

**RAPORT ROCZNY Z MONITORINGU
WYBRANYCH „HOT-SPOTÓW”
Ocena stanu bazowego
w „hot-spotach”**

Zabrze, 2023

Poradnik przygotowany przez Instytut Technologii Paliw i Energii w ramach projektu zintegrowanego LIFE „**Śląskie. Przywracamy błękit**”. **Kompleksowa realizacja Programu ochrony powietrza dla województwa śląskiego** realizowanego jest przy dofinansowaniu z Programu LIFE Unii Europejskiej oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej



Województwo
Śląskie



Projekt zintegrowany LIFE „Śląskie. Przywracamy błękit”. Kompleksowa realizacja Programu ochrony powietrza dla województwa śląskiego realizowany jest przy dofinansowaniu z Programu LIFE Unii Europejskiej oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.
LIFE20 IPE/PL/000007 - LIFE-IP AQP-SILESIA-SKY

Wyłączną odpowiedzialność za treść publikacji ponoszą autorzy. Informacje zawarte w niniejszej broszurze niekonieczne odzwierciedlają stanowisko lub opinie Komisji Europejskiej, która nie odpowiada za skutki związane z użyciem informacji w niej zawartych.

1	WSTĘP	4
2	METODYKA POMIARÓW	8
2.1	POMIARY Z WYKORZYSTANIEM DRONÓW	8
2.2	POMIARY STACJONARNE	9
3	WYNIKI KAMPANII POMIAROWEJ	11
4	OCENA STANU BAZOWEGO W „HOT-SPOTACH”	32
5	PODSUMOWANIE	34

1 Wstęp

Przy spalaniu pierwiastka węgla w tlenie w warunkach idealnych jedynym produktem spalania jest dwutlenek węgla CO₂. Podczas spalania paliw węglowych (węgiel z zanieczyszczeniami) w powietrzu (zawierającym oprócz tlenu inne gazy) pojawiają się, oprócz CO₂, także inne produkty spalania – w tym pyły. Za ich głównego przedstawiciela uważa się – ze względów historyczno-praktycznych – pył stanowiący mieszaninę wszystkich frakcji o średnicach równoważnych nie przekraczających 10 mikrometrów (pył PM10). Jego zawartość w spalinach w silnym stopniu zależy od jakości paliwa, zaawansowania i stanu technicznego urządzenia, w którym jest ono spalane, kultury obsługi tego urządzenia i w pewnym stopniu odzwierciedla obecność w tychże spalinach innych zanieczyszczeń typowych dla spalania paliw węglowych (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne – WWA, sadza, koksik). Dlatego też stężenie PM10 w spalinach zostaje najczęściej przyjmowane jako wskaźnik odzwierciedlający jakość prowadzenia procesu spalania.

Niniejsze opracowanie przedstawia zestawienie wyników pomiarów uzyskanych w wyniku realizacji dwóch zadań Poddziałania C.2.1. Monitoring zanieczyszczeń pyłowych PM10 z wykorzystaniem dronów na obszarach występowania tzw. „hot-spotów” związanych z niską emisją:

- ❖ wybiórczego pomiaru względnej wielkości stężeń PM10 (w odniesieniu do CO₂) w gazach spalinowych nad emitorami indywidualnymi w obrębie wytypowanych „hot-spotów”,
- ❖ ciągłych pomiarów stężeń pyłu PM10 przez urządzenia stacjonarne zainstalowane w wybranych punktach „hot-spotów”.

Monitoring zawartości PM10 w spalinach i w powietrzu z wykorzystaniem dronów oraz mierników stacjonarnych na obszarach występowania „hot-spotów” pyłu zawieszanego (lokalnych maksimum stężeń) związanych z eksploatacją indywidualnych urządzeń grzewczych na paliwa stałe, pozwoli na bieżącą kontrolę postępu wdrażania działania naprawczego PL240X-ZSO. W jego ramach przewidziano wymianę przestarzałych, wysokoemisyjnych źródeł ciepła na paliwa stałe na źródła niskoemisyjne.

W trakcie trwania projektu w ramach wybiórczych pomiarów względnych stężeń PM10 mierzone są wartości stężeń chwilowych PM10 i CO₂ nad emitorami w wybranych „hot-spotach” w 10 gminach woj. śląskiego, a następnie wyliczane stosunki CO₂/PM10 uzyskanych stężeń. Dodatkowo sporządzone są mapy przelotu drona nad wytypowanymi „hot-spotami”.

Okres trwania projektu obejmuje 6 lat - w jego trakcie cykle pomiarowe będą wykonywane 5-krotnie, przy czym pierwszy cykl ma charakter pomiaru bazowego – zapewniającego dane wyjściowe do oceny spadku emisji.

Dwutlenek węgla, do którego odnoszone są stężenia PM10, stanowi poziom odniesienia dostarczający przybliżonej informacji o mocy źródła, przy stężeniu zmieniającym się w zależności od odległości od emitora i parametrów meteorologicznych w sposób niemal identyczny jak PM10. W rezultacie iloraz stężeń CO₂ i PM10 w nieznacznym tylko stopniu zależy od mocy źródła, od temperatury powietrza i innych zmiennych czynników meteorologicznych (siła i kierunek wiatru, wilgotność powietrza, wysokość warstwy mieszania itp.), nie zmienia się także w zależności od położenia punktu pomiaru względem emitora i osi strumienia spalin (w przyjętym zakresie odległości), zależy natomiast od jakości prowadzenia procesu spalania i wielkości związanej z tym emisji pyłów. Podobne zależności mają miejsce podczas spalania biopaliw stałych.

Monitoring dronowy prowadzony zgodnie z metodyką ITPE obejmuje pomiar zanieczyszczeń w smudze spalin emitowanych z budynków mieszkalnych. Metodyka ta pozwala na uniezależnienie mierzonych stężeń pyłu od mających na nie silny wpływ parametrów meteorologicznych, jak też stopnia obciążenia urządzeń grzewczych. Można ją stosować w związku z tym do obiektywnej oceny zmian wielkości emisji z urządzeń grzewczych.

Zgromadzone dane, wraz z danymi pozyskanymi w kolejnych latach trwania projektu, umożliwią wykonanie działań pozwalających na monitorowanie dynamiki zmian emisji pyłów pochodzących ze źródeł ciepła zlokalizowanych na obszarze „hot-spotu”.

W przypadku wykrycia w spalinach gazów świadczących o współspalaniu odpadów, będą o tym natychmiast informowane odpowiednie dla danego rejonu służby mające uprawnienia do przeprowadzenia bezpośredniej kontroli źródła emisji i kotłowni.

Pojedynczy pomiar dla każdego emitora będzie skutkował obliczeniem wskaźnika PDW (stosunek CO₂ do PM10). Wskaźnik ten w postaci 5 wartości dla każdego „hot-spotu”, odpowiadających kolejnym latom pomiarowym, będzie wykorzystany do:

- ❖ przedstawienia statystyki opisowej charakteryzującej każdy hot-spot,
- ❖ dokonania porównania poszczególnych hot spotów pod kątem średniego stężenia PM10,

- ❖ ilościowej (procentowej) oceny zmiany stężeń pyłu PM10 (wzrost/spadek) dla każdego „hot-spotu” w okresie 5-letnim,
- ❖ oszacowania efektu ekonomicznego wprowadzanych na terenie „hot-spotów” zmian w postaci stosunku nakładów do uzyskanego spadku wskaźnika PDW (w tym celu wymagane są dodatkowe informacje nt. wymiany źródeł emisji w hot spotach).

Opisane loty pomiarowe dronem posiadają także efekty niemierzalne o charakterze informacyjno-edukacyjnym, obejmujące:

- ❖ podniesienie kompetencji służb kontrolnych odpowiedzialnych na realizację kontroli indywidualnych urządzeń grzewczych w zakresie wykrywania procederu nielegalnego spalania lub współspalania odpadów oraz przestrzegania przepisów uchwały antysmogowej w zakresie eksploatowanych urządzeń grzewczych i spalanych paliw stałych,
- ❖ określenie, w cyklu corocznym, stopnia redukcji poziomu stężeń zanieczyszczeń w „hot spotach” w odniesieniu do założeń redukcyjnych wskazanych w POP 2020,
- ❖ wskazanie obszarów wymagających, w pierwszej kolejności, intensyfikacji działań na rzecz ograniczania niskiej emisji,
- ❖ zwiększenie świadomości mieszkańców województwa śląskiego w zakresie oddziaływania indywidualnych urządzeń grzewczych na jakość powietrza w bezpośrednim sąsiedztwie ich domów, poprzez prezentację danych dotyczących zmierzonych stężeń pyłu w gazach spalinowych.

Drugie z realizowanych działań, obejmujące ciągłe pomiary stężeń pyłu PM10 przez urządzenia stacjonarne zainstalowane w wybranych punktach „hot-spotów”, realizuje wprost monitoring jakości powietrza pod kątem stężenia pyłu PM10. Biorąc pod uwagę specyficzne miejsca (obszary o dużym ruchu osób, często przy uczęszczanych obiektach użyteczności publicznej)) i wysokości ulokowania mierników (2 – 4 m nad poziom terenu) ich wskazania odbiegają od wskazań stacji Państwowego Monitoringu Środowiska, wierniej oddając zagrożenia związane z oddziaływaniem pyłów na ludzi długotrwale przebywających w granicach „hot-spotu”. Niniejszy projekt kładzie nacisk na indywidualne urządzenia grzewcze jako podstawowe źródła wysokich poziomów stężeń w „hot-spotach” o charakterze miejskim, w związku z czym dane pomiarowe z urządzeń stacjonarnych prezentowane w niniejszym raporcie dotyczą okresu

grzewczego – od momentu zainstalowania mierników, do końca sezonu grzewczego (styczeń – kwiecień 2023).

Wypracowane wytyczne do określania „hot-spotów” oraz monitorowania efektów wdrażania uchwały antyśmogowej będą mogły być wykorzystywane przez gminy i województwa na terenie całego kraju oraz w innych krajach. Zadanie stanowi bezpośrednią realizację zapisów POP [realizacja zadania POP – sekcja 1.8.2, str. 181, sekcja 1.8.4, od str. 185]

2 Metodyka pomiarów

2.1 Pomiary z wykorzystaniem dronów

Pomiary względnych wartości stężeń PM10 (w odniesieniu do CO₂) zrealizowano za pomocą profesjonalnych dronów przemysłowych, które wyposażone zostały w układy pomiarowe zawierające czujniki stężeń w/w substancji. Loty odbywały się w sezonie grzewczym (13.02-5.04.2023) w godzinach porannych (7:00-10:00) lub późnopołudniowych/wieczornych (15:00-19:00). Na terenie każdego z wytypowanych „hot-spotów” pomiar przeprowadzany był 3-krotnie (w różnych dniach lub o różnych porach). Pomiar obejmował przelot dronem nad wszystkimi budynkami znajdującymi się w danym „hot-spocie” (30-50 budynków) oraz określenie oraz zachowanie w pamięci miernika drona stężeń PM10 i CO₂ w smudze spalin nad ich kominami (Rys.1). Każdy pomiar nad emitorem trwał ok. 60 s, a przelot pomiarowy nad całym „hot-spotem” ok. 1h. W trakcie pomiaru na bieżąco prowadzono obserwację (realizowaną przez dodatkowego operatora) dynamiki zmian wartości stężeń nad poszczególnymi emitorami.



Rys. 1. Pomiar stężeń PM10 i CO₂ nad emitorem w jednym z hot-spotów.

W ramach każdego pomiaru dron wykonywał loty w standardzie obejmującym:

- ❖ dokonanie obserwacji kierunku i prędkości wiatru oraz temperatury powietrza,
- ❖ dołot do strumienia gazów odlotowych po zawietrznej stronie komina budynku,
- ❖ wykonanie zawisu w odległości 1 - 2 m od komina o czasie ok. 60 s, możliwie jak najbliżej osi strumienia gazów odlotowych,
- ❖ pomiar stężeń PM10 i CO₂ (oraz ewentualnie zanieczyszczeń charakterystycznych dla współspalania odpadów),
- ❖ dokonanie odczytu współrzędnych i godziny pomiaru i przypisanie im wartości zmierzonych stężeń.

2.2 Pomiary stacjonarne

W celu wsparcia pomiarów dronowych prowadzonych na terenie wytypowanych „hot-spotów” oraz oceny zmian jakości powietrza w następstwie wdrażania zapisów śląskiej uchwały „antysmogowej” (Uchwała Nr V/36/1/2017 Sejmiku Województwa Śląskiego z dnia 7 kwietnia 2017 r.), w okresie jej wprowadzania w życie – (tj. do końca roku 2027), na terenie wytypowanych obszarów zainstalowano czujniki pyłu zawieszonego (Rys. 2). Rozmieszczone na terenie gminy zestawy pomiarowe składają się z miernika stężeń PM1, PM2,5 i PM10 oraz temperatury i wilgotności, a także modułu GSM zapewniającego przesyłanie danych pomiarowych w czasie rzeczywistym.



Rys. 2. Widok ogólny czujnika pyłu zawieszonego z modułem GSM (po lewej).

Czujniki zamontowano na obrzeżach każdego „hot-spotu” w 3 różnych punktach pomiarowych leżących po zawiętrznej stronie obszaru, względem kierunku dominujących wiatrów. Miejsca ich zamontowania zaznaczono na mapach obrazujących trasy przelotów dronem nad „hot-spotem” (Rys. 4-16). Na Rys. 3 i 4 przedstawiono przykładowe fotografie miejsc zamontowania czujnika w widoku na zewnątrz budynku oraz od środka.



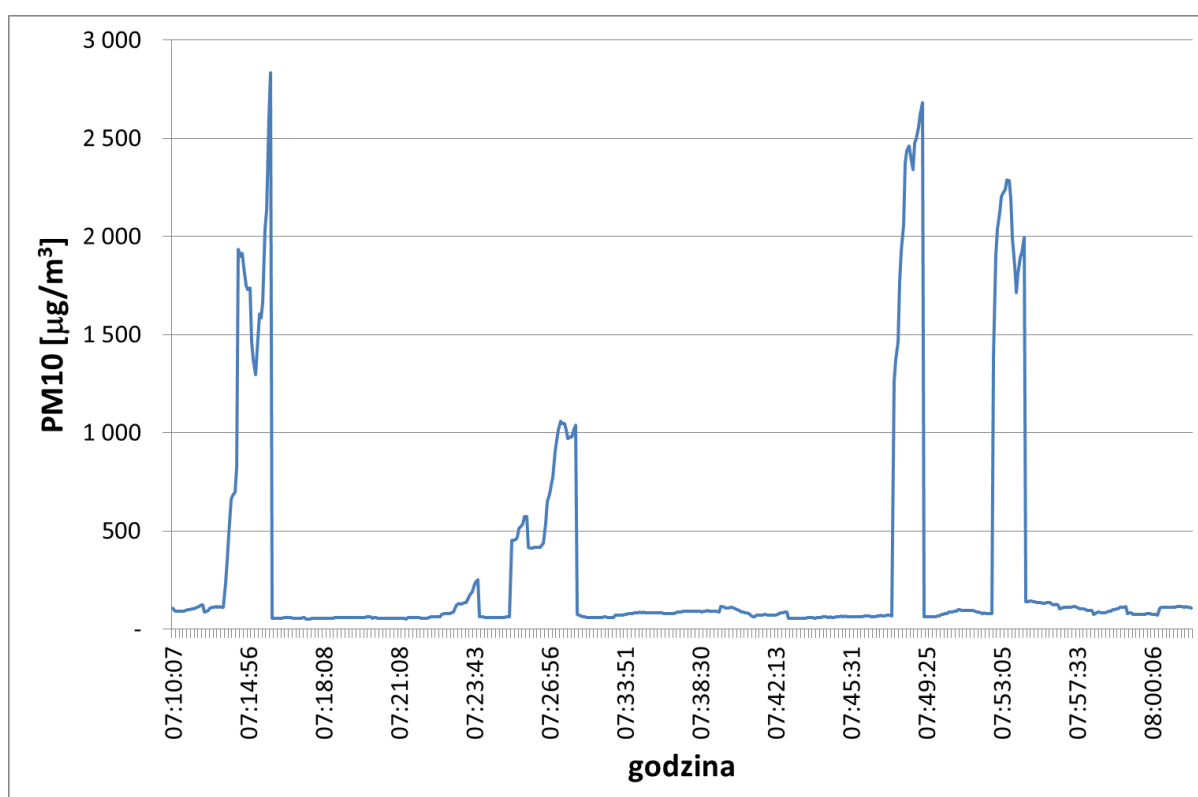
Rys. 3. Zainstalowany czujnik pyłu zawieszonego - widok od środka pomieszczenia.



Rys. 4. Zainstalowany czujnik pyłu zawieszonego - widok na zewnątrz budynku.

3 Wyniki kampanii pomiarowej

W Tab. 1-30 przedstawiono średnie wartości stężeń nad emitarami, z których emisja w trakcie pomiaru przekraczała wartości stężeń tła – w praktyce obrazowały to chwilowe wzrosty (piki) na wykresach przebiegu stężeń (Rys. 5), a w realiach pomiarowych mniej lub bardziej widoczna emisja nad emitorem (widoczne gazy odlotowe – Rys. 6). Przedstawione w tabelach wartości tła to średnie wartości rejestrowane przez czujniki zamontowane na dronie w trakcie przelotu pomiędzy emitarami lub nad niedymiącymi emitarami. Tabele zawierają również wyliczone wartości wskaźnika PDW (stosunek CO₂/PM10).



Rys. 5. Przykładowy przebieg zmian stężeń PM10 w trakcie jednego przelotu pomiarowego nad hot-spotem (Częstochowa, 14.02.2023, rano). Widoczne piki odpowiadają wzrostom stężeń nad emitarami.



Rys. 6. Dron podczas pomiaru nad dymiącym emitorem.

Na mapach (Rys. 7-16) przedstawiono natomiast trasy poszczególnych przelotów nad każdym z „hot-spotów” wraz z naniesionymi lokalizacjami montażu czujników stacjonarnych.

Tabela 1. Miedźno, 15.02.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		66,8 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	578,2 CO ₂ [ppm]	8,7 PDW
1	M11	476,3	616,2	1,3
2	M12	107,4	578,5	5,4
3	M13	125,4	578,3	4,6
4	M14	980,7	578,2	0,6
5	M15	159,8	635,2	4,0
6	M16	622,7	578,4	0,9
7	M17	94,4	578,1	6,1
8	M18	119,7	579,2	4,8
9	M19	180,4	656,3	3,6
10	M110	705,6	583,4	0,8
11	M111	153,0	578,0	3,8
Średnia		338,7	594,5	3,3

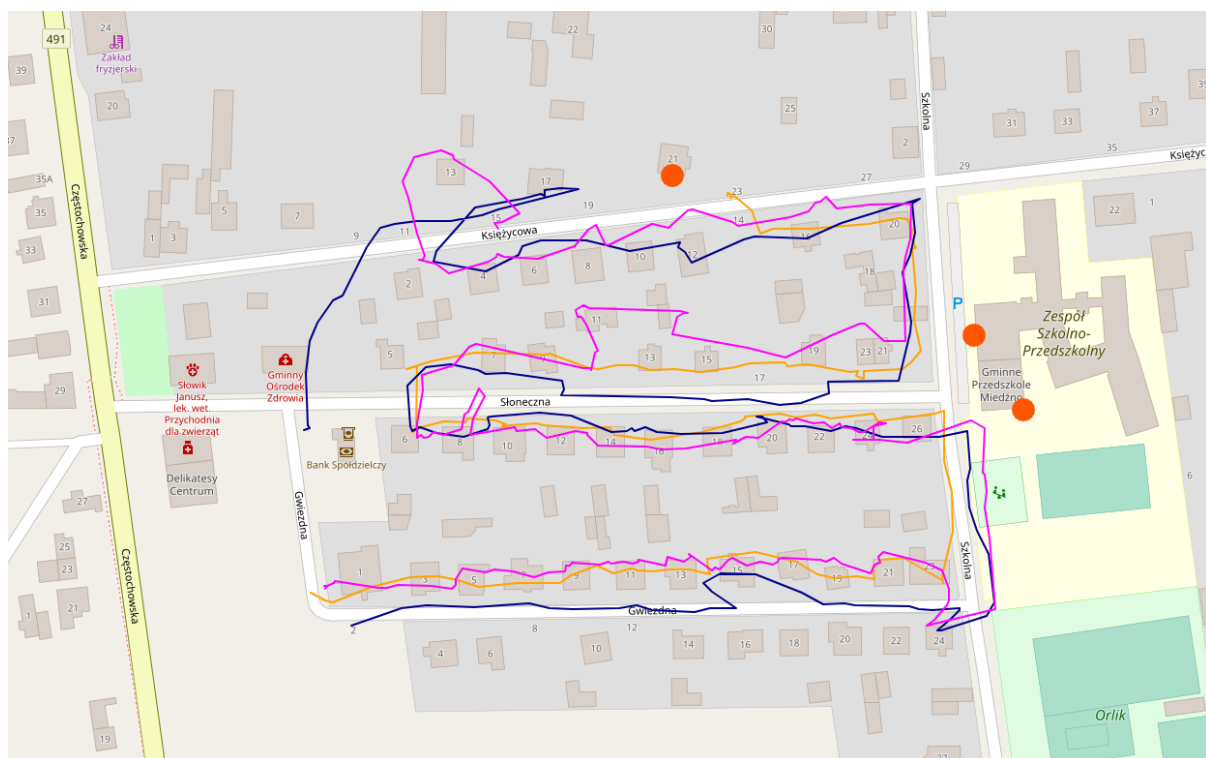
Tabela 2. Miedźno, 22.02.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		50,9 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	578,2 CO ₂ [ppm]	11,4 PDW
1	M21	286,3	587,9	2,1
2	M22	222,7	578,6	2,6
3	M23	57,8	578,3	10,0
4	M24	380,2	597,0	1,6
5	M25	91,8	578,1	6,3

6	M26	136,6	578,0	4,2
7	M27	256,7	578,0	2,3
Średnia		204,6	582,3	4,1

Tabela 3. Miedźno, 27.02.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tł0		
		33,0 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	579,2 CO ₂ [ppm]	17,6 PDW
1	M31	51,4	579,6	11,3
2	M32	127,3	580,2	4,6
3	M33	142,2	579,4	4,1
4	M34	110,8	579,2	5,2
5	M35	213,2	579,2	2,7
6	M36	135,2	579,2	4,3
7	M37	102,2	579,0	5,7
Średnia		126,0	579,4	5,4



Rys. 7. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Miedźnie. Kolor pomarańczowy – 15.02.2023, granatowy – 22.02.2023, różowy – 27.02.2023. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 4. Koszęcin, 16.02.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tł0		
		62,9 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	481,2 CO ₂ [ppm]	7,7 PDW
1	K11	131,9	481,4	3,6
2	K12	214,3	481,2	2,2
3	K13	219,5	481,4	2,2
4	K14	905,0	481,1	0,5

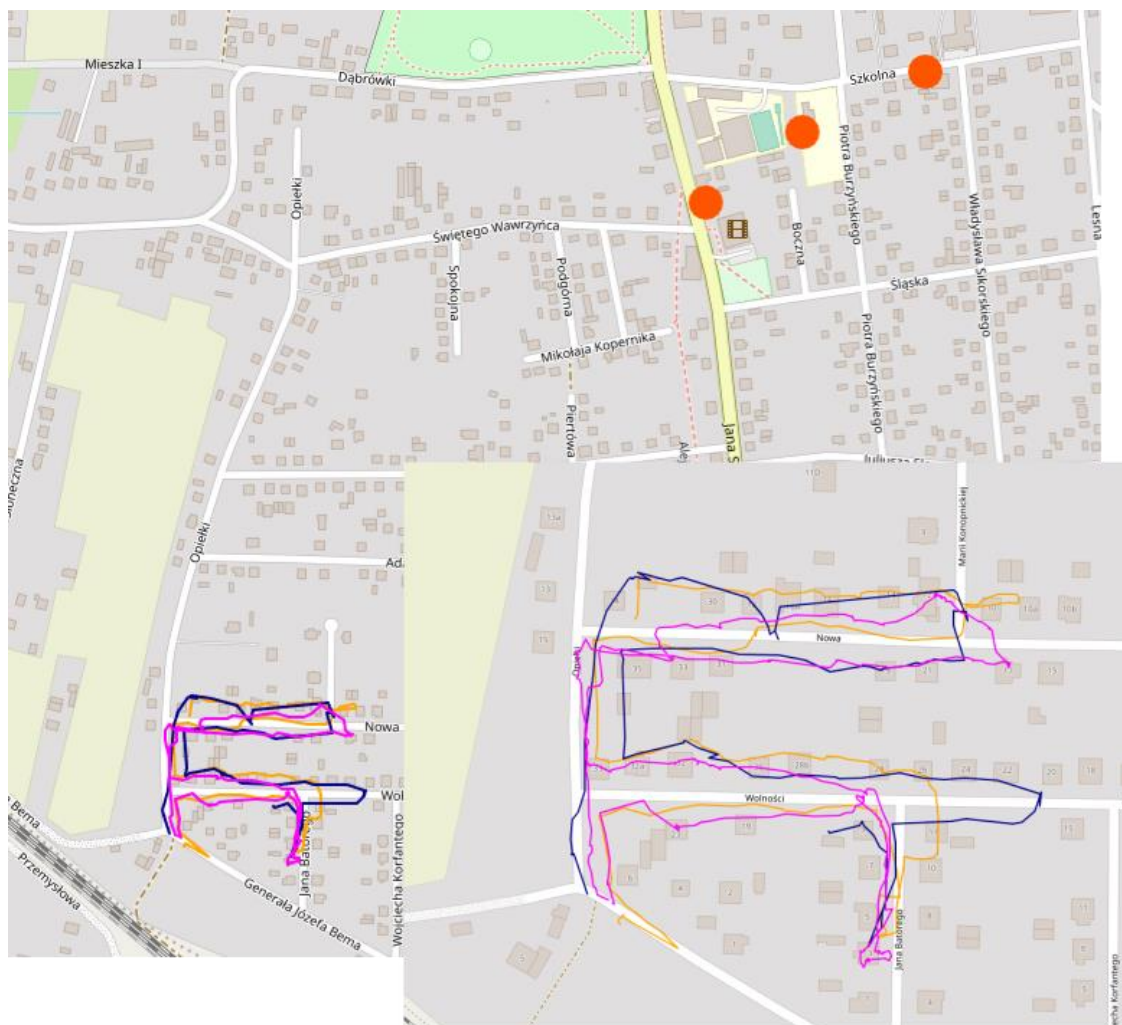
5	K15	99,6	481,1	4,8
6	K16	516,1	493,9	1,0
Średnia		347,7	483,4	2,4

Tabela 5. Koszęcin, 23.02.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		68,9 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	577,9 CO ₂ [ppm]	8,4 PDW
1	K21	412,3	578,3	1,4
2	K22	641,2	582,1	0,9
3	K23	212,8	578,0	2,7
4	K24	892,4	577,8	0,6
5	K25	97,7	578,1	5,9
Średnia		451,3	578,9	2,3

Tabela 6. Koszęcin, 07.03.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		39,0 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	481,3 CO ₂ [ppm]	12,3 PDW
1	K31	239,6	481,3	2,0
2	K32	172,1	600,6	3,5
3	K33	445,4	497,1	1,1
4	K34	543,8	481,3	0,9
Średnia		350,2	515,1	1,9



Rys. 8. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Koszęcinie oraz mapa lokalizacji „hot-spotu” względem czujników stacjonarnych. Kolor pomarańczowy – 16.02.2023, granatowy – 23.02.2023, różowy – 07.03.2023. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 7. Rybnik, 02.03.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		57,1 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	577,9 CO ₂ [ppm]	10,1 PDW
1	R11	994,6	578,6	0,6
2	R12	386,6	579,2	1,5
3	R13	542,1	578,0	1,1
4	R14	723,2	587,8	0,8
5	R15	421,2	577,8	1,4
Średnia		613,5	580,3	1,1

Tabela 8. Rybnik, 08.03.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		31,0 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	481,3 CO ₂ [ppm]	15,5 PDW

1	R21	54,3	481,3	8,9
2	R22	54,0	481,3	8,9
3	R23	50,2	481,3	9,6
Średnia		52,8	481,3	9,1

Tabela 9. Rybnik, 14.03.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		15,9	480,0	30,2
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	R31	67,8	481,2	7,1
2	R32	40,2	481,1	12,0
Średnia		54,0	481,2	9,6



Rys. 9. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Rybniku oraz mapa lokalizacji „hot-spotu” względem czujników stacjonarnych. Kolor pomarańczowy – 02.03.2023, granatowy – 08.03.2023, różowy – 14.03.2023. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 10. Węgierska Górka, 28.02.2023

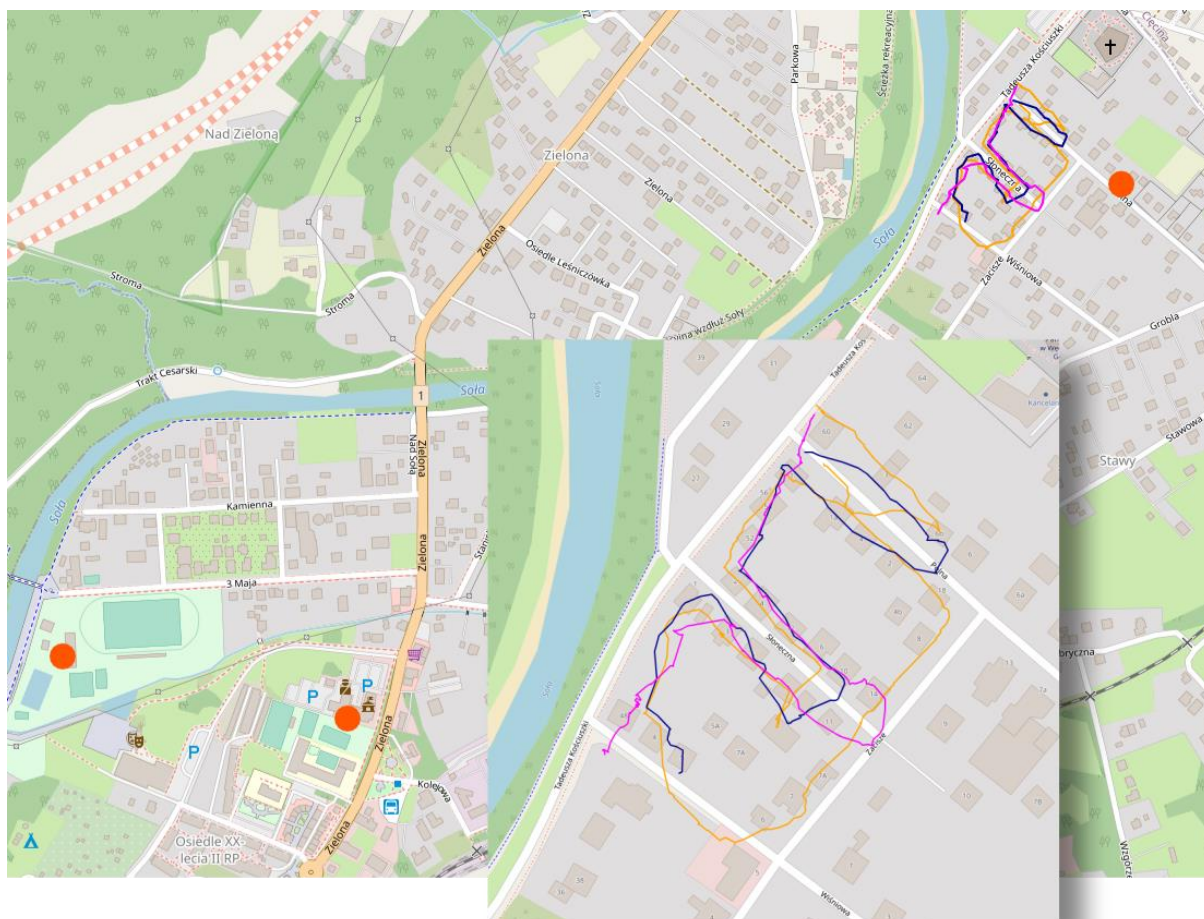
Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		33,9	579,1	17,1
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	WG11	1 226,0	579,4	0,5
2	WG12	530,4	591,6	1,1
3	WG13	142,4	631,3	4,4
4	WG14	41,5	578,8	14,0
Średnia		485,1	595,3	5,0

Tabela 11. Węgierska Górka, 06.03.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		53,5	481,3	9,0
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	WG21	941,6	481,27	0,5
2	WG22	1 322,0	481,29	0,4
3	WG23	187,8	481,31	2,6
4	WG24	873,9	481,28	0,6
5	WG25	109,5	481,28	4,4
Średnia		687,0	481,3	1,7

Tabela 12. Węgierska Górka, 15.03.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		24,7	481,2	19,5
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	WG31	1 047,5	481,2	0,5
2	WG32	596,7	481,2	0,8
3	WG33	579,3	481,2	0,8
Średnia		741,2	481,2	0,7



Rys. 10. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Węgierskiej Górze oraz mapa lokalizacji „hot-spotu” względem czujników stacjonarnych. Kolor pomarańczowy – 28.02.2023, granatowy – 06.03.2023, różowy – 15.03.2023. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 13. Żywiec, 20.03.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		107,8 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	481,1 CO ₂ [ppm]	4,5 PDW
1	Z11	852,8	516,0	0,6
2	Z12	123,0	481,3	3,9
3	Z13	174,3	481,2	2,8
4	Z14	308,8	481,2	1,6
5	Z15	637,5	481,1	0,8
6	Z16	382,2	481,0	1,3
7	Z17	367,0	481,0	1,3
Średnia		406,5	486,1	1,7

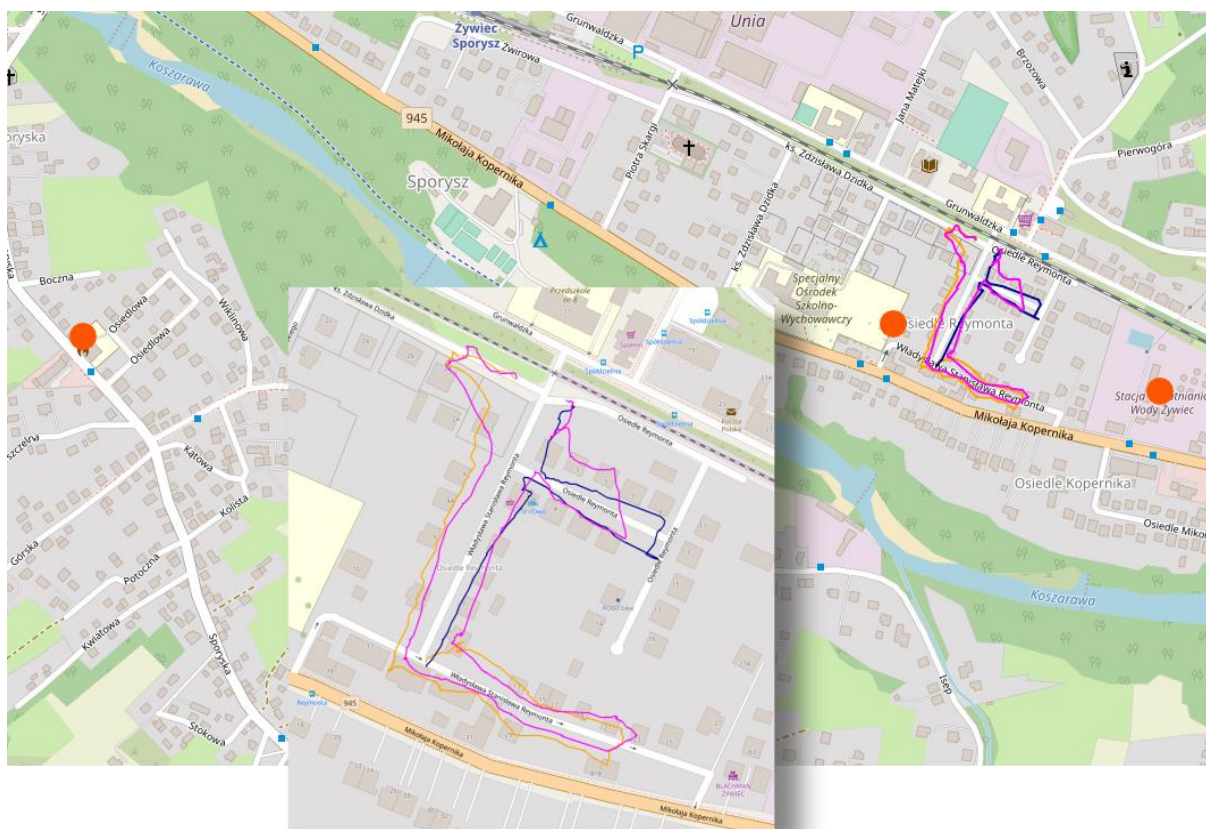
Tabela 14. Żywiec, 29.03.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		93,2 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	481,1 CO ₂ [ppm]	5,2 PDW
1	Z21	269,9	481,0	1,8

2	Z22	753,9	481,1	0,6
3	Z23	306,9	481,1	1,6
4	Z24	257,0	481,1	1,9
5	Z25	1 030,5	481,1	0,5
6	Z26	1 040,6	481,0	0,5
Średnia		609,8	481,1	1,1

Tabela 15. Żywiec, 05.04.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		52,4 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	481,2 CO ₂ [ppm]	9,2 PDW
1	Z31	130,1	481,2	3,7
2	Z32	508,3	481,3	0,9
3	Z33	529,2	481,2	0,9
4	Z34	1 094,3	481,2	0,4
5	Z35	182,5	481,2	2,6
Średnia		488,9	481,2	1,7



Rys. 11. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Żywcu oraz mapa lokalizacji „hot-spotu” względem czujników stacjonarnych. Kolor pomarańczowy – 20.03.2023, granatowy – 29.03.2023. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 16. Częstochowa, 13.02.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		83,1	486,8	5,9

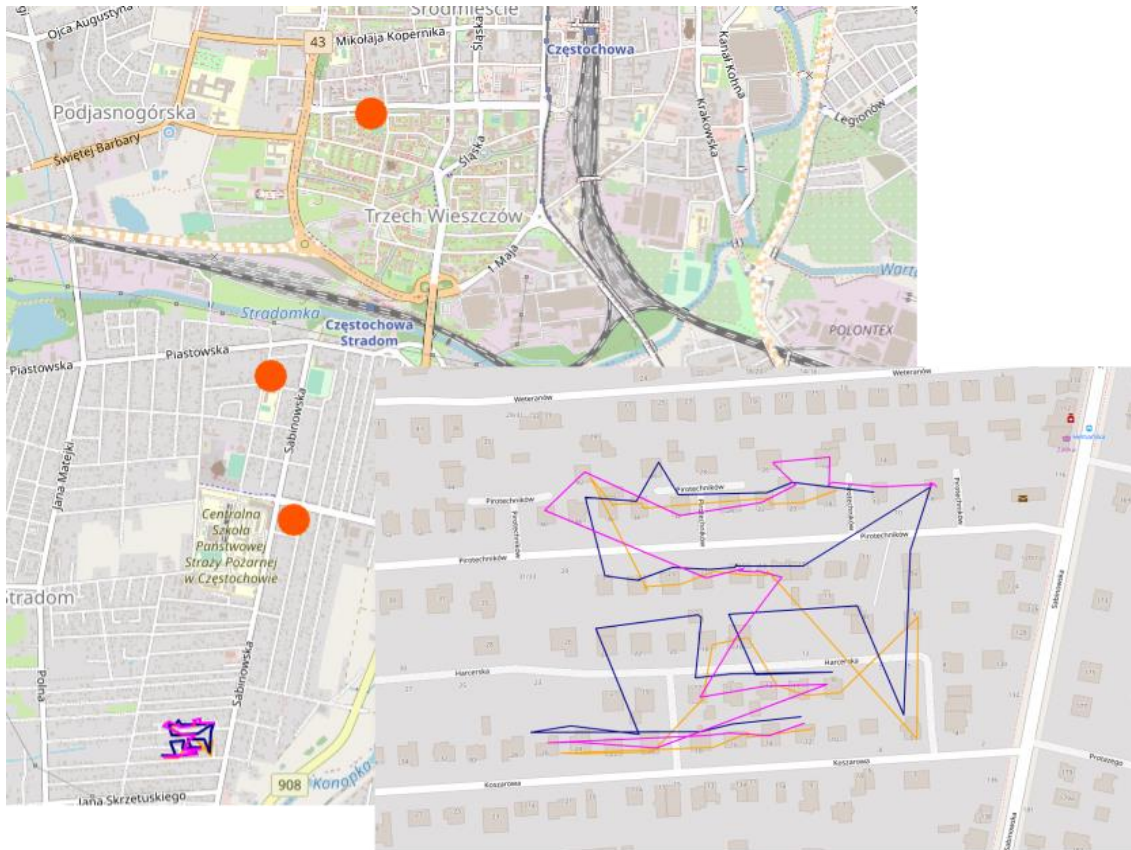
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO₂ [ppm]	PDW
1	C11	495,3	481,4	1,0
2	C12	286,0	487,5	1,7
3	C13	1 760,7	875,9	0,5
4	C14	1 987,8	681,9	0,3
5	C15	439,1	518,2	1,2
6	C16	325,4	485,9	1,5
7	C17	195,4	495,7	2,5
8	C18	705,8	498,3	0,7
Średnia		774,4	565,6	1,2

Tabela 17. Częstochowa, 14.02.2023 (rano)

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		51,1	486,7	9,5
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO₂ [ppm]	PDW
1	C21	758,6	543,5	0,7
2	C22	1 232,4	605,6	0,5
3	C23	101,2	486,2	4,8
4	C24	394,6	569,0	1,4
5	C25	622,7	1 198,9	1,9
6	C26	1 345,0	485,7	0,4
7	C27	1 241,9	521,3	0,4
Średnia		813,8	630,0	0,8

Tabela 18. Częstochowa, 14.02.2023 (wieczorem)

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		122,8	490,8	4,0
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO₂ [ppm]	PDW
1	C31	659,9	470,8	0,7
2	C32	1 733,3	681,5	0,4
3	C33	266,9	491,8	1,8
4	C34	2 205,7	486,3	0,2
5	C35	388,9	485,0	1,2
6	C36	248,7	489,9	2,0
7	C37	1 360,2	504,4	0,4
8	C38	2 566,3	743,5	0,3
9	C39	688,5	507,0	0,7
Średnia		1 124,2	540,0	0,9



Rys. 12. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Częstochowie oraz mapa lokalizacji „hot-spotu” względem czujników stacjonarnych. Kolor pomarańczowy – 13.02.2023, granatowy – 14.02.2023 rano, różowy – 14.02.2023 wieczorem. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 19. Woźniki, 15.02.2023 (rano)

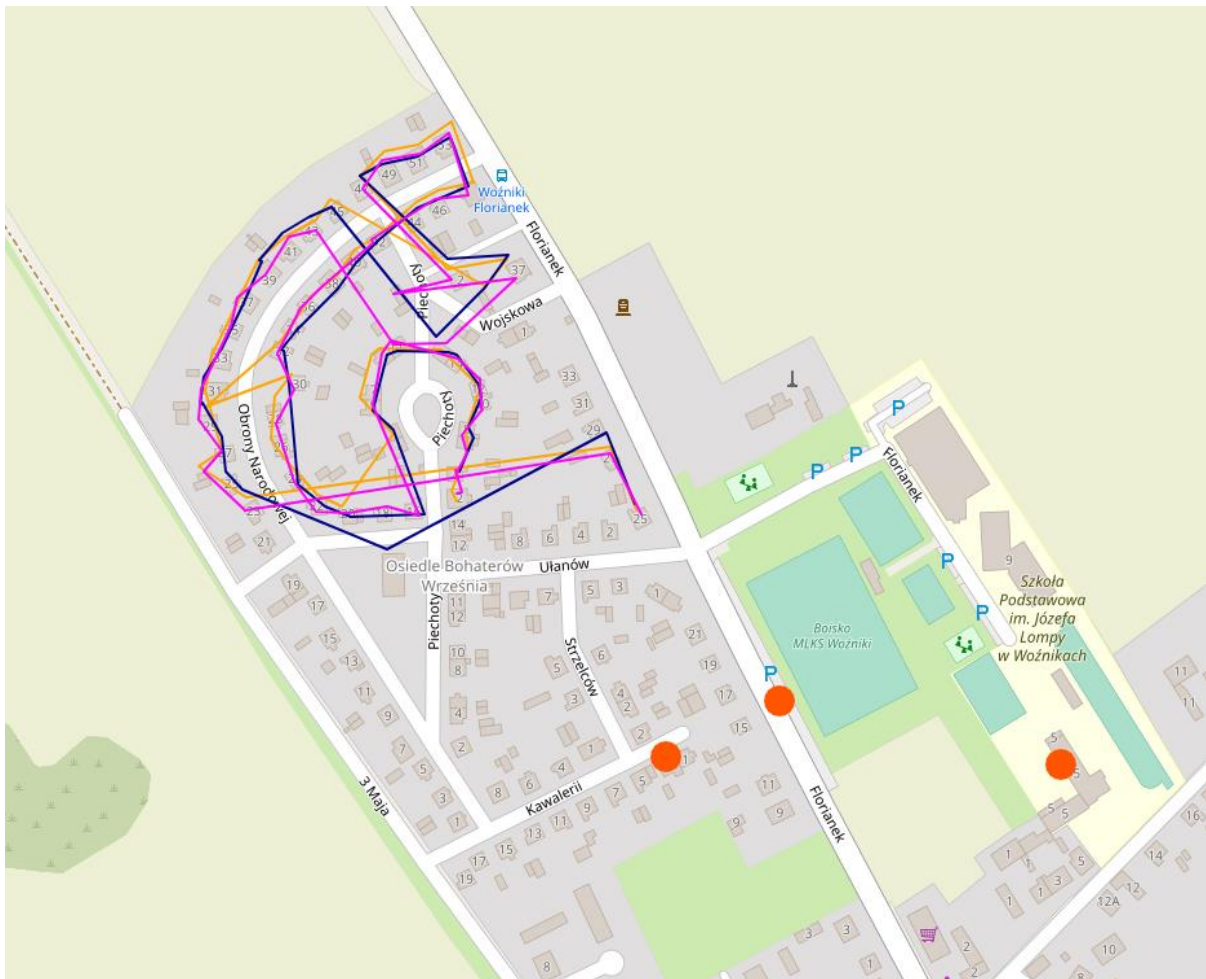
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		111,2 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	490,3 CO ₂ [ppm]	4,4 PDW
1	W11	159,7	474,1	3,0
2	W12	383,8	519,6	1,4
3	W13	2 379,9	474,8	0,2
4	W14	1 046,4	517,4	0,5
5	W15	485,0	485,9	1,0
6	W16	228,2	493,2	2,2
7	W17	830,6	488,2	0,6
8	W18	307,3	532,4	1,7
9	W19	1 731,5	565,92	0,3
10	W20	1 672,7	567,51	0,3
11	W21	265,8	488,07	1,8
12	W22	1 201,5	737,43	0,6
Średnia		891,0	528,7	1,1

Tabela 20. Woźniki, 15.02.2023 (wieczorem)

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		39,2	481,8	12,3
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	W21	969,4	721,9	0,7
2	W22	1 142,8	485,4	0,4
3	W23	653,2	517,9	0,8
4	W24	1 118,3	483,9	0,4
5	W25	148,4	502,5	3,4
6	W26	1 611,7	481,3	0,3
7	W27	1 433,6	625,7	0,4
8	W28	2 055,7	579,9	0,3
Średnia		1 141,7	549,8	0,8

Tabela 21. Woźniki, 23.02.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		46,3	513,4	11,1
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	W31	146,5	515,9	3,5
2	W32	1 182,3	652,0	0,6
3	W33	471,0	668,4	1,4
4	W34	581,7	677,3	1,2
5	W35	249,7	511,2	2,0
6	W36	294,0	505,9	1,7
7	W37	242,0	508,9	2,1
8	W38	182,4	513,8	2,8
9	W39	1 527,0	585,0	0,4
10	W310	138,7	510,0	3,7
Średnia		501,5	564,8	1,9



Rys. 13. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Woźnikach. Kolor pomarańczowy – 15.02.2023 rano, granatowy – 15.02.2023 wieczorem, różowy – 23.02.2023. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 22. Krzepice, 22.02.2023 (rano)

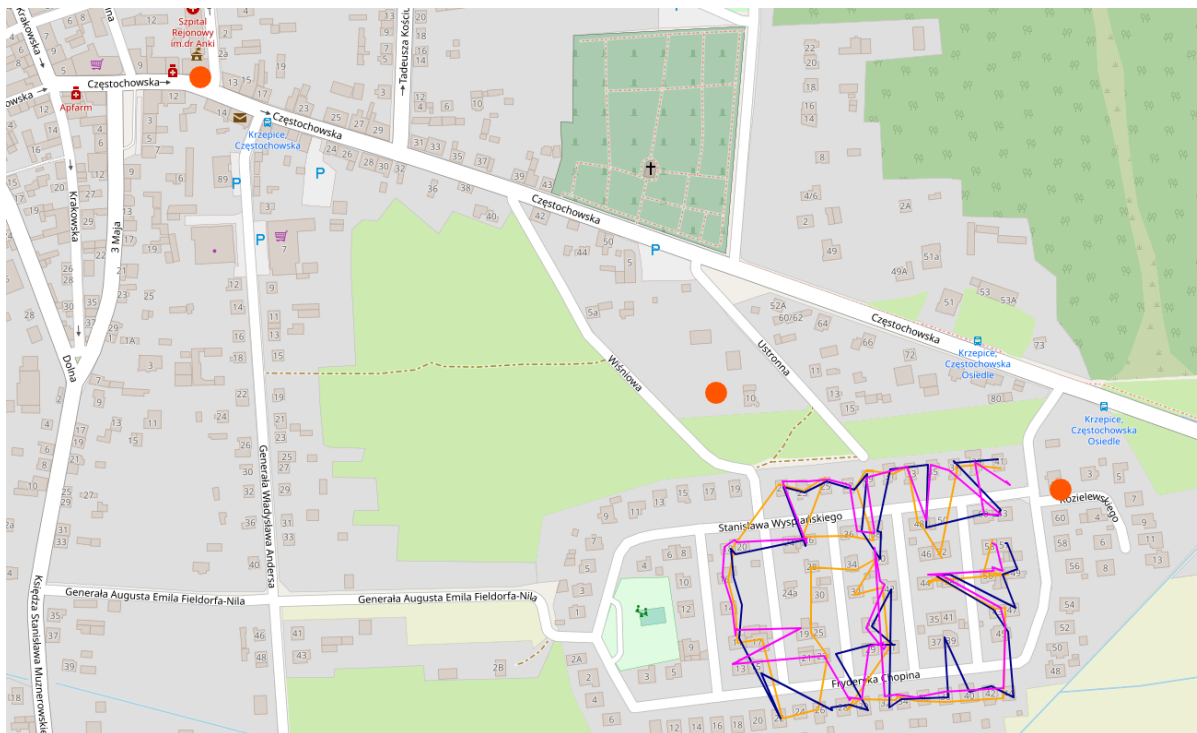
Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		102,7 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	499,9 CO ₂ [ppm]	4,9 PDW
1	KR11	233,4	485,3	2,1
2	KR12	968,8	675,7	0,7
3	KR13	1 121,9	1 010,5	0,9
4	KR14	2 378,9	692,9	0,3
5	KR15	1 627,7	522,7	0,3
6	KR16	1 526,3	528,3	0,3
7	KR17	1 501,2	603,0	0,4
8	KR18	1 471,8	720,7	0,5
9	KR19	254,3	476,6	1,9
10	KR110	217,8	480,7	2,2
11	KR111	192,4	488,1	2,5
12	KR113	665,8	500,9	0,8
Średnia		1 013,4	598,8	1,1

Tabela 23. Krzepice, 22.02.2023 (wieczorem)

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		40,9	522,5	12,8
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	KR21	2 151,3	595,8	0,3
2	KR22	1 087,2	605,5	0,6
3	KR23	732,3	543,9	0,7
4	KR24	744,1	509,2	0,7
5	KR25	2 252,2	936,3	0,4
6	KR26	653,0	566,1	0,9
7	KR27	1 530,8	531,6	0,3
8	KR28	570,6	504,7	0,9
9	KR29	1 053,1	1 107,9	1,1
10	KR210	2 122,8	793,4	0,4
11	KR211	266,3	600,3	2,3
12	KR212	2 187,4	563,5	0,3
13	KR213	145,3	521,8	3,6
14	KR214	195,3	923,5	4,7
15	KR215	1 509,7	766,7	0,5
16	KR216	188,3	576,2	3,1
Średnia		1 086,9	665,4	1,3

Tabela 24. Krzepice, 23.02.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		52,2	526,1	10,1
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	KR31	124,6	526,9	4.2
2	KR32	619,4	545,2	0.9
3	KR33	91,9	521,3	5.7
4	KR34	202,6	631,0	3.1
5	KR35	156,6	537,2	3.4
6	KR36	525,1	535,6	1.0
Średnia		286,7	549,5	3,1



Rys. 14. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Krzepicach. Kolor pomarańczowy – 22.02.2023 rano, granatowy – 22.02.2023 wieczorem, różowy – 23.02.2023. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 25. Bojszowy, 27.02.2023 (rano)

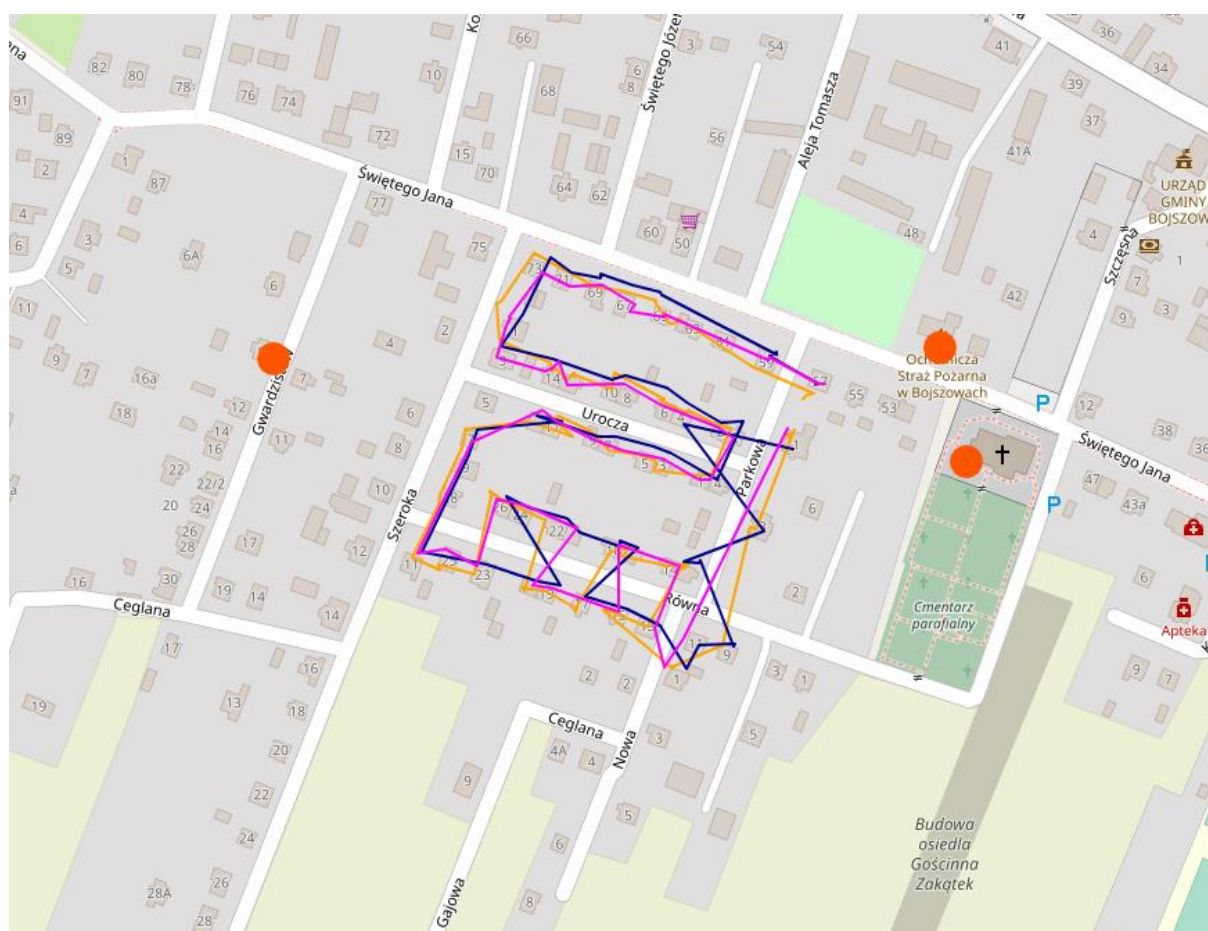
Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		17,8 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	521,9 CO ₂ [ppm]	29,3 PDW
1	B11	113,1	517,4	4,6
2	B12	209,6	525,6	2,5
3	B13	146,6	529,7	3,6
4	B14	69,6	521,0	7,5
5	B15	1 669,2	674,7	0,4
Średnia		441,6	553,7	3,7

Tabela 26. Bojszowy, 27.02.2023 (wieczorem)

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		36,9 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	539,0 CO ₂ [ppm]	14,6 PDW
1	B21	355,9	525,1	1.5
2	B22	1 534,5	530,0	0.3
3	B23	660,7	525,5	0.8
4	B24	257,4	557,6	2.2
5	B25	167,6	552,3	3.3
6	B26	494,1	552,0	1.1
7	B27	253,4	549,3	2.2
8	B28	219,3	547,9	2.5
9	B29	322,7	544,3	1.7
10	B210	738,0	791,6	1.1
Średnia		500,3	567,6	1,7

Tabela 27. Bojszowy, 28.02.2023

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		85,0 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	571,9 CO ₂ [ppm]	6,7 PDW
1	B31	1 567,8	594,3	0,4
2	B32	532,7	590,6	1,1
3	B33	773,3	573,9	0,7
4	B34	1 895,1	1 546,0	0,8
5	B35	578,4	817,4	1,4
6	B36	534,9	595,4	1,1
7	B37	766,9	587,6	0,8
8	B38	1 226,5	553,5	0,5
9	B39	2 085,8	909,9	0,4
10	B310	301,3	655,2	2,2
Średnia		1 026,3	742,4	0,9



Rys. 15. Trasy przelotów dronem nad „hot-spotem” w Bojszowach. Kolor pomarańczowy – 27.02.2023 rano, granatowy – 27.02.2023 wieczorem, różowy – 28.02.2023. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Tabela 28. Ogródzieniec, 20.03.2023 (rano)

Lp.	Nr pomiaru	Tło		
		46,3 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	494,4 CO ₂ [ppm]	10,7 PDW
1	O31	145,8	496,4	3,4
2	O32	1 643,1	505,9	0,3

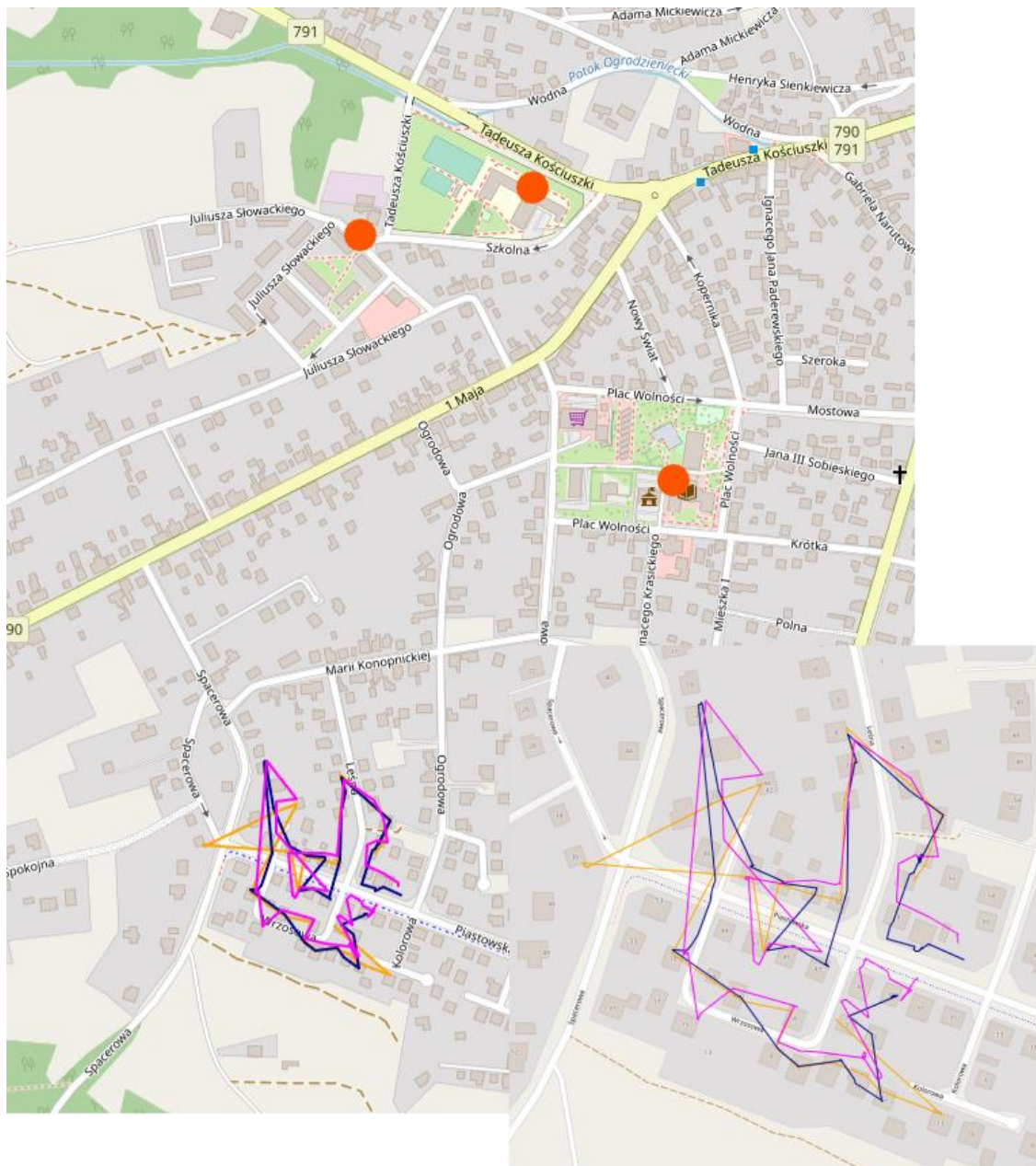
Średnia	894,5	501,2	1,9
----------------	--------------	--------------	------------

Tabela 29. Ogrodzieniec, 20.03.2023 (wieczorem)

Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		54,3	503,4	9,3
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	O11	1 512,4	507,2	0,3
2	O12	527,8	544,5	1,0
3	O13	1 059,0	508,4	0,5
4	O14	1 665,9	532,6	0,3
5	O15	1 436,2	541,9	0,4
6	O16	156,4	509,2	3,3
Średnia		1 059,6	523,9	1,0

Tabela 30. Ogrodzieniec, 21.03.2023

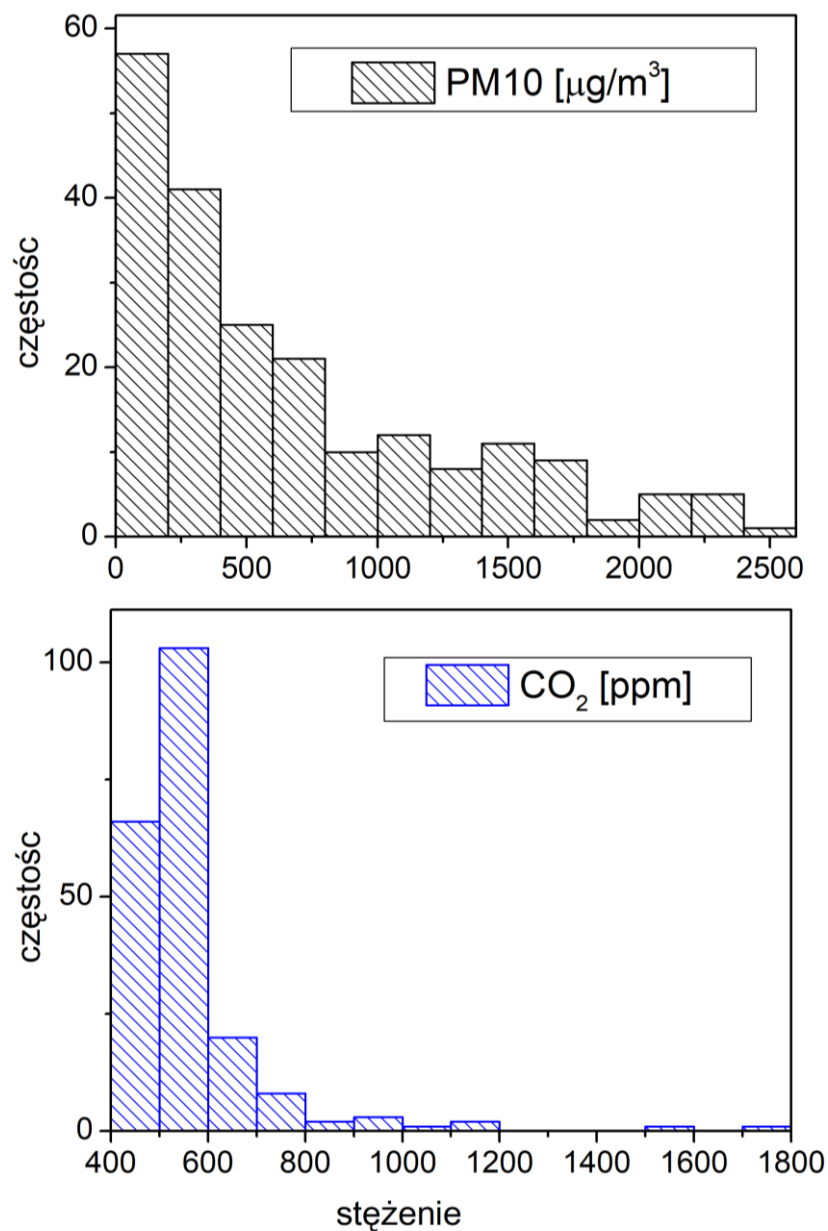
Lp.	Nr pomiaru	Tłó		
		20,5	525,3	25,7
		PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO ₂ [ppm]	PDW
1	O21	185,8	520,4	2,8
2	O22	174,3	525,0	3,0
3	O23	113,7	527,0	4,6
4	O24	551,4	1 713,2	3,1
5	O25	2 330,3	795,0	0,3
Średnia		671,1	816,1	2,8



Rys. 16. Trasy przelotów dronem nad hot-spotem w Ogródzieńcu oraz mapa lokalizacji „hot-spotu” względem czujników stacjonarnych. Kolor pomarańczowy – 20.03.2023 rano, granatowy – 20.03.2023 wieczorem, różowy – 21.03.2023. Pomarańczowe punkty określają lokalizację czujników stacjonarnych.

Zestawienie częstości występowania uzyskanych wartości stężeń PM10 i CO₂ w oparciu o dane przedstawione w Tab. 1-30 (Rys. 17) pokazuje, że w przypadku obu zanieczyszczeń dominują raczej niskie wartości: 74% wartości PM10 pon. 900 µg/m³ (dla zakresu wartości 40-2566 µg/m³) oraz 82% wartości CO₂ poniżej 650 ppm (dla zakresu wartości 471-1713 ppm). Wynika z tego, że wysokie wartości stężeń (PM10 > 900 µg/m³ i CO₂ > 650

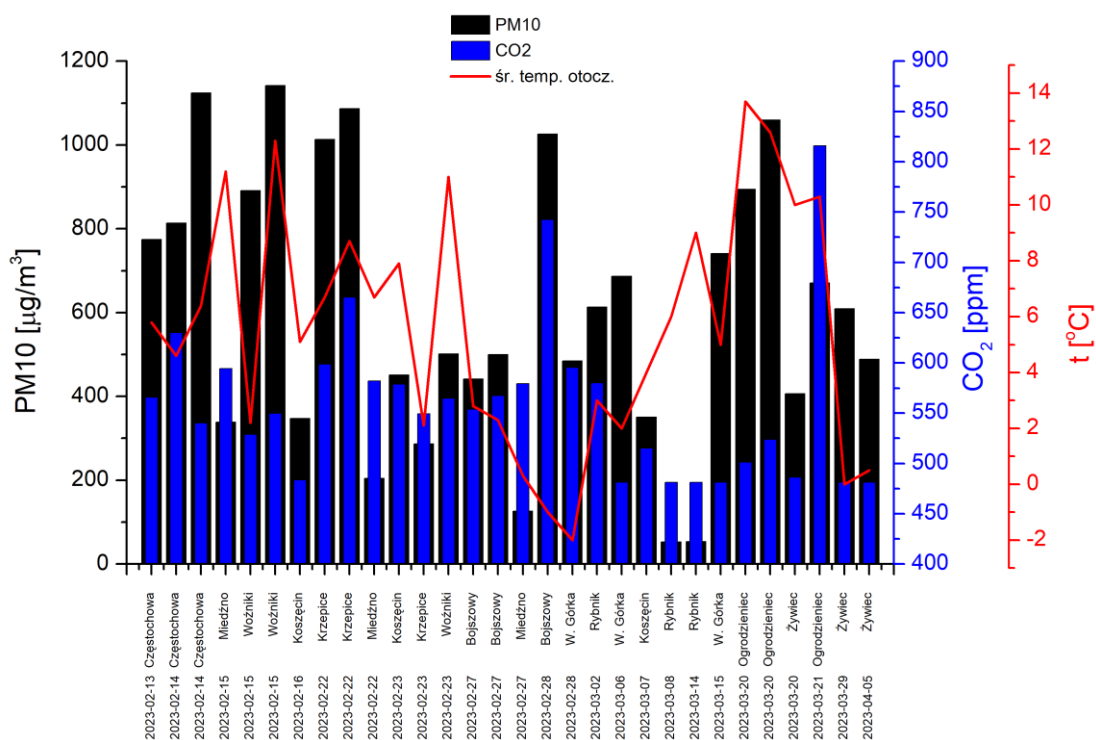
ppm) pochodzące z emitorów domowych ogrzewaczy pomieszczeń zdarzają się stosunkowo rzadko.



Rys. 17. Częstość występowania stężeń PM10 i CO₂ (w %) o wartościach zestawionych w Tab. 1-30.

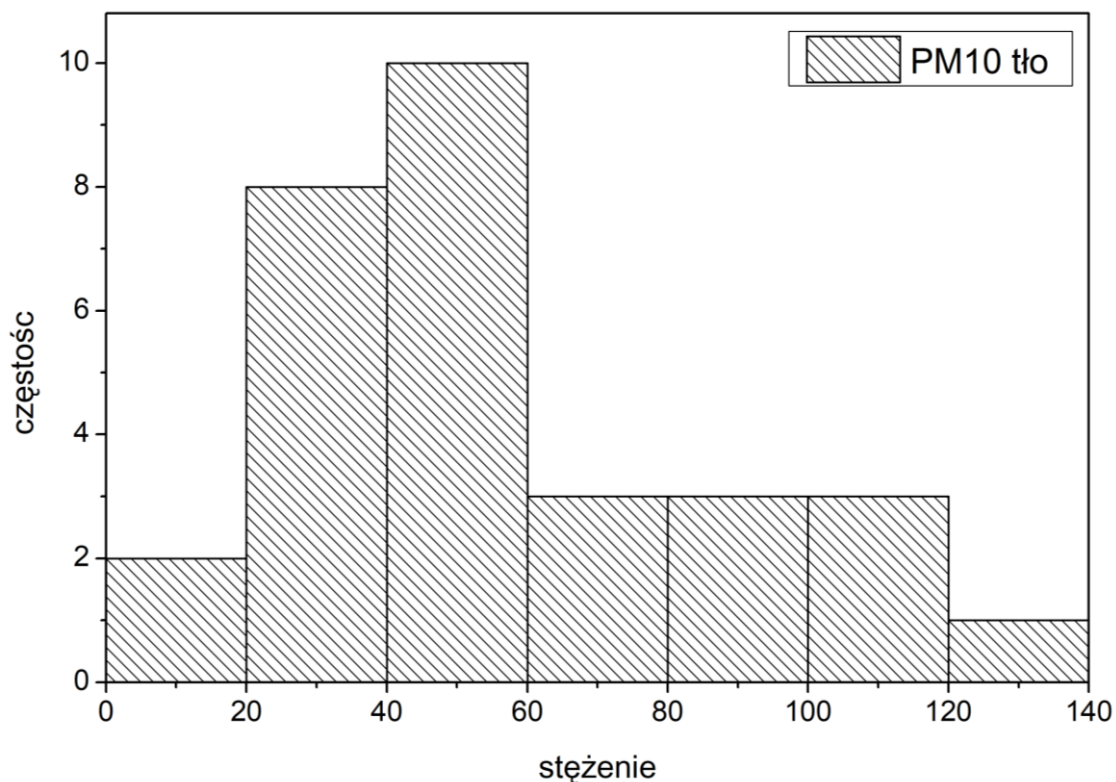
Analizując otrzymane dane można stwierdzić, że wartości stężeń emitowanych zanieczyszczeń (częstości występowania różnych poziomów stężeń PM10 i CO₂) zmieniały się okresowo w trakcie pomiarów, odzwierciedlając powszechną praktykę użytkowania indywidualnych urządzeń grzewczych, w której najważniejszym elementem decydującym o intensywności i jakości prowadzenia spalania, jest temperatura powietrza.

Relacja taka jest dobrze widoczna na wykresie zależności stężeń PM10 i CO₂ nad wylotami kominów w odniesieniu od temperatury powietrza (Rys. 18).



Rys. 18. Chronologiczne zestawienie zmian średnich wartości stężeń PM10 i CO₂ w poszczególnych „hot-spotach” na tle średnich temperatur w dniach pomiarowych.

W Tab. 31 zestawiono średnie wartości stężeń PM10 mierzone za pomocą czujników stacjonarnych w okresie 11.12.2022-30.04.2023 (od momentu ich uruchomienia do końca okresu grzewczego). Wszystkie te wartości, podobnie jak większość średnich wartości tła PM10 zmierzone dronem (Rys. 19), nie przekraczają 80 µg/m³, a mediana średnich oscyluje wokół 46 µg/m³ dla obu rodzaju pomiarów.



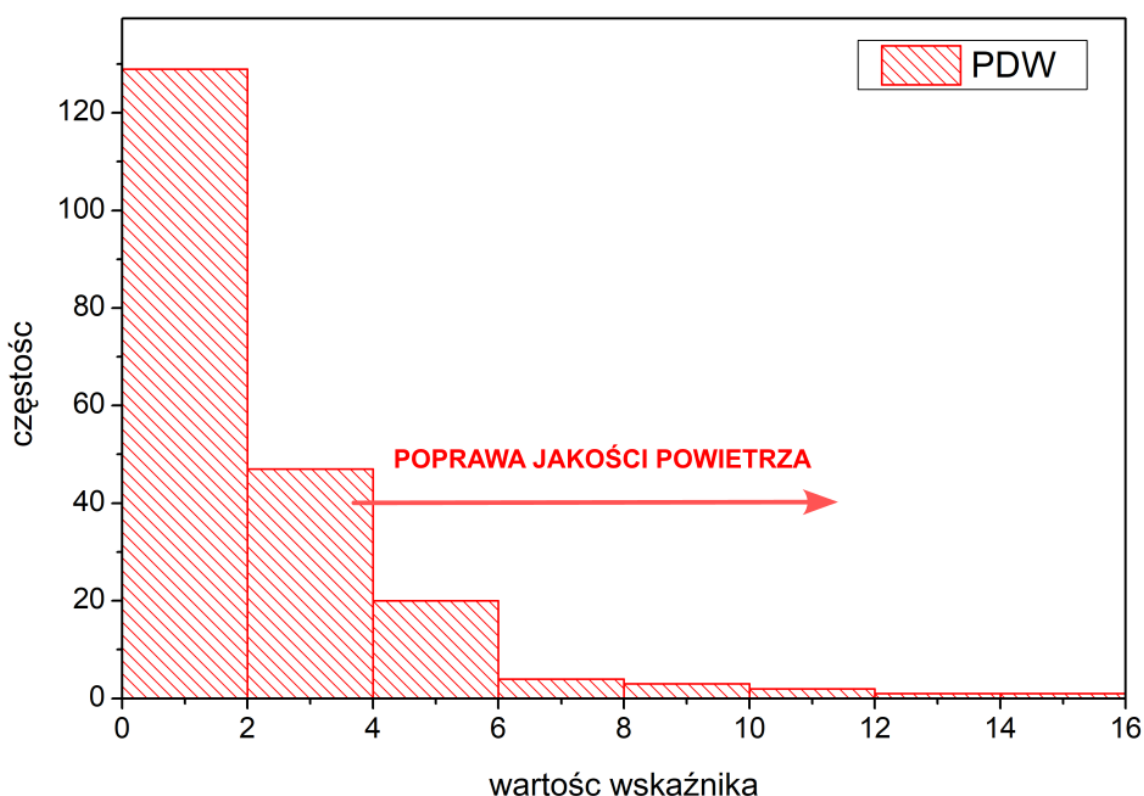
Rys. 19. Częstość występowania średnich wartości PM10 zmierzonego w tle za pomocą drona.

Tabela 31. Zestawienie średnich wartości stężeń PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] zmierzonych w poszczególnych „hot-spotach” za pomocą czujników stacjonarnych.

Częstochowa		Ogrodzieniec	
ul. Sobieskiego 15	46,0	ul. Plac Wolności 25	48,1
ul. Powstańców 9	58,7	ul. Kościuszki 67	47,3
ul. Sabinowska 81	59,9	ul. Kościuszki 69	53,6
Żywiec		Koszęcin	
ul. Reymonta 10	73,0	ul. Szkolna 13	59,7
ul. Kopernika 83a	57,9	ul. Szkolna 4	57,0
ul. Sporyska 39	64,6	ul. Sobieskiego 11a	55,9
Rybnik		Bojszowy	
ul. Borki 37 D	46,9	ul. Św. Jana 46	69,0
ul. Łączna 12 A	59,3	ul. Św. Jana 49	65,0
ul. Rudzka 132	37,0	ul. Gwardzistów 8	68,1
Krzepice		Miedźno	
ul. Częstochowska 13	53,9	ul. Szkolna 1	54,9
ul. Ustronna 10	53,8	ul. Szkolna 1	50,3
ul. Kozińskiego 1	57,2	ul. Księżycowa 21	50,5
Woźniki		Węgierska Górka	
ul. Kawalerii 3	61,8	ul. 3-go Maja 5	46,0
ul. Florianek 4	50,6	ul. Zielona 42	60,7

ul. Powstańców 7	50,3	ul. Polna 10 A	74,7
------------------	------	----------------	------

Analizując wskaźniki PDW indywidualnie w poszczególnych emitorach (Tab. 1-30) można zauważyć, że dla stężeń PM10 i CO₂ mierzonych w spalinach wyraźnie dominują niższe wartości tych wskaźników (85% z nich przyjmuje wartości < 3 – Rys. 20).



Rys. 20. Częstość uzyskanych wartości wskaźnika PDW dla pomiarów stężeń nad emitorem.

4 Ocena stanu bazowego w „hot-spotach”

Średnie wartości stężeń PM10, CO₂, obliczonego PDW oraz PM10 tła zmierzone za pomocą czujników stacjonarnych w 10 wytypowanych „hot-spotach” wyznaczone w pierwszym sezonie grzewczym (Tab. 32) określają stan bazowy, będący punktem odniesienia dla pomiarów w kolejnych latach trwania projektu.

Analiza uzyskanych danych pozwala na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

- ❖ zmierzone wartości stężeń PM10 pokazują, że stężenie nad emitorem (spaliny) jest średnio 10-krotnie większe od stężenia w tle (w poszczególnych „hot-spotach” stosunki te wahają się pomiędzy 5 a 35 razy) – Tab. 1-30,
- ❖ średnie wartości stężeń CO₂ niemal nie wykazują różnicy pomiędzy tłem a emitorem, chociaż w każdym przypadku są wyższe w spalinach. W pojedynczych przypadkach odnotowywano jednak stężenia CO₂ nad emitorem kilkukrotnie przekraczające wartości tła (np. Tab. 17, 22, 23, 27, 30),
- ❖ choć wyznaczone średnie wartości tła PM10 za pomocą czujników stacjonarnych (w tych samych dniach i godzinach, co pomiary dronem) są średnio o 50% wyższe od danych zmierzonych za pomocą drona, wykazują jednak względnie wysoką zgodność z tymi ostatnimi (wsp. korelacji Pearsona $r^2 = 0,8811$). Oznacza to, że wzrost wartości stężenia tła zmierzony za pomocą drona w dużym stopniu odpowiada wzrostowi stężenia tła zmierzonego za pomocą pomiaru stacjonarnego i na odwrót. Tylko w przypadku Częstochowy zauważono odwrotny trend (dana ta jako odstająca nie została uwzględniona w obliczeniu korelacji).

Tabela 32. Ocena stanu bazowego w „hot-spotach” – zestawienie wartości stężeń PM10 i CO₂ (średnia z 3 dni pomiarowych) zmierzonych w poszczególnych „hot-spotach” za pomocą dronów, ich stosunków (wskaźnik PDW) oraz średnich wartości PM10 zmierzonych za pomocą pomiarów stacjonarnych.

„Hot-spot”	Pomiar za pomocą drona								Pomiar stacjonarny
	Emitor			Tło			Emitor/tło		PM10 [µg/m ³]
	PM10 [µg/m ³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10 [µg/m ³]	CO ₂ [ppm]	PDW	PM10	CO ₂	
Miedźno	241,6	586,9	4,1	50,2	578,5	12,6	4,8	1,0	72,1
Koszęcin	382,9	523,6	2,2	56,9	513,5	9,5	6,7	1,0	85,4
Rybnik	333,4	530,8	5,2	34,7	513,1	18,6	8,8	1,0	42,8
W. Górka	633,2	519,3	2,6	37,4	513,9	15,2	16,9	1,0	61,4
Żywiec	497,2	483,1	1,5	84,5	481,1	6,3	5,9	1,0	102,9
Częstochowa	917,1	574,8	0,7	53,1	488,1	4,0	17,3	1,2	37,3
Woźniki	828,0	546,4	0,8	40,6	495,2	5,2	20,4	1,1	84,1
Krzepice	919,7	621,4	0,9	40,5	516,2	5,7	22,7	1,2	51,2
Bojszowy	689,1	631,6	1,1	28,9	544,3	10,5	23,9	1,2	42,9
Ogrodzieniec	884,8	632,8	1,1	25,0	507,7	9,4	35,4	1,2	41,5
Średnia	632,7	565,1	2,0	45,2	515,1	9,7	16,3	1,1	62,2

5 Podsumowanie

W niniejszym etapie pracy przeprowadzono kampanię pomiarową (łącznie 30 godzinnych pomiarów w 10 „hot-spotach”) stężeń PM10 i CO₂ w gazach odlotowych, pochodzących z indywidualnych urządzeń grzewczych z wykorzystaniem mobilnych urządzeń pomiarowych zainstalowanych na dronie. Ponadto zainstalowano, przetestowano i uruchomiono w tych samych gminach 30 stacjonarnych mierników stężeń pyłów w powietrzu atmosferycznym. Uzyskane wyniki stanowią wartości odniesienia, charakteryzujące stan bazowy w „hot-spotach”. Pozwolą one na obserwację dynamiki zmian zanieczyszczenia powietrza w kolejnych latach trwania projektu zarówno w strumieniach gazów odlotowych z kominów gospodarstw domowych (pomiarów dronem), jak też w imisji atmosferycznej (pomiarów stacjonarnych), będących efektem likwidacji wysokoemisyjnych urządzeń grzewczych w ramach realizacji działań naprawczych PL240X-ZSO i związanej z tym poprawy jakości powietrza.

W przypadku pomiarów z wykorzystaniem dronów do analizy zmian wielkości emisji PM10 w gazach spalinowych zastosowano wskaźnik PDW będący ilorazem stężenia CO₂ oraz pyłu PM10 w punkcie pomiarowym. Jego malejąca wartość wskazuje na zwiększoną zawartość pyłu w strumieniu spalin. Poprawa jakości powietrza na skutek działań samorządów w następstwie wdrażania zapisów śląskiej uchwały „antysmogowej” powinna skutkować zwiększaniem się wartości wskaźnika PDW w kolejnych okresach pomiarowych, co w praktyce powinno być widoczne w postaci przesuwania się wskaźnika PDW w kierunku wyższych wartości na histogramie (Rys. 20).

Wskaźnik PDW wyznaczony z wartości pomiarowych dla 10 „hot-spotów”, w których prowadzono pomiary, przedstawione w Tab. 32, stanowią wartości odniesienia będące podstawą do szacowania dynamiki zmian wielkości emisji będących skutkiem realizacji działań naprawczych, w oparciu o analogiczne pomiary planowane w kolejnych etapach.

Stężenia PM10 mierzone w powietrzu w sposób stacjonarny i zestawione w Tab. 32 stanowią wprost podstawę do oceny zmian jakości powietrza w kolejnych latach trwania projektu, po uwzględnieniu wyników pomiarów prowadzonych w kolejnych sezonach grzewczych.