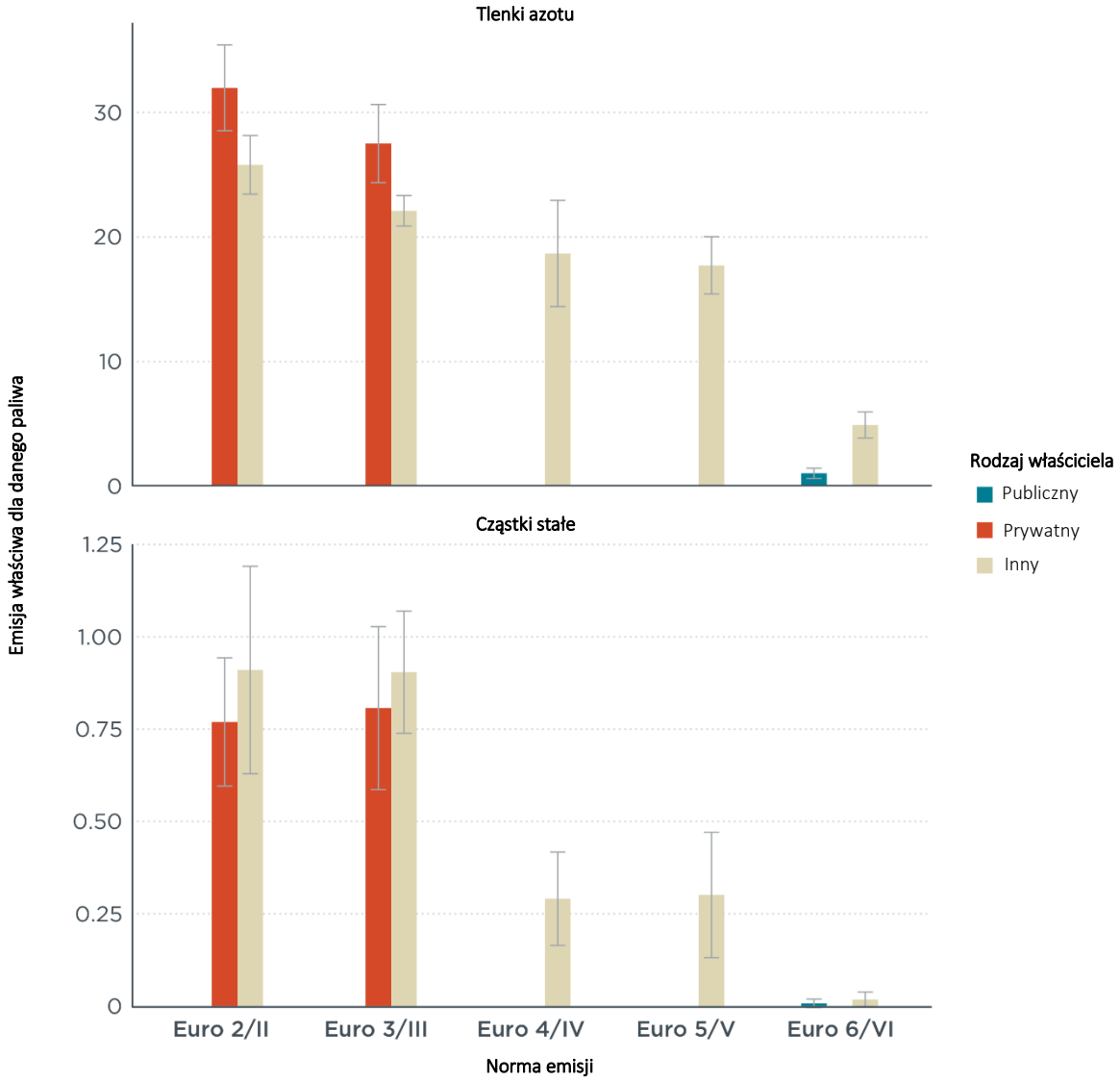


Rys. 17. Liczba pomiarów autobusów według normy emisji, rodzaju właściciela, typu nadwozia i normy emisji.

Rysunek 18 przedstawia średnie emisje NOx i PM w podziale na rodzaj właściciela i normę emisji. Podobnie jak w przypadku samochodów dostawczych z silnikiem Diesla (patrz rys. 4 i rys. 9), zmniejszenie emisji NOx właściwych dla danego paliwa było najbardziej widoczne wraz z wprowadzeniem normy Euro 6/VI. Autobusy spełniające normę Euro 6/VI emitowały 81%-97% mniej NOx niż autobusy spełniające normę Euro 2/II oraz 72%-94% mniej NOx niż autobusy spełniające normę Euro 5/V. Różnice między autobusami Euro 6/VI będącymi własnością publiczną i prywatną można wyjaśnić znacznym odsetkiem tych ostatnich pojazdów certyfikowanych zgodnie z rozporządzeniem Euro 6 LDV, podczas gdy autobusy komunikacji publicznej ze względu na ich większą masę były homologowane zgodnie z procedurą HDV Euro 6. Powszechnie przyjmuje się, że przepisy Euro 6 HDV były skuteczniejsze niż ich odpowiedniki dla LDV w ograniczaniu rzeczywistej emisji NOx w porównaniu z normami Euro 5/V.[28]

[28] Rachel Muncrief, NOx Emissions from Heavy-Duty and Light-Duty Diesel Vehicles in the EU: Comparison of Real-World Performance and Current Type-Approval Requirements, (ICCT: Waszyngton, D.C., 2017), https://theicct.org/publications/nox-emissions-heavy-duty-and-light-duty-diesel-vehicles-eu-comparison-real-world.

Emisja cząstek stałych ulegała bardziej stopniowemu zmniejszaniu niż emisja NOx. Normy Euro 4/IV i 5/V spowodowały zwiększenie środków ukierunkowanych na emisje PM, co spowodowało spadek między 4/IV a 5/V w porównaniu z 2/II i 3/III. Kolejny znaczący spadek emisji cząstek stałych nastąpił wraz z wdrożeniem normy Euro 6, kiedy to filtry cząstek stałych stały się w rzeczywistości normą przemysłową w zakresie zgodności z rozporządzeniem, którego celem było zmniejszenie ogólnej masy i liczby cząstek stałych[29].



Rys. 18. Emisje NOX i PM właściwe dla danego paliwa w autobusach publicznych, prywatnych i innych autobusach według normy emisji spalin. Wyniki są przedstawione tylko dla grup, dla których wykonano co najmniej 30 pomiarów.

Istnieją dwa ograniczenia naszych wyników, które powinny być wzięte pod uwagę. Po pierwsze, przy braku danych na temat zużycia paliwa przez autobusy, nieznane są emisje zanieczyszczeń na jednostkę przebytej drogi i przebytej drogi z pasażerami, co utrudnia dokonywanie porównań między pojazdami o różnej wielkości, od samochodów dostawczych o małej ładowności do ciężarowych autobusów miejskich o dużej ładowności. Po drugie, procedury badania emisji zanieczyszczeń z samochodów dostawczych i ciężarowych oraz wartości graniczne emisji zanieczyszczeń są z natury trudne do porównania, co ponownie utrudnia porównania w różnych kategoriach autobusów. Niemniej jednak wyniki wskazują na ogólną skuteczność przepisów Euro 6 i Euro VI w zapewnianiu znacznej redukcji emisji w porównaniu z poprzednimi generacjami norm emisji.

[29] Tim Dallmann i Lingzhi Jin, Fuel Efficiency and Climate Impacts of Soot-Free Heavy-Duty Diesel Engines, (ICCT: Waszyngton, D.C., 2020), https://theicct.org/publications/soot-free-hd-diesel-engines-jun2020.

STUDIUM PRZYPADKU: SAMOCHODY OSOBOWE Z SILNIKAMI DIESLA Z WYSOKIM POMIAREM PM

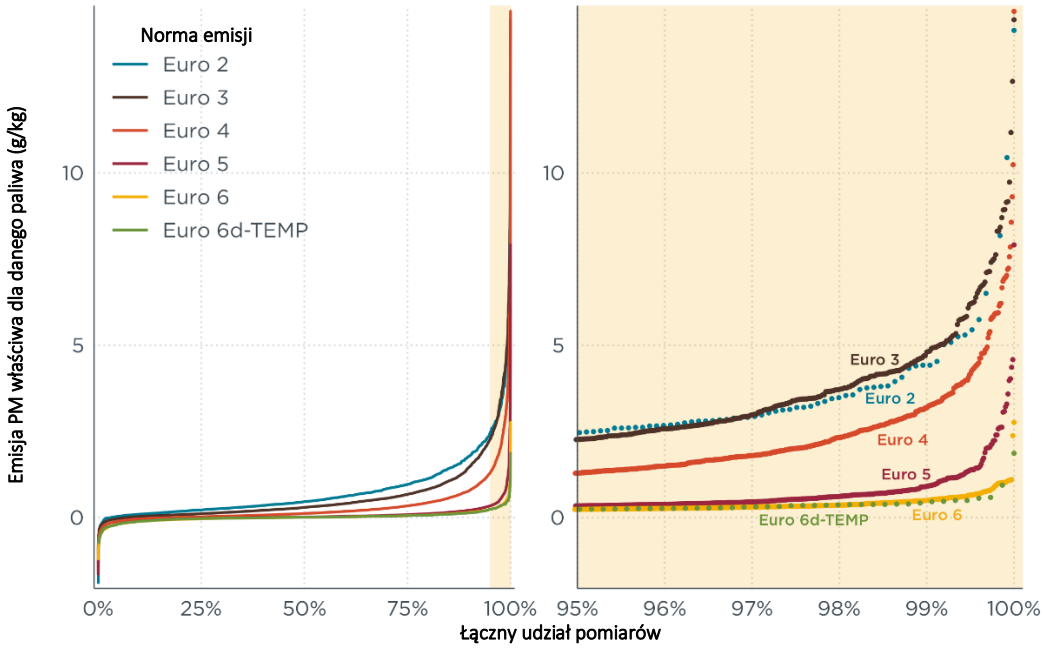
W tej sekcji badane są indywidualne pomiary cząstek stałych o największej emisji w samochodach osobowych z silnikami Diesla. Jak omówiono w niniejszym studium przypadku, filtr cząstek stałych stał się standardowym rozwiązaniem przemysłowym służącym radykalnemu ograniczeniu emisji cząstek stałych z samochodów dostawczych z silnikami Diesla po Euro 4. Dowody anegdotyczne wskazują jednak, że niewłaściwa konserwacja, starzenie się lub celowe manipulowanie lub usuwanie filtra DPF w pojazdach po Euro 4 może prowadzić do sytuacji, w której pojazdy, które zwykle powinny emitować niewielkie ilości cząstek stałych produkują ich duże ilości[30]. Natomiast tylko kilka samochodów posiadających homologację zgodnie z normą Euro 4 lub wcześniejszą było wyposażonych w filtr.

Rysunek 19 porównuje łączny rozkład emisji cząstek stałych w zależności od ilości spalanego paliwa z samochodów osobowych z silnikami Diesla spełniających normę Euro 2 do Euro 6d-TEMP w Krakowie. Fakt, że rozkład kolejnych norm emisji zanieczyszczeń ledwo się pokrywa, wskazuje na to, że nowsze pojazdy zapewniają ogólny spadek emisji PM. W szczególności pomiary cząstek stałych dla silników Euro 5 i Euro 6 wyraźnie przewyższają pomiary dla samochodów sprzed Euro 5.

Prawa strona rysunku przedstawia indywidualne pomiary emisji z pojazdów w przedziale 95-100 percentyli, co odpowiada 5% najwyższych wartości PM według normy emisji. Poziomy emisji PM pozostają stosunkowo płaskie aż do 99. percentyla dla pojazdów Euro 5 i do 99,9 percentyla dla Euro 6 i 6d-TEMP. Około 6 % pomiarów Euro 5 i 3 % pomiarów Euro 6 i 6d-TEMP przekracza medianę emisji Euro 3. Innymi słowy, tylko niewielka część pomiarów Euro 5 i 6 dla samochodów osobowych prezentuje poziomy PM porównywalne z pojazdami zazwyczaj nie wyposażonymi w filtr cząstek stałych.

Niewielki udział pojazdów emitujących wysokie poziomy cząstek stałych nie sugeruje, że DPF nie działa wadliwie lub nie dochodzi do ingerencji, ale że jest mało prawdopodobne, aby był to powszechny problem prowadzący do nadmiernej emisji cząstek stałych w Krakowie. W niektórych filtrach cząstek stałych mogą wystąpić mikropęknięcia, a nie bezpośrednie awarie lub przypadki ingerencji. Taka usterka może prowadzić do nieprawidłowego poziomu liczby cząstek stałych (PM) w zakresie wielkości nanometrów, który nie byłby możliwy do wykrycia przez urządzenia teledetekcyjne stosowane w Krakowie.

[30] Transport i środowisko, "How to Tackle the Illegal Diesel Filter Removal 'industry' in Belgium and Beyond", 3 lipca 2017, https://www.transportenvironment.org/news/how-tackle-illegal-diesel-filter-removal-industry-belgium-and-beyond.



Rys. 19. Skumulowany podział emisji cząstek stałych z samochodów osobowych z silnikami Diesla według normy emisji spalin. Lewa strona: Pełny zakres. Prawa strona: 95. do 100. percentyla.

WNIOSKI

Kampania teledetekcji w Krakowie w 2019 roku jest wyjątkowa pod wieloma względami, między innymi jest pierwszym tego typu programem pomiaru emisji w Polsce, kraju, w którym wiek pojazdów należy do najwyższych w Europie. Kontekst ten znajduje odzwierciedlenie w stosunkowo wysokim ogólnym wieku pojazdów w mieście, choć nadal jest on niższy od średniej krajowej. Kampania w Krakowie została przeprowadzona również po wprowadzeniu norm Euro 6d-TEMP i tym samym stworzyła okazję do zebrania bardzo potrzebnych danych empirycznych na temat pojazdów homologowanych zgodnie z najnowszymi przepisami dotyczącymi emisji zanieczyszczeń. Wreszcie, godne uwagi były również same warunki testowe, z najcieplejszą temperaturą otoczenia spośród wszystkich kampanii CONOX i niższym od przeciętnego obciążeniem silnika.

Ogólnie rzecz biorąc, emisja NO_x z samochodów osobowych z silnikiem Diesla mierzona w Krakowie była niższa niż w innych miastach europejskich. Różnicę tę można wyjaśnić korzystnymi temperaturami otoczenia i stosunkowo niskim obciążeniem silnika. Emisja NO_x ze starszych pojazdów benzynowych była na ogół nieco wyższa niż w innych zbiorach danych, co prawdopodobnie można wyjaśnić starszą flotą w Krakowie. Emisja NO_x z pojazdów z silnikami Diesla pozostaje na ogół kilka razy wyższa niż emisja z pojazdów benzynowych o równoważnych normach emisji, z wyjątkiem samochodów osobowych Euro 6d-TEMP. Emisje NO_x z tej klasy mieściły się w normatywnych limitach drogowych i prawie w granicach laboratoryjnej homologacji typu Euro 6, niemniej jednak pozostawały one o 50 % wyższe niż emisje z pojazdów benzynowych o równoważnych normach emisji, mimo że warunki pomiaru w Krakowie sprzyjały niższym emisjom. Szacowany udział całkowitej emisji NO_x z samochodów osobowych według rodzaju paliwa i normy emisji sugeruje, że największy udział mają pojazdy z silnikiem Diesla i samochody benzynowe sprzed normy Euro 3.

Podobnie jak w przypadku poprzednich kampanii w Londynie i Paryżu, emisja CO z samochodów dostawczych napędzanych silnikiem benzynowym wykazuje spadek wraz z postępem w zakresie norm emisji, podczas gdy emisja CO z silników Diesla pozostaje niezmiennie niska i stosunkowo stabilna. Dane z Krakowa wskazują jednak, że emisje CO z pojazdów napędzanych benzyną były znacznie wyższe niż w poprzednich kampaniach, a prawdopodobną przyczyną była większa liczba starszych pojazdów w eksploatacji. Ponadto pojazdy benzynowe spełniające normę Euro 6 emitowały ponad dwukrotnie więcej CO niż ich odpowiedniki z silnikiem Diesla. Jest to prawdopodobnie związane z regulacyjnymi limitami emisji CO, które są 3 razy mniej rygorystyczne niż odpowiadające im przepisy dotyczące silników Diesla.

Nie jest zaskoczeniem, że samochody osobowe i samochody dostawcze z silnikiem Diesla wyprodukowane przed wprowadzeniem Euro 5 wykazywały najwyższe poziomy emisji PM. Ponadto poziom emisji w Krakowie był stale niższy od średnich z innych kampanii, co częściowo wynika z warunków testowych sprzyjających niższemu obciążeniu silnika.

Kampania teledetekcyjna w Krakowie potwierdziła pewne wnioski wyciągnięte z poprzednich kampanii testowych w miastach Europy Zachodniej, a także ujawniła pewne nowe spostrzeżenia. Kampania ujawniła, że miejska emisja NO_x z silników Diesla na ogół kilkakrotnie przekracza poziom dla silników benzynowych, a w najlepszym razie o 50% w przypadku najnowszych pojazdów. Ponadto stwierdzono, że najstarsze pojazdy przyczyniają się nieproporcjonalnie do poziomu zanieczyszczenia powietrza ze względu na bardziej łagodne normy emisji. Sytuację pogarsza dodatkowo ogólne pogorszenie strategii redukcji emisji w wyniku starzenia się pojazdów. Kwestia starzenia się pojazdów jest szczególnie widoczna w tym studium. Przewidujemy, że problem ten będzie jeszcze bardziej widoczny w polskiej flocie, która jest przeciętnie o cztery lata starsza niż flota krakowskiego obszaru metropolitalnego. W związku z tym zalecamy, aby w przyszłych badaniach zbadać emisję zanieczyszczeń przez flotę w innych miastach Europy Wschodniej, których flota jest starsza niż stosunkowo nowoczesna flota Krakowa. Wreszcie, pojazdy Euro 6d-TEMP zasługują na dodatkową i stałą uwagę. Przede wszystkim, obecnie brak jest rzeczywistych pomiarów w niskich temperaturach otoczenia i w warunkach podwyższonego obciążenia.

W ramach badania opracowaliśmy trzy studia przypadków. Znaleźliśmy niewiele dowodów na to, że ingerowanie w filtry cząstek stałych w silnikach Diesla było powszechnym problemem. Ponadto, rozbieżności w pomiarach między taksówkami a innymi samochodami osobowymi były prawdopodobnie spowodowane starszym wiekiem floty taksówek. Jeśli chodzi o miejską flotę autobusową, stwierdziliśmy, że autobusy miejskie w Krakowie mają najniższy poziom emisji NO_x i PM w zależności od paliwa, a większość pojazdów posiada homologację typu na normę Euro VI. Sugeruje to, że środki polityczne mające na celu odnowienie floty autobusowej, a nie tylko tych będących własnością publiczną, byłyby zatem skutecznym sposobem na zmniejszenie emisji NO_x i PM w Krakowie.

Miasto Kraków zleciło sporządzenie niniejszego sprawozdania, aby poinformować o postępach w realizacji strategii mających na celu ograniczenie zanieczyszczenia powietrza. Wyniki wskazują, że strefa niskiej emisji skoncentrowana na stopniowym wycofywaniu starszych pojazdów - w szczególności modeli benzynowych sprzed Euro 3 i Diesla sprzed Euro 6 - mogłaby znacznie zmniejszyć emisję NO_x i przynieść wymierne korzyści dla jakości powietrza.

Niniejszym, potwierdzam zgodność tego, oto tłumaczenia z treścią oryginału w języku angielskim.

Ruda Śląska 15 października, 2020

Repertorium: 153/20