AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA nauk ścisłych i przyrodniczych

DYSCYPLINA Nauki Fizyczne

ROZPRAWA DOKTORSKA

Rola warunków meteorologicznych w kształtowaniu zanieczyszczenia powietrza pyłem zawieszonym PM_{10} w obszarach zurbanizowanych o zróżnicowanej rzeźbie terenu na przykładzie Krakowa

Autor: mgr inż. Piotr Paweł Sekuła

I Promotor: dr hab. inż. Mirosław Zimnoch, prof. AGH
II Promotor: prof. dr hab. Zbigniew Ustrnul

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej

Kraków, 2022

Oświadczenie autora rozprawy:
Oświadczam, świadomy odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy, że niniejszą pracę doktorską wykonałem osobiście i samodzielnie i nie korzystałam ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

data, podpis autora

Oświadczenie promotora rozprawy:
Niniejsza rozprawa jest gotowa do oceny przez recenzentów.

data, podpis pierwszego promotora rozprawy

data, podpis drugiego promotora rozprawy

Badania opisane w rozprawie były finansowane z budżetu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr projektu nr 16.16.220.842 B02 oraz Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój, nr projektu POWR.03.02.00-00-I004/16, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej.

Podziękowania

Niniejsza praca doktorska powstała dzięki pomocy wielu osób, którym w tym miejscu pragnę serdecznie podziękować.

Chciałbym złożyć ogromne podziękowania dla moich Promotorów.

Dla dr. hab. inż. Mirosława Zimnocha, prof. AGH za zaproszenie mnie do podjęcia się tego doktoratu, dzielenie się ogromną wiedzą i doświadczeniem, zaangażowanie w moje badania i cierpliwość.

Dla prof. dr hab. Zbigniewa Ustrnula za opiekę merytoryczną, hojne dzielenie się swoją ogromną wiedzą i doświadczeniem, cenne uwagi, sugestie i konstruktywną krytykę.

Dziękuję dr hab. Anicie Bokwie, prof. UJ za czas spędzony na analizach wyników, ogromne zaangażowanie w moje badania, merytoryczne dyskusje oraz hojne dzielenie się swoją ogromną wiedzą i doświadczeniem.

Dziękuję kierownikowi grupy Centrum Modelowania Meteorologicznego ALADIN mgr Bogdanowi Bochenkowi za umożliwienie mi realizacji własnych prac badawczych, współpracę naukową, zachęcanie do podejmowania dalszych badań, cenne uwagi i sugestie.

Dziękuję mgr Michałowi Kudowi za pomoc w przeprowadzaniu badań środowiskowych.

Rodzinie i przyjaciołom za wsparcie i ciągłą motywację udzieloną mi podczas dążenia do osiągnięcia tego celu.

Dziękuję również pozostałym członkom Zespołu Fizyki Środowiska i Centrum Modelowania Meteorologicznego ALADIN za okazaną pomoc, dzielenie się doświadczeniem oraz wspólnie spędzony czas.

Spis treści

Lista publikacji autora rozprawy 10
1. Wprowadzenie 11
1.1. Dotychczasowy stan badań 12
2. Cel i koncepcja pracy 18
3. Obszar badań 19
4. Dane wykorzystane w badaniach 21
4.1. Naziemne pomiary meteorologiczne i zanieczyszczenia powietrza 21
4.2. Badania w profilu pionowym atmosfery 25
4.3. Numeryczne modele prognoz pogody 29
4.4. Reanalizy atmosferyczne 30
4.5. Typy cyrkulacji atmosfery 31
5. Metody pozyskania i opracowania danych 31
5.1. Kryterium wystąpienia wiatru fenowego 31
5.2. Opracowanie danych systemu AirDust 32
5.3. Klasyfikacja profili pionowych zanieczyszczenia PM_{10} 34
5.4. Metody uczenia maszynowego 35
6. Streszczenie artykułów tworzących rozprawę doktorską 37
6.1. Publikacja A1 37
6.2. Publikacja A2 38
6.3. Publikacja A3 43
6.4. Publikacja A4 44
6.5. Publikacja A5 48
7. Podsumowanie i wnioski 50
Bibliografia 54

Streszczenie

Jakość powietrza wywiera znaczący wpływ na warunki życia człowieka, kondycję ekosystemów oraz procesy związane ze zmianami klimatu. Poziom zanieczyszczenia powietrza mierzonego w dolnej warstwie troposfery zależy od oddziaływań trzech głównych czynników: 1) emisji zanieczyszczeń, 2) ich przemian fizyko–chemicznych oraz 3) warunków ich dyspersji w atmosferze. Warunki dyspersji zależą zarówno od sytuacji synoptycznej, ale również od lokalnego ukształtowania terenu. Ponadnormatywne stężenia pyłu zawieszonego stanowią istotny problem zarówno w Europie jak i na obszarze Polski. Niestety w Polsce problem złej jakości powietrza występuje od wielu lat, na co wskazuje m.in. podwyższona średnia roczna wartość stężenia pyłów PM_{10} w wielu aglomeracjach w Polsce w stosunku do średniej rocznej wyznaczonej dla miast w Unii Europejskiej w okresie 2000–2019. Obszar południowej Polski (województwa śląskie i małopolskie) pod względem złej jakości powietrza wyróżnia się szczególnie na tle Europy (EEA, 2022). Niniejsza praca koncentruje się na warunkach dyspersji kształtowanych przez procesy atmosferyczne modyfikowane przez rzeźbę oraz zagospodarowanie terenu. Omawiana rozprawa doktorska ma formę zbioru pięciu artykułów powiązanych tematycznie opublikowanych w czasopismach naukowych znajdujących się na liście Journal Citation Reports.

Głównym celem pracy doktorskiej jest ilościowe określenie wpływu warunków pogodowych (o charakterze lokalnym i regionalnym) na rozkład czasowy i zróżnicowanie przestrzenne zanieczyszczenia powietrza PM_{10} w dużym obszarze zurbanizowanym położonym we wklęsłej, aczkolwiek nieco zróżnicowanej formie terenu jaki stanowi aglomeracja krakowska. Analiza została wykonana

z wykorzystaniem współczesnych technik pomiarowych i metod badawczych. Badania naukowe zostały wykonane z wykorzystaniem pomiarów meteorologicznych i jakości powietrza tak naziemnych jak i w profilu pionowym, wyników prognoz numerycznych modeli meteorologicznych, reanaliz atmosferycznych oraz typów cyrkulacji atmosfery.

Pierwsze wyniki badań zaprezentowane w **publikacji A1** pozwoliły na ilościowe porównanie różnych konfiguracji modeli numerycznych prognoz pogody pod względem prognozowanej temperatury powietrza a także stratyfikacji pionowej atmosfery dla obszaru o dużym zróżnicowaniu terenu. Badania umożliwiły wyodrębnienie charakterystycznych sytuacji synoptycznych towarzyszących zawyżeniu prognozowanej temperatury powietrza a także pozwoliły na weryfikację hipotezy dotyczącej poprawy jakości prognoz poprzez zmianę rozdzielczości siatki obliczeniowej (rozdzielczość przestrzenna i pionowa modelu). Niestety problem reprezentacji stabilnej warstwy atmosfery w operacyjnych modelach numerycznych okazał się bardziej złożony i wymaga dalszych prac rozwojowych.

Analiza warunków meteorologicznych oraz jakości powietrza towarzyszących wystąpieniu wiatru fenowego w okresie chłodnym zaprezentowana w **publikacji A2** pozwoliła na dokonanie oceny roli wiatru fenowego w kształtowaniu dynamiki miejskiej warstwy granicznej w Krakowie. Badania potwierdziły, że w przypadku Krakowa kluczowym czynnikiem modyfikującym warunki pogodowe w skali lokalnej jest rzeźba terenu. Wpływa ona na oddziaływanie wiatru fenowego na miejską warstwą graniczną powodując poprawę lub pogorszenie warunków dyspersji zanieczyszczenia w mieście. Hipoteza, przedstawiona w pracy mówiąca, że adwekcja ciepłych mas powietrza z sektora południowego negatywnie wpływa na warunki dyspersji w Krakowie nie jest w pełni słuszna. Zrealizowane badania pozwoliły na wyróżnienie trzech rodzajów transportu wiatru fenowego zależne od lokalnych warunków atmosferycznych oraz charakterystyki fenu (intensywność zjawiska i kierunek przemieszczania powietrza): 1) przepływu powietrza nad doliną; 2) wniknięcia wiatru do doliny od wschodu lub południa; 3) wystąpienia fal grawitacyjnych towarzyszących wiatrowi fenowemu powodując zróżnicowanie przestrzenne turbulencji w obrębie miasta.

W ramach realizowanych prac naukowych zostały wykonane badania metodyki profilowania pionowego z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych celem udoskonalenia tej metody pomiarowej oraz identyfikacji jej mocnych i słanych stron. Wyniki badań zaprezentowane w **publikacji A3** stanowiły podstawę do realizacji dalszych badań w profilu pionowym atmosfery.

Wyniki balonowej kampanii pomiarowej dla obszaru Krakowa zaprezentowane w **publikacji A4** umożliwiły identyfikację czynników atmosferycznych kształtujących dyspersję pionową zanieczyszczenia w dolinie w znacznym stopniu zurbanizowanej. W ramach powyższych badań została zweryfikowana hipoteza mówiąca, że wystąpienie ścinania wiatru nad doliną przyczynia się do pogorszenia warunków aerosanitarnych poprzez modyfikację wysokości warstwy mieszania. Badania wskazały, że wystąpienie silnego ścinania wiatru może powodować wzrost wysokości warstwy mieszania, usuwanie zanieczyszczenia przy zaniku ruchów konwekcyjnych, ale również ograniczenia rozwoju warstwy mieszania poprzez separację mas powietrza w dolinie i ponad nią (ścinanie wiatru powyżej warstwy inwersyjnej).

Publikacja A5 stanowiąca podsumowanie zrealizowanych badań miała na celu dokonanie ilościowej oceny wpływu cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza w Krakowie i możliwości ich zastosowania do prognozowania jakości powietrza w mieście. Wyniki badań pozwoliły na ilościowe określenie zależności pomiędzy poszczególnymi elementami pogody a poziomem zanieczyszczenia w mieście. Badania zrealizowane z wykorzystaniem modelu Random Forests wskazały, że prócz parametrów, dobrze poznanych takich jak temperatura powietrza, prędkość wiatru oraz gradient pionowy temperatury powietrza, kluczowymi czynnikami determinującymi poziom stężenia zanieczyszczenia PM_{10} są gradient pionowy względnej wilgotności powietrza oraz uskok wiatru w najniższej warstwie troposfery.

Powyższe badania nie wyczerpują w pełni przedstawionego problemu badawczego. Ich wyniki mogą być jednak wykorzystane w dalszych pracach nad wpływem zjawisk atmosferycznych na jakość powietrza w obszarach miejskich charakteryzujących się znaczącym zróżnicowaniem rzeźby terenu. Mogą również stanowić znaczący wkład do modelowania warunków dyspersji zanieczyszczeń, w tym zwłaszcza prognoz jakości powietrza.

Abstract

Air quality has a significant impact on human living conditions, ecosystems, and processes associated with climate changes. The level of air pollution measured in the near-ground troposphere depends on the interactions of three main factors: 1) pollutants emission, 2) their physical and chemical transformations, and 3) their dispersion conditions in the atmosphere. Dispersion conditions depend both on synoptic situation and local topography. Abundant air pollution with particulate matter is a significant problem in both Europe and in Poland. Unfortunately, in Poland, the air quality problem has been present for many years, as indicated by the increased annual average value of PM_{10} concentrations in agglomerations in Poland in relation to the annual average determined for cities in the European Union in the period 2000-2019. The area of southern Poland (Silesian and Lesser Poland Voivodships) in terms of poor air quality distinguishes itself particularly in comparison with Europe (EEA, 2022). This doctoral dissertation raises the issue of dispersion conditions influenced by atmospheric processes modified by relief and land use. The dissertation is a collection of five thematically related articles published in scientific journals included in the Journal Citation Reports.

The main objective of the research described in this dissertation is to quantify the influence of weather conditions on a local and regional scale on the spatial and temporal distribution of PM_{10} air pollution in a large, urbanized area located in a concave however, slightly varied landform, which is the Kraków agglomeration. The analysis was carried out using the latest measurement techniques and research methods. The research was carried out using meteorological and air quality measurements from the ground as well as in the vertical profile, results of numerical forecasts of meteorological models, meteorological reanalyses and types of atmospheric circulation.

The first results presented in the **article A1** allowed quantitative comparison of different configurations of numerical weather prediction models in terms of predicted air temperature and thermal stratification of the atmosphere for the area with varied relief and land cover. The research allowed to extract the characteristic synoptic situations accompanying overestimation of the forecasted air temperature, as well as to verify the hypothesis on improvement of the forecast quality by changing the resolution of the computational grid (spatial and vertical resolution of the model). Unfortunately, the problem of representing the stable atmospheric layer in operational numerical models is more complex and requires further developments.

The analysis of meteorological conditions and air quality that accompany the appearance of the foehn wind in the cold season presented in the **article A2** allowed us to assess the role of the foehn wind on the dynamics of the urban boundary layer in Kraków. The study confirmed that in the case of Kraków, the key factor modifying weather conditions on a local scale is the relief. It influences the interaction of foehn winds with the urban boundary layer causing improvement or deterioration of pollution dispersion conditions in the city. The hypothesis presented in the doctoral dissertation that advection of warm air masses from the southern sector negatively affects the dispersion conditions in Kraków is not fully correct. The realized research made it possible to distinguish three types of foehn transport dependent on the local atmospheric conditions and foehn properties (intensity and direction of air movement): 1) air flow over the valley; 2) wind penetration into the valley from the East or South; 3) occurrence of gravitational waves accompanying the foehn wind causing spatial differentiation of turbulence within the city.

As part of the scientific studies, research was carried out on the vertical profiling using unmanned aerial vehicles to improve this measurement method and identify its strengths and weaknesses. The research results presented in the article **A3** formed the basis for the realization of further studies on the vertical profile of the atmosphere.

The results of the balloon measurement campaign for the Krakow area presented in **the article A4** allowed identification of atmospheric factors shaping the vertical dispersion of pollution in an urbanized valley. The hypothesis was verified that the occurrence of wind shear in the valley contributes to the deterioration of aerosanitary conditions by modifying the height of the mixing layer. The research indicated that the occurrence of strong wind shear can cause an increase in the height of the mixing layer, removal of pollution at the disappearance of convective motions, but also limits the

development of the mixing layer through separation of air masses in and above the valley (wind shear above the inversion layer).

The article A5 constitutes a summary of the research. The study was carried out to estimate quantitatively the influence of atmospheric circulation on air quality in Kraków and its possible application for air quality forecast in the city. The results of the research allowed us to determine the relationship between individual weather elements and the level of pollution in the city. The research carried out with the use of Random Forests model indicated that apart from well-known parameters such as air temperature, wind speed and vertical gradient of air temperature, the key factors determining the level of PM_{10} pollution concentration are the vertical gradient of relative air humidity and wind shear in the lowest troposphere layer.

The presented studies do not fully elaborate the research problem. However, they can be used to realize further scientific research of the influence of atmospheric phenomena on air quality for urban areas characterized by significant diversity of relief and land use. The presented research results can also contribute significant insight to the modeling of pollutant dispersion conditions, especially air quality forecasts.

Lista publikacji autora rozprawy

Omawiana rozprawa doktorska ma formę zbioru następujących artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych (lista według oryginalnego zapisu w czasopismach naukowych):

A1 **Sekula P.**, Bokwa A., Bochenek B., Zimnoch M. (2019). Prediction of Air Temperature in the Polish Western Carpathian Mountains with the ALADIN-HIRLAM Numerical Weather Prediction System. *Atmosphere*, 10(4).
https://doi.org/10.3390/atmos10040186

A2 **Sekula P.**, Bokwa A., Ustrnul Z., Zimnoch M., Bochenek B. (2021). The impact of a foehn wind on PM_{10} concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Krakow, Poland. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 73(1). *https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780*

A3 **Sekula P.**, Zimnoch M., Bartyzel J., Bokwa A., Kud M., Necki J. (2021). Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics. *Sensors*, 21(9). *https://doi.org/10.3390/s21092920*

A4 **Sekula P.**, Bokwa A., Bartyzel J., Bochenek B., Chmura L., Galkowski M., Zimnoch M. (2021). Measurement report: Effect of wind shear on PM_{10} concentration vertical structure in the urban boundary layer in a complex terrain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(15), 12113-12139.
https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021

A5 **Sekula P.**, Zbigniew U., Bokwa A., Bochenek B., Zimnoch M. (2022). Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography. *Sustainability*, 14(6).
https://doi.org/10.3390/su14063388

1. Wprowadzenie

Jakość powietrza wywiera znaczący wpływ na warunki życia człowieka, kondycję ekosystemów oraz procesy związane ze zmianami klimatu. Koncentracja pyłów zawieszonych w powietrzu uważana jest za najlepszy wskaźnik stanu aerosanitarnego powietrza z punktu widzenia jego wpływu na zdrowie ludzi (Adetona i in., 2016; Burnett i in., 2014). Narażenie ludności na wysokie stężenia pyłów zawieszonych o średnicy aerodynamicznej poniżej 10 µm (PM_{10}) może spowodować podrażnienie płuc, kaszel, astmę oraz choroby sercowo-naczyniowe (Jeong, 2013). Cząsteczki o średnicy aerodynamicznej poniżej 1 µm (PM_1) mają największy wpływ na zdrowie, wynika to z faktu, że mogą one przeniknąć do najgłębszych odcinków dróg oddechowych, a nawet do krwiobiegu przedostając się do narządów wewnętrznych, m.in. serca, nerek czy też mózgu (Franchini i Mannucci, 2007, 2011).

Poziom zanieczyszczenia powietrza mierzonego w najniższej warstwie troposfery zależy od oddziaływań trzech głównych czynników: 1) emisji zanieczyszczeń, 2) ich przemian fizyko–chemicznych oraz 3) warunków dyspersji w atmosferze.

Skład cząsteczek zawieszonych w powietrzu jest bardzo złożony, w dużym stopniu zależy od źródła pochodzenia. Możemy wyróżnić m.in. węgiel elementarny i organiczny, jony siarczanowe, azotanowe i amonowe, metale ciężkie, minerały oraz sól morską (Pernigotti i in., 2016). Pył zawieszony może być bezpośrednio emitowany ze źródeł antropogenicznych lub naturalnych a także powstawać w atmosferze z gazowych produktów spalania, takich jak lotne związki organiczne (m.in. węglowodory aromatyczne), amoniak, tlenki siarki i azotu. Pierwotny pył zawieszony pochodzi głównie z procesów spalania i procesów wysoko temperaturowych (m.in. wytapianie, spawanie i procesy przemysłowe) (Maricq, 2007) oraz suspensji cząstek naturalnych (np. gleba, piasek) (Amato i in., 2014). Z kolei, wtórny pył zawieszony powstaje w wyniku konwersji związków gazowych w cząstki stałe w atmosferze i/lub kondensacji związków gazowych na wcześniej istniejących cząstkach stałych (głównie przy udziale tlenków siarki, tlenków azotu, amoniaku i lotnych związków organicznych), które mogą reagować z ozonem, jonem wodorotlenkowym i innymi reaktywnymi cząsteczkami, tworząc aerozole wtórne, a także wskutek resuspensji cząstek pochodzenia antropogenicznego ponownie wprowadzonych do atmosfery po uprzednim osadzeniu na powierzchni ziemi. Można stwierdzić, że skład pyłu zawieszonego zmienia się w ciągu roku i jest on silnie zależy od analizowanego regionu (Almeida i in., 2020).

W latach 2000–2019 emisja PM_{10} w krajach Unii Europejskiej spadła o 32%, w przypadku Polski redukcja emisji PM_{10} wyniosła 24% (EEA, 2021). Polska nadal zaliczana jest do krajów członkowskich Unii Europejskiej, których udział emisji PM_{10} w skali całej Unii stanowi ponad 10% emisji całej wspólnoty (dane na rok 2019). Badania wskazują, że w roku 2019 głównymi źródłami emisji PM_{10} w krajach członkowskich Unii Europejskiej była (1) emisja pochodząca ze spalania paliw w sektorach usług i gospodarstwach domowych (37%), (2) emisja pochodząca z procesów przemysłowych (m.in. obróbka minerałów, produkcja chemikaliów i wyrobów chemicznych i metali; 16%); (3) rolnictwo (m.in. nawożenie, spalanie odpadów rolnych; 16%) oraz (4) transport drogowy (10%). (EEA, 2021) Głównym źródłem emisji PM_{10} w Polsce są stacjonarne procesy spalania paliw stałych, gównie węgiel i drewno (Gabryelewicz i in., 2020). W województwie małopolskim, którego dotyczy niniejsza rozprawa, decydującym czynnikiem mającym wpływ na jakość powietrza jest emisja powierzchniowa pochodząca między innymi z sektora komunalno–bytowego, której udział w emisji PM_{10} w 2018 roku szacowany był na 77% emisji całkowitej (GIOŚ, 2020).

Ponadnormatywne stężenia pyłu zawieszonego stanowią problem zarówno w Europie jak i na obszarze Polski, na co wskazują coroczne raporty Europejskiej Agencji Środowiska (ang. *European Environment Agency*, EEA). Problem przekroczeń 24–godzinnych norm stężenia pyłu PM_{10} w roku 2018 wystąpił nie tylko w Polsce, ale również w Bułgarii, Czechach, Chorwacji, na Węgrzech, we Włoszech czy w Słowenii (EEA, 2020). Niestety w Polsce problem jakości powietrza występuje od wielu lat, na co wskazuje podwyższona średnia roczna wartość ważonego stężenia pyłów PM_{10} w aglomeracjach w Polsce w stosunku do średniej rocznej wyznaczonej dla miast w Unii Europejskiej w okresie 2000–2019 (EEA, 2021a). Obszar południowej Polski (przede wszystkim województwa śląskie i małopolskie)

pod względem jakości powietrza wyróżnia się szczególnie na tle Europy. W roku 2021, liczba dni ze stężeniem dobowym PM_{10} większym niż 50 $\mu g \cdot m^{-3}$ przekroczyła dopuszczalną normę roczną (35 dni w ciągu roku) w większości stacji dla tego regionu (EEA, 2022). Przekroczenia norm jakości powietrza dla okresu dobowego (pył PM_{10} - 50 $\mu g \cdot m^{-3}$), jak i rocznego (pył PM_{10} i $PM_{2.5}$ – odpowiednio 40 $\mu g \cdot m^{-3}$ i 25 $\mu g \cdot m^{-3}$), dla obu województw dotyczą zarówno obszarów miast i aglomeracji, ale również wielu mniejszych miejscowości. Przekroczenia dopuszczalnych wartości dobowych stężeń pyłu PM_{10} z reguły występują w okresie zimowym i związane są głównie z emisją pyłu pochodzącą z indywidualnego ogrzewania budynków oraz z transportu drogowego. Istotnym czynnikiem są również emisje z zakładów przemysłowych, ciepłowni, elektrowni oraz niekorzystne warunki meteorologiczne (w tym długotrwałe sytuacje inwersyjne oraz cisze atmosferyczne).

Prócz poziomu emisji, zmienność warunków meteorologicznych determinuje stężenia zanieczyszczeń (Wang Y.Q. i in., 2015). Warunki dyspersji zależą zarówno od sytuacji synoptycznej, ale również od lokalnego ukształtowania terenu (Zhang i in., 2016). Kluczowymi parametrami meteorologicznymi determinującymi poziom zanieczyszczeń przy gruncie są prędkość i kierunek wiatru, temperatura powietrza, stabilność przygruntowej warstwy atmosfery a także wystąpienie opadu atmosferycznego (Grange i in., 2018; Toro i in., 2019; Thürkow i in. 2021).

Województwa śląskie i małopolskie charakteryzują się dużym zróżnicowaniem środowiska geograficznego, w tym zwłaszcza rzeźby terenu. W terenach górskich, osadnictwo oraz infrastruktura transportowa skupiają się głównie w dnach dolin, gdzie warunki dyspersji są najgorsze w porównaniu z pozostałymi częściami profilu pionowego dolin. Są to tereny o złych warunkach naturalnej wentylacji co jest spowodowane osłabieniem prędkości wiatru przez osłonięcie terenu den dolin przez zbocza. Ponadto, obszary te charakteryzują się częstym występowaniem inwersji termicznych i zastoisk chłodnego powietrza. Wystąpienie słabej prędkości wiatru oraz warunków inwersyjnych powoduje akumulację zanieczyszczenia blisko powierzchni gruntu przyczyniając się do wystąpienia epizodów smogowych (Marynowski i in., 2020; Zhou i in., 2020). Negatywny wpływ na jakość powietrza ma również lokalny i makroskalowy transport zanieczyszczeń powietrza co stanowi przedmiot licznych prac naukowych (Li i Han, 2016; Butwin i in., 2019). Dobre poznanie procesów atmosferycznych kształtujących dynamikę planetarnej warstwy granicznej atmosfery (ang. *Planetary Boudary Layer*, PBL) i ich wpływu na dyspersję zanieczyszczenia powietrza w obrębie wklęsłej formy terenu jest kluczowe w celu minimalizowania negatywnego wpływu jakości powietrza na zdrowie mieszkańców i stan środowiska naturalnego. Wiedza ta powinna być wykorzystywana w szeroko rozumianym zrównoważonym rozwoju przestrzennym miast i gmin. Zrozumienie procesów determinujących dynamikę atmosfery nad obszarami o dużym zróżnicowaniu rzeźby jest znacznie trudniejsze niż dla obszarów równinnych, co związane jest z silną modyfikacją procesów atmosferycznych przez orografię. Planetarna warstwa graniczna dla tych obszarów jest niehomogeniczna a jej struktura pionowa jest bardziej złożona niż nad obszarami płaskimi, dlatego konieczne są badania w celu lepszego poznania czynników kształtujących dynamikę atmosfery i odzwierciedlenia ich w meteorologicznych modelach numerycznych (Lehner i Rotach, 2018; Giovannini i in., 2020).

Niniejsza praca koncentruje się na warunkach dyspersji kształtowanych przez procesy atmosferyczne modyfikowane przez rzeźbę oraz przestrzenne zagospodarowanie terenu.

1.1. Dotychczasowy stan badań

Przegląd prac naukowych wskazuje, że wśród badań wpływu warunków atmosferycznych na jakość powietrza w mieście można wyróżnić dwa kierunki badawcze, skupiające się na:

1. analizie statystycznej istotności parametrów meteorologicznych (m.in. prędkość i kierunek wiatru, temperatura powietrza, wilgotność powietrza, opad atmosferyczny, wysokość PBL, grubość warstwy inwersyjnej, kierunki adwekcji) w procesie kształtowania jakości powietrza w mieście (Pearce i in., 2011; Munoz i Corral, 2017; Zhao i in., 2019; Marynowski i in., 2020), przy wykorzystaniu modeli statystycznych opartych na danych meteorologicznych i jakości

powietrza m.in. modeli regresji liniowej (ang. *Multiple Linear Regression*) (Wang P. i in., 2015), modeli regresji wielomianowej oraz algorytmów uczenia maszynowego (Czernecki i in., 2021);

2. analizie całościowej sytuacji meteorologicznej w celu określenia czynników determinujących rozkład stężenia zanieczyszczenia w różnych skalach czasowych i przestrzennych.

W ostatnim czasie obserwuje się widoczny wzrost liczby prac naukowych poświęconych rozkładowi przestrzennemu zanieczyszczenia w mieście, niestety niewiele z nich skupia się na szczegółowej analizie wpływu dynamiki atmosfery na jakość powietrza poprzez uzupełnienie obserwacji prognozami numerycznymi stanu atmosfery (Li X.L. i in., 2018; Wang H. i in., 2018; Li Y. i in., 2019; Xu i in.,2019).

Koncentracja poszczególnych związków zanieczyszczeń w powietrzu zależy od wielu czynników, takich jak lokalizacja źródeł emisji, ukształtowanie terenu czy też stopień urbanizacji (Grimmond i in., 2010; Biggart i in. 2020; Hertwig i in. 2021). Badania długich okresów epizodów smogowych wykazały, że są one w dużej mierze spowodowane warunkami meteorologicznymi (Wang Y.Q. i in., 2015).

Niniejsza praca dotyczy kształtowania się poziomu zanieczyszczeń powietrza na terenie miasta, w obrębie miejskiej warstwy granicznej (ang. *Urban Boundary Layer,* UBL), stanowiącej część planetarnej warstwy granicznej atmosfery. Jedną z kluczowych prac stanowiącą syntezę współczesnych wyników badań nad klimatem miejskim oraz wykorzystywanych w tym celu metod badawczych jest praca zespołu Oke i in. (2017). Autorzy publikacji wskazują, że struktura miejskiej warstwy granicznej podlega dobowej zmienności. W okresie dziennym, wewnątrz tej warstwy można wyróżnić trzy części: warstwę powierzchniową (ang. *surface layer*) sięgającą od podłoża do 10% wysokości UBL, przylegającą do niej warstwę mieszania (ang. *mixed layer*) oraz warstwę pośrednią (ang. *entrainment zone*) gdzie UBL stopniowo przechodzi w swobodną atmosferę. W okresie nocnym, tworzy się tzw. stabilna warstwa graniczna (ang. *nocturnal stable layer*) przylegająca do warstwy powierzchniowej. Wysokość stabilnej warstwy atmosfery może sięgać nawet kilkuset metrów, a powyżej niej znajduje się warstwa resztkowej turbulencji oddzielona od swobodnej atmosfery inwersją nakrywającą. Miejska warstwa graniczna składa się z warstwy powierzchniowej oraz warstwy mieszania występującej w okresie dziennym. Wewnątrz warstwy powierzchniowej wyróżnia się trzy warstwy: 1) warstwę dachową (ang. *urban canopy layer*), sięgającą od podłoża do wysokości dachów budynków, 2) warstwę tarciową (ang. *roughness layer*) o grubości od 1,5 do 3-krotności średniej wysokości warstwy dachowej i 3) leżącą ponad nią warstwę inercyjną (ang. *inertial layer*), której górna granica może sięgać wysokości równej 10% wysokości UBL.

Czynniki kształtujące lokalne warunki dyspersji zanieczyszczeń powietrza w miejskiej warstwie granicznej

Dynamika miejskiej warstwy granicznej jest wynikiem ciągłego oddziaływania czynników makroskalowych (cyrkulacja atmosferyczna) a także specyficznych czynników lokalnych (rzeźba terenu, pokrycie terenu, właściwości podłoża, antropogeniczny strumień ciepła, wilgoci i zanieczyszczenia), (Bokwa, 2010). Badania wskazują, że jakość powietrza w mieście charakteryzuje się dużą zmiennością czasową i przestrzenną, co wynika ze zróżnicowania przestrzennego czynników determinujących dyspersję, emisję oraz warunki korzystne do wystąpienia przemian fizyko–chemicznych związków (m.in. natężenie ruchu, lokalizacja budynków i innych przeszkód, emisja ciepła i wilgoci, nasłonecznienie), (Vicente i in., 2018).

Pionowy rozkład parametrów meteorologicznych i jakości powietrza stanowi istotne źródło informacji do lepszego poznania dynamiki atmosfery w najniższej części troposfery. Warto jednak zauważyć, że wiele ostatnich badań **struktury pionowej stężenia zanieczyszczenia powietrza w miastach** zostało zrealizowanych głównie dla obszarów o niewielkiej zmienności terenu m.in. Paryż (Renard i in., 2020), Tiencin (Han i in., 2018), w tym dla obszarów przybrzeżnych: Kanton (Zhou i in., 2020), Szanghaj (Zhang i in., 2017). Dotychczasowe badania poświęcone problematyce zanieczyszczenia powietrza w niższej troposferze wskazują na występowanie kilku charakterystycznych typów profilu pionowego stężenia zanieczyszczenia:

- dwóch warstw o znacząco różnym składzie i poziomie stężenia zanieczyszczenia; warstwa dolna charakteryzuje się wysokim poziomem stężenia od poziomu gruntu aż do określonej

wysokości, ponad nią występuje warstwa przejściowa, gdzie obserwowany jest gwałtowny spadek poziomu stężenia zanieczyszczenia wraz z wysokością oraz warstwa o niskim, stałym poziomie stężenia zanieczyszczenia powyżej; związane z wystąpieniem inwersji termicznej (Strbova i in., 2017; Wang i in., 2018; Samad i in., 2020);

- warstwa charakteryzująca się znaczącym, w przybliżeniu liniowym, spadkiem poziomu stężenia zanieczyszczenia wraz z wysokością, spowodowanym przez m.in. przez silną powierzchniową emisją zanieczyszczenia w trakcie występowania stabilnych warunków atmosferycznych lub spowodowanym spływem katabatycznym zanieczyszczenia do doliny przy jednoczesnym usuwaniu zanieczyszczenia z wyższych warstw atmosfery (Strbova i in., 2017);
- warstwa o zwiększonym poziomie stężenia zanieczyszczenia powietrza na określonej wysokości, wynikająca z dyfuzji pionowej zanieczyszczenia (Strbova i in., 2017) lub dyfuzji smugi pochodzącej z punktowych źródeł emisji (Xu i in., 2019);
- warstwa o mało zróżnicowanym, niskim poziomie stężenia zanieczyszczenia spowodowanym wystąpieniem silnego mieszania pionowego (Strbova i in., 2017) lub usunięciem lokalnego zanieczyszczenia powietrza przez procesy atmosferyczne skali synoptycznej (adwekcją mas powietrza).

W ciągu dnia, kluczowym parametrem determinującym poziom stężenia zanieczyszczenia jest **wysokość warstwy mieszania**, która określa dostępną objętość atmosfery do rozproszenia zanieczyszczenia. Wiele czynników ma wpływ na rozwój warstwy mieszania, między innymi struktura i intensywność nocnej warstwy granicznej atmosfery, bilans radiacyjny, wystąpienie opadu atmosferycznego, wilgotność powierzchni czynnej, adwekcja mas powietrza, ale również stratyfikacja swobodnej atmosfery, która determinuje maksymalną wysokość warstwy mieszania (Schween i in., 2014; Murthy i in., 2020).

W pracach naukowych analizujących wpływ meteorologii na jakość powietrza najczęściej badana jest stabilność atmosfery ze szczególnym uwzględnieniem występowania przygruntowej **inwersji termicznej**. Występowanie przygruntowej lub wzniesionej inwersji temperatury, ma bezpośredni wpływ na pionowy rozkład stężenia PM_{10} i jego poszczególnych składników (Marynowski i in., 2020; Zhou i in., 2020). Badania wykonane dla Górnego Śląska, obszaru o podobnych problemach co rozpatrywany w niniejszej pracy wykazały, że czynnikami które kontrolują rozwój przygruntowej warstwy inwersyjnej są prędkość wiatru (Łupikasza i Niedźwiedź, 2022), występowanie pokrywy śnieżnej (Green i in., 2015), bryzy morskiej (Zhou i in., 2019) czy też bryzy miejskiej (Abbassi i in., 2020). Należy tutaj wspomnieć, że w obszarach umiarkowanych szerokości geograficznej całodobowe przygruntowe inwersje termiczne stanowią rzadkość, związane są one zazwyczaj z ogólną sytuacją synoptyczną i często maja charakter adwekcyjny (Leśniok i in., 2010; Palarz i in., 2018). W sytuacji, gdy następuje adwekcja ciepłych i suchych mas powietrza zwiększa się stabilność dolnej troposfery i w efekcie następuje redukcja mieszania pionowego (Flocas i in., 2009; Largeron i Staquet, 2016). Dotychczasowe badania wykazały, że wystąpienie warunków antycyklonalnych bezadwekcyjnych (ośrodek wysokiego ciśnienia), położenie w obrębie siodła barycznego, wału wyżowego lub w strefie rozmytego pola ciśnienia atmosferycznego sprzyjają wystąpieniu przygruntowej inwersji termicznej i w wyniku tego pogorszeniu jakości powietrza (Vautard i in., 2018; Garrido-Perez i in., 2018; Ormanova i in., 2020). Szczególnie podatnymi obszarami na występowanie długich epizodów inwersyjnych są doliny górskie, gdzie dodatkowy wpływ ma osłonięcie dolin przed promieniowaniem krótkofalowym, występowanie spływów katabatycznych w okresach nocnych oraz ograniczona wentylacja wewnątrz doliny (Giovannini i in., 2020). Badania występowania zastoiska chłodnego powietrza, jego morfologii oraz czasu trwania w zależności od rozmiarów doliny wskazały, że w przypadku dolin których głębokość przekracza wysokość nocnej stabilnej warstwy granicznej, procesy związane z nasłonecznieniem doliny mogą nie być wystarczająco silne, aby zlikwidować zastoisko chłodnego powietrza w ciągu dnia (Sheridan, 2019). Ponadto badania te wskazały również, że prócz ukształtowania terenu istotną rolę w kształtowaniu zastoisk chłodnego powietrza odgrywają fale grawitacyjne.

Istotnym czynnikiem modyfikującym klimat w skali lokalnej jest **zmiana charakteru powierzchni czynnej**, szorstkości terenu a także emisji zanieczyszczeń na terenach zurbanizowanych. Przykład ingerencji człowieka w mikroklimat regionu stanowi występowanie miejskiej wyspy ciepła (ang. *Urban*

Heat Island, UHI) w obszarach o dużym stopniu urbanizacji, której obecność w nocy, zimą lub latem, powoduje osłabienie przygruntowej inwersji termicznej i może inicjować ruchy turbulentne (Bokwa, 2010). Należy również wspomnieć o wpływie zabudowy miejskiej na osłabienie turbulencji w warstwie tarciowej oraz występowaniu cyrkulacji termalnej w miastach (wzmocnienie turbulencji) (Oke i in., 2017). Istotnym zjawiskiem występującym w okresie nocnym, który w znaczący stopniu modyfikuje nocną warstwę graniczną nad obszarami miejskimi jest dolnotroposferyczny prąd strumieniowy, charakteryzujący się znaczącą zmianą wektora wiatru w profilu pionowym (zmiana kierunku, prędkości bądź obu czynników jednocześnie w profilu pionowym), (Barlow, 2014).

Regionalne efekty oddziaływania procesów atmosferycznych na dynamikę PBL i dyspersję zanieczyszczenia nad **obszarami o dużym zróżnicowaniu rzeźby** i zagospodarowania terenu wciąż nie są w pełni zrozumiałe co uwidacznia sprawdzalność numerycznych modeli pogody dla tych obszarów (Fernandez-Gonzalez i in., 2018; Castorina, i in., 2021). Giovanni (Giovannini i in., 2020) wskazuje, że procesy transportu oraz wymiany energii i materii zachodzące w warstwie granicznej atmosfery nad obszarami o dużym zróżnicowaniu wspomnianych czynników należą do słabo poznanych, głównie ze względu na niewielką ilość danych obserwacyjnych o dużym zagęszczeniu przestrzennym niezbędnych do szczegółowej weryfikacji wyników modeli numerycznych.

Jednym z istotnych zjawisk atmosferycznych mających silny wpływ na warstwę mieszania jest **uskok wiatru** zwany też w literaturze ścinaniem wiatru**.** Pionowy uskok wiatru, zwykle związany z dużą prędkością wiatru inicjuje ruchy turbulentne, które przyczyniają się do rozwoju warstwy mieszania w ciągu dnia (Schween i in., 2014). Ścinanie wiatru może również ograniczać rozwój warstwy mieszania powodując rozciąganie (ścinanie) i odłączanie struktur turbulentnych na granicy wysokości warstwy mieszania lub rozdzielenie warstwy mieszania na dwuwarstwową strukturę (Fedorovich i Conzemius, 2008; Rodier i in., 2017). Wystąpienie dolnotroposferycznego prądu strumieniowego w połączeniu z silnym uskokiem wiatru wpływa w znaczącym stopniu na transport zanieczyszczenia np. usuwając go z wyższych warstw atmosfery (Trompetter i in., 2013), transportując go do warstwy resztkowej turbulencji lub przyczynia się do wzrostu wysokości PBL, osłabiając w ten sposób stabilność atmosfery (Li, Hu i in., 2019). Szczególny przypadek stanowi dynamika warstwy mieszania w dolinie, która poddana jest wpływowi osiadania chłodnego powietrza spowodowanego cyrkulacją wewnątrz dolinną wzdłuż stoków, co tworzy skomplikowaną pionową strukturę termalną (Ketterer, 2011; Serafin i in., 2018). Z drugiej strony transport przypowierzchniowy powietrza będący wynikiem nagrzewania stoków może modyfikować wysokość warstwy mieszania, przyczyniając się do jej wzrostu a także wymieszania zanieczyszczonego powietrza ze swobodną troposferą (Serafin i in., 2018).

Wśród zjawisk pogodowych o dużym potencjale modyfikacji warstwy granicznej, a tym samym warunków atmosferycznych w zakresie rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia powietrza, są **wiatry fenowe**. Oddziaływanie wiatru fenowego na zanieczyszczenia powietrza jest bardzo różnorodne, ze względu na różne procesy atmosferyczne generowane przez ten typ wiatru, a przede wszystkim przez silną zależność warunków atmosferycznych od rzeźby terenu w skali lokalnej i regionalnej. Do procesów atmosferycznych związanych z wiatrami fenowymi, które mają znaczący wpływ na jakość powietrza na obszarach zurbanizowanych, należą:

1. Intensyfikacja inwersji temperatury powietrza w dolinie, w której znajduje się miasto m.in. poprzez wystąpienie tzw. fenu typu „*sandwich*" (Vergeiner, 2004), lub poprzez utworzenie się warstwy inwersyjnej zatrzymującej zanieczyszczenia wewnątrz zastoiska chłodnego powietrza, wskutek zmniejszenia miąższości warstwy mieszania (Drechsel i Mayr, 2008); procesy te są związane z dużym wzrostem poziomu zanieczyszczenia powietrza;
2. Usunięcie zastoiska chłodnego powietrza poprzez wniknięcie wiatru fenowego do doliny, turbulentną erozję w górnej warstwie zastoiska chłodnego powietrza lub oddziaływanie zastoiska chłodnego powietrza z orograficznymi falami grawitacyjnymi (Flamant i in., 2006; Drobinski i in., 2007); procesy te powodują poprawę warunków dyspersji zanieczyszczenia powietrza i zmniejszają ich poziom stężenia.

Dotychczas wpływ wiatrów fenowych na stężenie zanieczyszczenia powietrza badany był głównie w skali regionalnej (np. Mira-Salama i in., 2008; Turton i in., 2018; Alvarez i Carbajal, 2019), natomiast

badania w skali miasta stanowią rzadkość (np. Corsmeier i in., 2006; Li X. i in., 2015). Należy jednak wspomnieć, że mechanizmy oddziaływania zjawisk atmosferycznych na dynamikę PBL i warunki dyspersji zanieczyszczenia powietrza, dobrze poznane dzięki badaniom licznych obszarów górskich, mogą być znacząco modyfikowane przez specyficzne procesy o skali lokalnej (Serafin i in., 2018; Giovannini i in., 2020).

Metody pomiarów parametrów atmosfery w profilu pionowym

W celu uzyskania ogólnej informacji o stanie atmosfery dla danego regionu konieczne są zarówno naziemne pomiary przestrzenne jak i pomiary w profilu pionowym elementów meteorologicznych i jakości powietrza. Rozwój technologii w ostatnich dekadach umożliwia wykorzystanie wielu metod pomiarowych do oceny pionowego składu chemicznego oraz stratyfikacji pionowej atmosfery (parametrów meteorologicznych). Są to m.in. pomiary stacjonarne z wykorzystaniem lokalnej infrastruktury (maszt, wieża nadawcza), pomiary naziemne w profilu pionowym doliny, wykorzystanie balonów, statków powietrznych, czujników opartych na emisji wiązki akustycznej (ang. *Sound Detection and Ranging Device*, SODAR) oraz lasera (ang. *Light Detection and Ranging Device*, LIDAR).

Należy jednak wspomnieć, że każda z wymienionych wyżej metod pomiarowych posiada pewne ograniczenia:

- pomiary stacjonarne: mała rozdzielczość przestrzenna i pionowa pomiarów,
- pomiary satelitarne: słaba rozdzielczość przestrzenna i pionowa wykonywanego pomiaru, możliwa dla danego regionu w ściśle określonym oknie czasowym w ciągu doby (reżim czasowy krążenia na orbicie) oraz błąd wynikający z pomiaru pośredniego (Ferrero i in., 2019),
- pomiar z wykorzystaniem LIDAR-u: dolna granica pomiaru wynosi od dziesiątek do kilkuset metrów nad poziomem gruntu w pobliżu źródła wiązki (Pardyjak i Stoll, 2017),
- pomiar z wykorzystaniem SODAR-u: zastosowanie SODAR-u w badaniach miejskich jest utrudnione ze względu na generowany hałas akustyczny uciążliwy dla mieszkańców oraz błąd pomiaru związany z hałasem miejskim i echem pochodzącym od pobliskich budynków (Barlow, 2014),
- pomiar z wykorzystaniem statków powietrznych (balon, samolot, bezzałogowe statki powietrzne): ograniczony maksymalny udźwig, ograniczony czas lotu, maksymalna wysokość lotu, oraz brak możliwości lotu w określonych warunkach atmosferycznych (np. wystąpienie warunków burzowych, silnego wiatru bądź porywów wiatru, opadu atmosferycznego czy też oblodzenia śmigieł); w przypadku dużych obiektów latających (balon i samolot), wymagana jest rozbudowana i kosztowna infrastruktura oraz uzyskanie zezwoleń ze strony obsługi lotnictwa cywilnego (wydzielone strefy czasowe i przestrzenne).

Biorąc pod uwagę powyższe ograniczenia, pomimo dostępności wielu metod do badania atmosfery w pionie w obszarach zurbanizowanych, liczba miejsc, gdzie wykonywane są ciągłe, wieloletnie pomiary jest wciąż ograniczona (np. Helsinki Wood i in., 2013, Paryż Renard i in., 2020). Warto dodać, że jednym z ograniczeń są koszty zakupu aparatury i utrzymania złożonej infrastruktury pomiarowej wraz z dużym nakładem pracy. Badania prezentowane w ostatnich latach skupiają się na pomiarach wybranych epizodów (pomiary kilkudniowe) (Wang i in., 2018; Xu i in., 2019), miesięcy (Zhang i in., 2017) czy też sezonów (Strbova i in., 2017).

Bezzałogowe statki powietrzne (ang. *Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) a szczególnie statki wielowirnikowe (dron, UAV-MR) stanowią obiecujące nisko kosztowe narzędzie dla pomiarów in situ w profilu pionowym od poziomu gruntu do określonej wysokości, w zakresie składu chemicznego atmosfery i parametrów meteorologicznych. Szczególnie istotne są tutaj obszary o dużym zróżnicowaniu terenu, gdzie zmienność warunków meteorologicznych i jakości powietrza jest znacząca (Giovannini i in., 2020). Ponadto, wykorzystanie tej metody stwarza możliwość uzupełnienia luki pomiarowej w obserwacjach stanu atmosfery w warstwie przyziemnej o grubości sięgającej do kilkuset metrów nad poziomem gruntu (Leuenberger i in., 2020).

Numeryczne modele prognoz pogody

Kluczowym źródłem informacji o przestrzennym i czasowym zróżnicowaniu warunków pogodowych nad danym obszarem są numeryczne modele prognoz pogody oraz reanalizy atmosferyczne, których znaczenie w badaniach naukowych jest coraz większe. Warto zaznaczyć, że ciągły rozwój wiedzy na temat procesów fizyko–chemicznych w atmosferze przyczynia się do ulepszania numerycznych modeli prognoz pogody. Jednakże, testy nowych konfiguracji modeli wskazują, że prognozy numeryczne dla regionów o zróżnicowanej rzeźbie terenu wciąż stanowią wyzwanie dla obecnych systemów prognoz pogody (Lehner i Rotach, 2018; Giovannini i in., 2020). Jednym z istotnych problemów z którymi mierzą się naukowcy jest duża zmienność warunków meteorologicznych wewnątrz jednostkowej komórki siatki modelu, m.in. opad atmosferyczny, występowanie pokrywy śnieżnej, rozkład przestrzenny temperatury i wilgotności powietrza a także pola wiatru. Duża zmienność warunków meteorologicznych na stosunkowo niewielkim obszarze stanowi wyzwanie w procesie weryfikacji prognoz numerycznych poprzez ich porównanie z obserwacjami, m.in. błąd prognozowanego położenia i czasu wystąpienia zjawiska atmosferycznego (Amodei i in., 2015). Przykładem słabej reprezentatywności modelu w obszarze górskim jest prognozowanie warunków stabilnej atmosfery, w szczególności epizodów występowania zastoisk chłodnego powietrza (niedoszacowanie gradientu termicznego w dolinie i przeszacowanie temperatury minimalnej przy gruncie). Badania wykazały, że potencjalnym źródłem tego błędu jest między innymi nieodpowiednia rozdzielczość przestrzenna modelu dla badanego regionu (Lehner i Rotach, 2018) a także struktura schematów fizycznych i ich czułość na zmianę konfiguracji (Sheridan, 2019).

Badania wpływu warunków pogodowych na stężenia zanieczyszczeń powietrza w Polsce

Badania dla różnych regionów w Polsce potwierdzają negatywny wpływ występowania inwersji termicznych na jakość powietrza (Nidzgorska-Lencewicz i Czarnecka, 2015; Posyniak i in., 2021; Łupikasza i Niedźwiedź, 2022). Kluczowym elementem w sezonie chłodnym determinującym poziom stężenia zanieczyszczenia jest poziom emisji z systemu komunalno-bytowego, który zależny jest głównie od dobowej temperatury powietrza (Czarnecka i Nidzgorska-Lencewicz, 2011; Szczepanik i Markowicz, 2018; Werner i in., 2019a). Badania z wykorzystaniem LIDARu w sezonie chłodnym wskazały, że emisja powierzchniowa zanieczyszczenia $PM_{2.5}$ i PM_{10} kształtuje rozkład pionowy aerozoli do wysokości kilkuset metrów (Szczepanik i Markowicz, 2018). Badania z wykorzystaniem UAV-MR wskazały, że warstwy o podwyższonym stężeniu aerozoli mogą występować do wysokości 50-100 m n.p.g, poniżej dolnej granicy pomiaru ceilometru (Chilinski i in., 2018).

Rozwój wiedzy na temat oddziaływania aerozoli na procesy atmosferyczne w Polsce, ich rozkładu przestrzenno-czasowego oraz właściwości optycznych możliwe było dzięki stworzeniu infrastruktury naukowej sieci badawczej Poland-AOD składającą się z 10 stacji badawczych (Markowicz i in., 2021). Badania transportu makroskalowego zanieczyszczenia z wykorzystaniem LIDARu wskazały na częste występowanie tego zjawiska wiosną i latem, kiedy emisja zanieczyszczenia pyłowego w znaczącym stopniu pochodzi ze źródeł naturalnych a głęboka konwekcja transportuje aerozole do środkowej bądź górnej warstwy troposfery. Analiza wskazała, że zanieczyszczenie powietrza związane z silnym spalaniem biomasy pochodziło głównie z pożarów w Europie (obszar Ukrainy) oraz Północnej Ameryki (Ortiz-Amezcua i in., 2017; Wang i Stachlewska, 2019).

Należy również wspomnieć, że monitoring jakości powietrza w skali województw oraz całego kraju, realizowany jest przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ) oraz 16 wojewódzkich inspektoratów ochrony środowiska. Mapa rozkładu stężeń średniorocznych pyłu $PM_{2.5}$ w roku 2017 wskazała, że największy obszar o najwyższym poziomie stężenia stanowiła konurbacja górnośląska, co jest spowodowane znaczącym zróżnicowaniem środowiska geograficznego i silnym uprzemysłowieniem tego regionu.

Kluczowym narzędziem umożliwiającym szczegółową analizę wpływu zjawisk pogodowych i przemian fizyko-chemicznych na jakość powietrza są modele numeryczne (Juda-Rezler et al. 2011;

Struzewska i Kaminski, 2012). Badania dla terenu Polski z wykorzystaniem modelu WRF-CHEM wskazały na zróżnicowanie przestrzenno-czasowe celności prognozy (Werner i in., 2019b). Analiza wpływu asymilacji danych powierzchniowych meteorologicznych i jakości powietrza na jakość prognoz numerycznych zanieczyszczenia powietrza potwierdziły ich kluczowe znaczenie zarówno w półroczu ciepłym jak i chłodnym dla obszaru Polski (Werner i in., 2019a; Werner i in., 2019b).

Obszar objęty analizą w niniejszej pracy to aglomeracja krakowska, która była również wcześniej wielokrotnie poddana szczegółowym badaniom stanu zanieczyszczenia, w tym też pyłami. Pojawiło się wiele prac na temat uwarunkowań meteorologiczno-środowiskowych stanu atmosfery dla powyższego obszaru (Morawska-Horawska, 1978; Lewińska i in., 1982; Niedźwiedź i Olecki, 1995; Walczewski i in.,1996; Bokwa, 2007). Badania naukowe wykazały silną zależność wysokich stężeń pyłu zawieszonego od wystąpienia niekorzystnych warunków atmosferycznych oraz kierunków adwekcji mas powietrza (Niedźwiedź i Olecki, 1994; Bokwa, 2011). W warunkach stabilnej atmosfery, charakteryzujących się słabą prędkością wiatru i znikomą adwekcją obserwowany jest wzrost stężenia gazów cieplarnianych oraz zanieczyszczenia powietrza wewnątrz planetarnej warstwy granicznej (Zimnoch i in., 2010; Zimnoch i in., 2019). Monografia J. Godłowskiej (2019) stanowi podsumowanie wieloletnich badań wpływu warunków meteorologicznych na jakość powietrza w Krakowie, prowadzonych przez Zakład Teledetekcji Atmosfery, obecnie Zakład Meteorologii, Klimatologii i Ochrony Atmosfery w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytucie Badawczym (IMGW-PIB). Badania zależności stratyfikacji termicznej od typu cyrkulacji atmosferycznej wykazały, że w półroczu chłodnym adwekcja z sektora południowego a także wystąpienie ośrodka wysokiego ciśnienia (centrum wyżu i klin wyżowy) powodowały, że czas trwania inwersji termicznej był najdłuższy. Dla wyżej wymienionych sytuacji barycznych korzystnym czynnikiem wpływającym na wystąpienie inwersji termicznej była słaba prędkość wiatru w dolinie spowodowana lokalnym ukształtowania terenu (Bokwa, 2011). Badania występowania mgły w okresie 1966–2015 w Krakowie wskazały, że znaczący trend malejący tego zjawiska w okresie chłodnym związany jest z poprawą jakości powietrza. W takiej sytuacji rośnie wpływ cyrkulacji atmosferycznej na wystąpienie tego zjawiska w sezonie chodnym (Bokwa i in., 2018). Poprawa jakości powietrza występowała natomiast w przypadku silnej konwekcji oraz sytuacji z wysokimi prędkościami wiatru (Oleniacz i in., 2016; Godłowska, 2019).

Pomimo licznych badań prowadzonych dla tego regionu nadal niewystarczająco poznany jest wpływ kierunków adwekcji na dynamikę warstwy granicznej w Krakowie, wiatru fenowego oraz innych zjawisk atmosferycznych determinujących zróżnicowany rozkład przestrzenny zanieczyszczenia. Przegląd literatury wykazał, że w rejonie Krakowa nie były prowadzone badania prezentujące czasową zmienność stężenia PM_{10} w profilu pionowym w chłodnej porze roku co zostało zaprezentowane w niniejszej rozprawie.

Powyżej przytoczono tylko najważniejsze prace, które wprowadziły nowe wątki badań wpływu warunków meteorologicznych na poziom zanieczyszczeń w mieście.

2. Cel i koncepcja pracy

Celem głównym badań opisanych w niniejszej pracy doktorskiej jest ilościowe określenie wpływu warunków pogodowych (o charakterze lokalnym i regionalnym) na rozkład czasowy i zróżnicowanie przestrzenne zanieczyszczenia powietrza PM_{10} w dużym obszarze zurbanizowanym położonym we wklęsłej formie terenu jaki stanowi aglomeracja krakowska. Analiza została wykonana z wykorzystaniem najnowszych technik pomiarowych i metod badawczych.

Opracowanie to obejmuje swoją tematyką nie tylko aspekt poznawczy, ale i metodyczny. Aspekt poznawczy nawiązuje do opracowania modeli konceptualnych wpływu zjawisk atmosferycznych na dyspersję zanieczyszczenia w zurbanizowanej dolinie. Aspekt metodyczny odnosi się natomiast do udoskonalenia metodyki profilowania pionowego atmosfery oraz wykorzystania symulacji z modeli numerycznych prognoz pogody celem uzupełnienia danych z nieregularnej sieci pomiarowej. Do opracowania modeli konceptualnych konieczne było poznanie zmienności zjawisk atmosferycznych dla

analizowanego regionu w różnych skalach czasowo–przestrzennych. Rozprawę stanowi pięć artykułów naukowych powiązanych tematycznie opublikowanych w czasopismach wchodzących w skład listy Journal Citation Reports. Realizacji głównego celu służyły cele szczegółowe obejmujące:

(1) rozpoznanie czasowej i przestrzennej zmienności występowania przygruntowej inwersji temperatury powietrza na terytorium Karpat Zachodnich (**publikacja A1**),
(2) identyfikację głównych mechanizmów mających wpływ na dyspersję zanieczyszczenia w dolinie towarzyszących wystąpieniu wiatru fenowego w okresie chłodnym (**publikacja A2**),
(3) skonstruowanie bezzałogowego systemu do pomiarów pionowych atmosfery i stworzenie procedury opracowania danych (**publikacja A3**),
(4) identyfikację czynników atmosferycznych kształtujących dyspersję pionową zanieczyszczenia w zurbanizowanej dolinie (**publikacja A3** i **A4**),
(5) wyznaczenie zależności pomiędzy poszczególnymi elementami pogody a poziomem zanieczyszczenia dla miasta zlokalizowanego w dolinie (**publikacja A5**),
(6) ilościową ocenę wpływu cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza w Krakowie oraz sprawdzenie możliwości ich zastosowania do prognozowania jakości powietrza w mieście (**publikacja A5**).

Aby zrealizować cele szczegółowe postawiono pięć hipotez badawczych:

H1 zwiększenie rozdzielczości przestrzennej i pionowej siatki numerycznych modeli prognoz pogody na terenach górskich znacząco poprawia dokładność prognoz temperatury (**publikacja A1**),
H2 adwekcja ciepłych i suchych mas powietrza w sezonie chłodnym z sektora południowego (w tym wiatru halnego) negatywnie wpływa na warunki dyspersji w Krakowie modyfikując strukturę miejskiej warstwy granicznej (**publikacja A2**),
H3 bezzałogowe statki powietrze mogą być wykorzystane w miastach do profilowania miejskiej warstwy granicznej, dostarczając dodatkowych informacji o dynamice struktury pionowej atmosfery (**publikacja A3**),
H4 występowanie ścinania wiatru nad doliną przyczynia się do pogorszenia warunków aerosanitarnych poprzez modyfikację wysokości warstwy mieszania (**publikacja A4**),
H5 metody uczenia maszynowego mogą być wykorzystane do prognozowania jakości powietrza dla obszarów o dużym zróżnicowaniu terenu (**publikacja A5**).

3. Obszar badań

Badania przeprowadzono dla obszaru województwa małopolskiego ze szczególnym uwzględnieniem Krakowa i jego okolic. Z uwagi na znaczące zróżnicowanie ukształtowania tego terenu, utrudniające naturalne przewietrzanie, problem zanieczyszczenia powietrza jest tutaj bardzo istotny. Dotyczy to zwłaszcza występowania epizodów z bardzo wysokimi stężeniami PM_{10} w sezonie chłodnym.

Ukształtowanie terenu

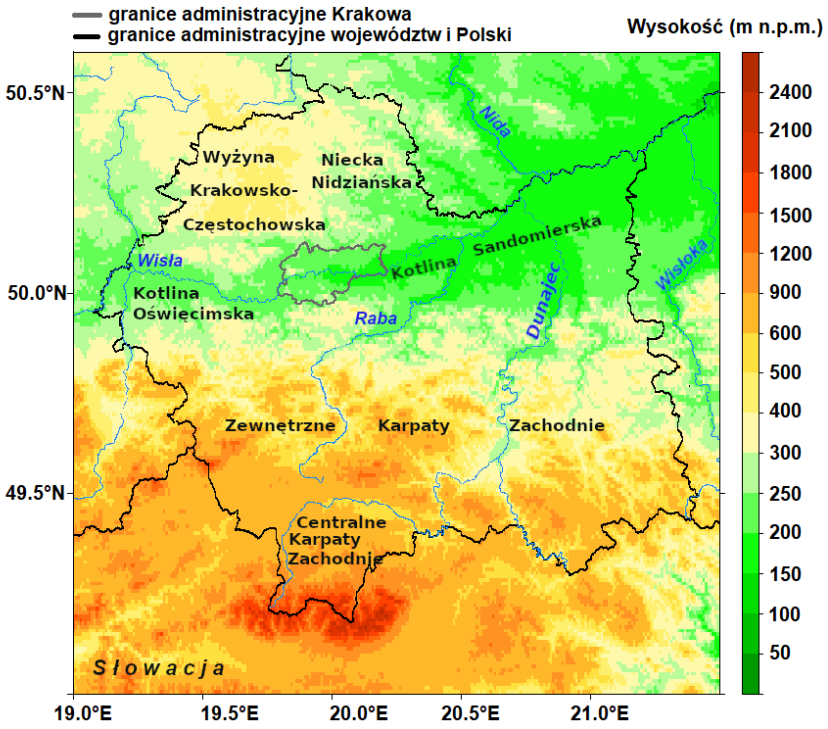
Województwo małopolskie położone jest w południowej części Polski, obejmuje ono obszar 15 183 km^2, stanowiący 4,9% powierzchni kraju, graniczy ono z województwami: śląskim, świętokrzyskim, podkarpackim, a na południu ze Słowacją. Stolicą województwa jest Kraków, będący drugim pod względem wielkości (powierzchnia miasta - 327 km^2; liczba mieszkańców pod koniec czerwca 2021 - 780 tys.) miastem w Polsce (GIOŚ, 2020; US, 2021).

Obszar województwa obejmuje obszary stanowiące fragmenty ułożonych równoleżnikowo następujących jednostek fizyczno–geograficznych (Solon i in., 2018):

- w części środkowej: podprowincja Podkarpacie Północne (makroregiony: Kotlina Sandomierska
  i Kotlina Oświęcimska połączone Bramą Krakowską),
- w części północnej: podprowincje Wyżyna Śląsko-Krakowska i Wyżyna Małopolska (makroregiony: Wyżyna Krakowsko–Częstochowska, Wyżyna Śląska i Niecka Nidziańska),
- w części południowej: podprowincje Zewnętrzne Karpaty Zachodnie i Centralne Karpaty Zachodnie (m.in. z pasmami Beskidów i Tatrami, obejmujące około 60% powierzchni województwa).

Mapa hipsometryczna województwa małopolskiego wraz z zaznaczonymi jednostkami fizyczno-geograficznymi została przedstawiona na Rycinie 1. Położenie obszaru województwa małopolskiego na terenie kilku odmiennych krain geograficznych powoduje znaczne zróżnicowanie środowiska. Różnica między najniżej i najwyżej położonym punktem województwa (punkt w Dolinie Wisły koło Słupca o wysokości 158 m n.p.m. i szczyt Rysy o wysokości 2 499 m n.p.m.) wynosząca ponad 2 300 metrów, jest przyczyną piętrowego zróżnicowania warunków klimatycznych, hydrologicznych, glebowych oraz roślinnych. Około 30% powierzchni województwa położona jest powyżej wysokości 500 m n.p.m.

Obszar regionu charakteryzuje się występowaniem 7 pięter klimatycznych oraz licznych mikroklimatów górskich (Hess, 1965). Województwo małopolskie leży w strefie klimatu umiarkowanego o cechach przejściowych, który kształtowany jest przez różnorodne masy powietrza o zróżnicowanych właściwościach fizycznych. Dominujący wpływ wywierają napływające z zachodu wilgotne masy powietrza polarno-morskiego oraz mniej częste, napływające ze wschodu oraz północnego wschodu suche i chłodne masy powietrza polarno–kontynentalnego oraz arktycznego (Niedźwiedź i Ustrnul, 2021). Przestrzenne zróżnicowanie temperatury powietrza w Małopolsce zależy głównie od wysokości nad poziomem morza, ukształtowania i ekspozycji terenu. Szczególnie duże zróżnicowanie warunków klimatycznych wiążące się z topografią terenu występuje w Karpatach Zachodnich. Ze względu na swoje wyniesienie, Karpaty charakteryzują się również najostrzejszymi warunkami klimatycznymi.



Rycina 1. *Mapa hipsometryczna województwa małopolskiego z głównymi regionami fizyczno-geograficznymi według Solon i in. (2018).*

Emisja zanieczyszczeń

Według raportu Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, w roku 2018, w województwie małopolskim decydującym czynnikiem mającym wpływ na jakość powietrza była emisja powierzchniowa, do której zaliczamy głównie emisje pochodzące z sektora komunalno–bytowego (GIOŚ, 2020). Emisja powierzchniowa w skali województwa w roku 2018 odpowiadała za około 88% emisji $PM_{2.5}$ i 77% emisji PM_{10}. Z kolei, emisja liniowa, czyli transport w skali województwa odpowiadała za około 5% emisji PM_{10} oraz 4% emisji $PM_{2.5}$, natomiast emisja punktowa stanowiła 8% emisji pyłu PM_{10} i 4% pyłu $PM_{2.5}$. Emisja z sektora komunalno–bytowego pochodzi głównie z kotłowni lokalnych oraz indywidualnych, powstając w wyniku spalania paliw stałych, głównie węgla oraz drewna. Na wielkość emisji ze źródeł ogrzewania, ma wpływ przede wszystkim rodzaj stosowanego paliwa. Zjawisko niskiej emisji występuje zwykle w okresie jesienno–zimowym, kiedy ze względu na niskie temperatury konieczne jest zwiększenie zużycia paliwa w celach ogrzania budynków. W sezonie letnim emisja z sektora komunalno–bytowego spada i ogranicza się do gospodarstw wykorzystujących kotły na paliwa stałe do podgrzania wody. W stosunku do roku 2013, na większości stacji zaznacza się tendencja spadkowa ilości dni z przekroczeniami. Wyjątek stanowi rok 2018, w którym liczba dni z przekroczeniem normy dobowej PM_{10} w sposób znaczny wzrosła na części stacji (w Krakowie, Niepołomicach, Tuchowie). W latach 2013-2018 średnioroczne stężenia pyłu zawieszonego PM_{10} pozostawały na zbliżonym poziomie. Norma roczna wynosząca 40 $\mu g \cdot m^{-3}$ przekraczana była między innymi na stacjach w Aglomeracji Krakowskiej, Nowym Sączu, Skawinie oraz w Tuchowie. Należy wspomnieć, że od lat prowadzone są działania mające na celu poprawę jakości powietrza w województwie małopolskim polegające na ograniczeniu emisji zanieczyszczeń z sektora przemysłowego (redukcja emisji zanieczyszczeń pyłowych o 68% w okresie 2008-2018), ale również komunalno–bytowego czy komunikacji. Działania te polegają między innymi na likwidacji kotłów na paliwo stałe, termomodernizacji budynków, instalacji odnawialnych źródeł energii, modernizacji komunikacji publicznej i sieci ciepłowniczych czy też rozbudowy dróg rowerowych.

Mobilne pomiary stężeń pyłów zawieszonych w sezonie chłodnym w obrębie Krakowa, Podhala oraz Górnego Śląska wykonane przez Zespół Fizyki Środowiska Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (WFiIS AGH) na zlecenie stowarzyszenia „Krakowski Alarm Smogowy" wskazały na znaczną zmienność przestrzenną i czasową poziomów stężeń PM_{10} dla tego obszaru (silny wpływ lokalnych źródeł pyłów zawieszonych). Związane było to z wysoką dynamiką wzrostu stężeń i stabilnymi warunkami atmosfery utrudniającymi dyspersję zanieczyszczenia na większym obszarze. Badania potwierdziły również występowanie podwyższonego poziomu zanieczyszczeń w miejscowościach położonych w głęboko wciętych kotlinach górskich w stosunku do terenów położonych ponad dnem doliny (Bartyzel i in., 2016).

Analiza przypadków wystąpienia wysokiego poziomu stężenia zanieczyszczenia PM_{10} w okresie silnych warunków inwersyjnych dla wybranych kotlin Karpat Polskich wskazała, że koncentracja PM_{10} i SO_2 nie jest zależna wyłącznie od wielkości miasta. Stężenie PM_{10} i SO_2 w kategorii miast relatywnie małych (liczba mieszkańców poniżej 100 tys.) było porównywalne, a okresowo nawet wyższe niż dla miast, gdzie liczba mieszkańców przekraczała 500 tys. Jednym z kluczowych elementów wpływających na poziom stężenia zanieczyszczenia stanowi otoczenie stacji pomiarowych, a szczególnie położenie lokalnych źródeł emisji (Palarz i Celiński-Mysław, 2017).

4. Dane wykorzystane w badaniach

4.1. Naziemne pomiary meteorologiczne i zanieczyszczenia powietrza

Analiza wpływu oddziaływania rzeźby tereny na zjawiska atmosferyczne w szerokiej skali czasowo-przestrzennej wymagała zastosowania szerokiego spektrum danych i metod pomiarowych opisanych

w niniejszych rozdziałach. Poniższe podrozdziały poświęcone są charakterystyce naziemnych stacji meteorologicznych oraz stacji badających jakość powietrza, badań w profilu pionowym stanu atmosfery, klasyfikacji cyrkulacji atmosferycznej oraz numerycznym modelom prognoz pogody wykorzystanych w badaniach.

Województwo małopolskie

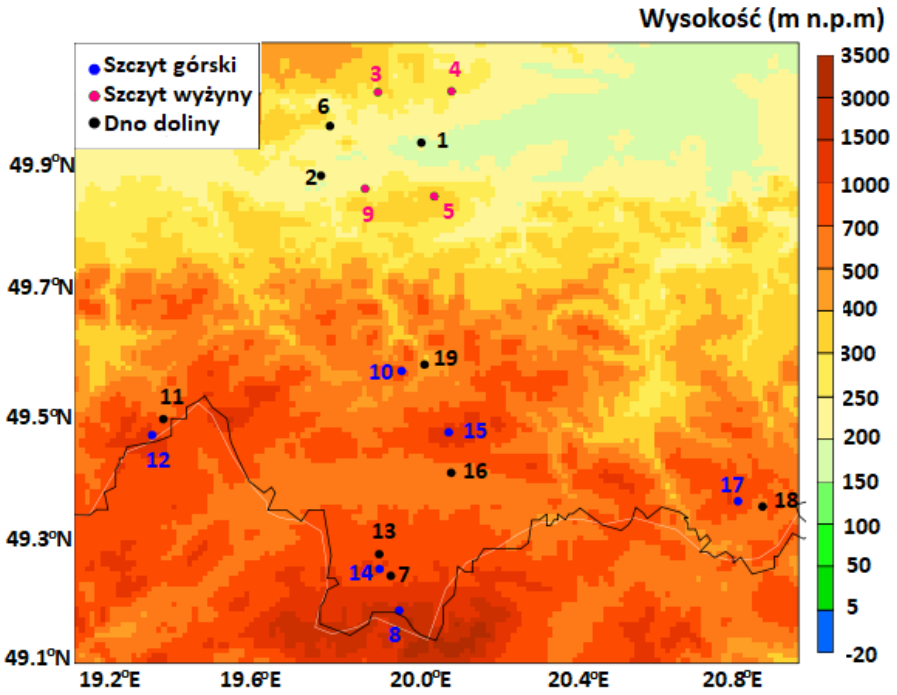
W celu rozpoznania czasowej i przestrzennej zmienności zróżnicowania przygruntowej inwersji temperatury powietrza na rozpatrywanym obszarze zostały wykorzystane godzinowe dane temperatury powietrza pochodzące z 19 stacji meteorologicznych i punktów pomiarowych. Wyniki badań zostały zaprezentowane w **publikacji A1**. Wyselekcjonowane stacje/punkty pomiarowe w możliwie dokładny sposób odzwierciedlały różnorodność stref klimatycznych analizowanego regionu wynikającą ze złożoności ukształtowania terenu. Stacje i punkty pomiarowe opisane poniżej zlokalizowane są we wklęsłych i wypukłych formach terenu, tj. w dolinach oraz na szczytach wyżyn bądź gór. Dane pomiarowe wykorzystane w badaniach obejmowały dwa przedziały czasowe: 1.01.2017-30.04.2017 i 1.09.2017-30.04.2018.

Spośród 19 stacji meteorologicznych, 14 zarządzanych jest przez IMGW-PIB (11 stacji automatycznych i 3 stacje synoptyczne). Pozostałych 5 punktów pomiarowych zlokalizowanych w okolicy Krakowa należą do Uniwersytetu Jagiellońskiego (UJ). Podstawowe informacje o stacjach/punktach pomiarowych zostały zamieszczone w Tabeli 1. Rycina 2 przedstawia położenie stacji/punktów pomiarowych wykorzystanych w badaniach.

Stacje/punkty pomiarowe zostały podzielone na dwie grupy reprezentujące dna dolin oraz szczyty wyżynne bądź górskie. Analiza zaprezentowana w dalszej części pracy została wykonana oddzielnie dla dwóch grup w celu zbadania zbieżności prognozowanej temperatury w zależności od lokalnych warunków środowiskowych.

Tabela 1. *Stacje meteorologiczne i punkty pomiarowe wykorzystane w badaniach stratyfikacji termicznej w Karpatach Zachodnich. Wyjaśnienie: UJ - Uniwersytet Jagielloński; IMGW-PIB - Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy (Tabela 1 w* ***publikacji A1****)*

Nr.	Nazwa	Szerokość geograficzna (°N)	Długość geograficzna (°E)	Wysokość (m n.p.m.)	Zarządca stacji	Położenie
1	Most Wandy, Kraków	50.053	20.049	197	UJ	Dno doliny
2	Jeziorzany	49.996	19.775	211	UJ	Dno doliny
3	Garlica Murowana	50.142	19.931	270	UJ	Szczyt wzgórza
4	Kocmyrzów	50.143	20.132	299	UJ	Szczyt wzgórza
5	Chorągwica	49.959	20.083	436	UJ	Szczyt wzgórza
6	Balice	50.083	19.800	237	IMGW-PIB	Dno doliny
7	Zakopane	49.294	19.960	855	IMGW-PIB	Dno doliny
8	Kasprowy Wierch	49.233	19.982	1991	IMGW-PIB	Szczyt górski
9	Libertów	49.973	19.895	314	IMGW-PIB	Szczyt wzgórza
10	Luboń Wielki	49.653	19.992	1022	IMGW-PIB	Szczyt górski
11	Korbielów	49.569	19.348	650	IMGW-PIB	Dno doliny
12	Pilsko	49.541	19.318	1270	IMGW-PIB	Szczyt górski
13	Nowe Bystre	49.332	19.929	800	IMGW-PIB	Dno doliny
14	Gubałówka	49.306	19.930	1123	IMGW-PIB	Szczyt górski
15	Turbacz	49.545	20.118	1240	IMGW-PIB	Szczyt górski
16	Łopuszna	49.474	20.124	568	IMGW-PIB	Dno doliny
17	Jaworzyna Krynicka	49.418	20.895	1112	IMGW-PIB	Szczyt górski
18	Krynica	49.408	20.961	585	IMGW-PIB	Dno doliny
19	Mszana Dolna	49.664	20.054	440	IMGW-PIB	Dno doliny



Rycina 2. *Lokalizacja stacji meteorologicznych/punktów pomiarowych na tle mapy hipsometrycznej domeny modelu o rozdzielczości 1 km × 1 km (Rycina 1 b w* ***publikacji A1****).*
Uzupełnienie: liczby odpowiadają stacjom meteorologicznym i punktom pomiarowym opisanych w Tabeli 1.

Kraków i okolice

W pracy szczególne znaczenie odegrały dane pochodzące z Krakowa i okolic. Ze względu na dużą liczbę stacji pomiarowych: meteorologicznych oraz jakości powietrza na obszarze Krakowa i okolic, wysoką gęstość zaludnienia, a także znaczące zróżnicowanie rzeźby terenu region ten został wykorzystany do badań modyfikacji zjawisk atmosferycznych przez rzeźbę terenu w skali lokalnej. W tym celu zostały pozyskane obserwacje meteorologiczne temperatury powietrza, wilgotności względnej, kierunku i prędkości wiatru oraz zachmurzenia z 14 stacji meteorologicznych i punktów pomiarowych na terenie Krakowa i okolic. Stacje meteorologiczne i punkty pomiarowe zlokalizowane są we wklęsłych i wypukłych formach terenu (tj. w dolinach i na szczytach wzgórz), aby zaprezentować różnorodność lokalną klimatu będącego wynikiem złożonej rzeźby terenu. Spośród 14 stacji wykorzystanych w pracy, 3 stacje zarządzane są przez IMGW-PIB (2 stacje automatyczne i 1 stacja synoptyczna). Dziesięć punktów pomiarowych zlokalizowanych w Krakowie oraz okolicy zarządzane jest przez Uniwersytet Jagielloński, szczegółowe informacje na temat stacji można znaleźć w pracy Bokwy (2010). Pomiary ze stacji naziemnych zostały uzupełnione o obserwacje temperatury i wilgotności względnej powietrza w profilu pionowym mierzone na wysokości 2, 50 i 100 m n.p.g. z wykorzystaniem wieży telekomunikacyjnej firmy Emitel zlokalizowanej w Krakowie przy ul. Malczewskiego, w zachodniej części doliny (zarządcą jest Uniwersytet Jagielloński). Dodatkowo, wykorzystano obserwacje parametrów meteorologicznych ze stacji zlokalizowanej na ul. Reymonta (centrum miasta), położonej na dachu Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Szczegółowe informacje o położeniu stacji meteorologicznych i punktów pomiarowych zamieszczone są w Tabeli 2. Dane pomiarowe wykorzystane w badaniach obejmują cztery przedziały czasowe: IX 2017-IV 2018 (**publikacja A2**), IX 2018-IV 2019 (**publikacje A2**, **A3**, **A4**) i IX 2019-IV 2020 (**publikacja A4**) oraz IX 2000-IX 2020 (**publikacja A5**).

Tabela 2. *Lokalizacja stacji meteorologicznych i punktów pomiarowych zlokalizowanych w Krakowie i okolicy zaprezentowane w* ***publikacjach A2-A5****.*

Nr.	Nazwa	Szerokość geograficzna (°N)	Długość geograficzna (°E)	Wysokość (m n.p.m.)	Zarządca stacji	Położenie	Dane meteorologiczne
1	Balice	50.083	19.800	237	IMGM-PIB	Dno doliny	V, D, T, RH, CC
2	Libertów	49.973	19.895	314	IMGM-PIB	Szczyt wyżyny	V, D, T, RH
3	Igołomia	50.100	20.266	202	IMGM-PIB	Dno doliny	V, D, T, RH
4	ul. Reymonta	50.075	19.913	220	AGH	Dno doliny	V, D, T, RH
5	Al. Krasińskiego	50.058	19.926	204	UJ	Dno doliny	T
6	Teatr Słowackiego	50.050	19.950	215	UJ	Dno doliny	T, RH
7	ul. Bojki	50.006	19.961	252	UJ	50 m powyżej dna doliny	T
8	Jeziorzany	49.995	19.775	211	UJ	Dno doliny	T, RH
9	Kocmyrzów	50.142	20.131	299	UJ	Szczyt wyżyny	T
10	Chorągwica	49.958	20.082	436	UJ	Szczyt wyżyny	T
11	Maszt RTCN: 2 m n.p.g. 50 m n.p.g. 100 m n.p.g.	50.050	19.908	222 272 322	UJ	Dno doliny	T, RH
12	os. Szkolne	50.077	20.047	205	UJ	Dno doliny	T
13	Ogród Botaniczny	50.060	19.950	206	UJ	Dno doliny	V, D, Ac len
14	Kampus UJ	50.026	19.902	212	UJ	Dno doliny	V, D, T, RH

Uzupełnienie: AGH – Akademia Górniczo Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, UJ – Uniwersytet Jagielloński. Szczegółowe informacje o punktach pomiarowych zarządzanych przez UJ znajdują się w pracy (Bokwa, 2010). V – prędkość wiatru, D – kierunek wiatru, T – temperatura powietrza, RH – wilgotność względna powietrza, CC – zachmurzenie, Ac len – chmury Altocumulus lenticularis.

Analiza warunków meteorologicznych czterech przedziałów czasowych wymienionych powyżej została uzupełniona o pomiary stężenia pyłu zawieszonego PM_{10} pochodzące z 8 stacjonarnych punktów pomiarowych o rozdzielczości godzinowej. Spośród 8 stacji jakości powietrza 7 punktów pomiarowych jest zarządzanych przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie (baza danych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ), https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives). Ostatnia stacja zlokalizowana jest na ul. Reymonta (centrum miasta), położona na dachu WFiIS AGH (Tabela 2, nr. 4). Należy zwrócić uwagę, że liczba stacji pomiarowych jakości powietrza GIOŚ w całym badanym okresie nie była stała, przed rokiem 2017 w Krakowie działały tylko 3 stacje monitoringu: na ul. Bulwarowej, os. Kurdwanów i Al. Krasińskiego spośród których najdłuższą serię danych posiada stacja pomiarowa na Al. Krasińskiego.

Punkty pomiarowe GIOŚ reprezentują kilka części miasta i są zlokalizowane w różnych typach ukształtowania oraz użytkowania terenu (lokalizacja punktów pomiarowych – Rycina 3):

A. Al. Krasińskiego: stacja komunikacyjna położona w centrum miasta, w dnie doliny Wisły;
B. ul. Dietla: stacja komunikacyjna położona przy skrzyżowaniu w centrum miasta, w dnie doliny Wisły;
C. os. Kurdwanów: teren podmiejski z dużą dzielnicą bloków mieszkalnych, w południowej części miasta, około 50 m ponad dnem doliny;
D. ul. Bulwarowa: teren podmiejski z dużą dzielnicą bloków mieszkalnych, położony w pobliżu huty stali, we wschodniej części miasta, w tarasie rzeki Wisły;
E. os. Piastów: teren podmiejski z dużą dzielnicą bloków mieszkalnych, we wschodniej części miasta, położony na stokach wyżynnych, około 50 m ponad dnem doliny;

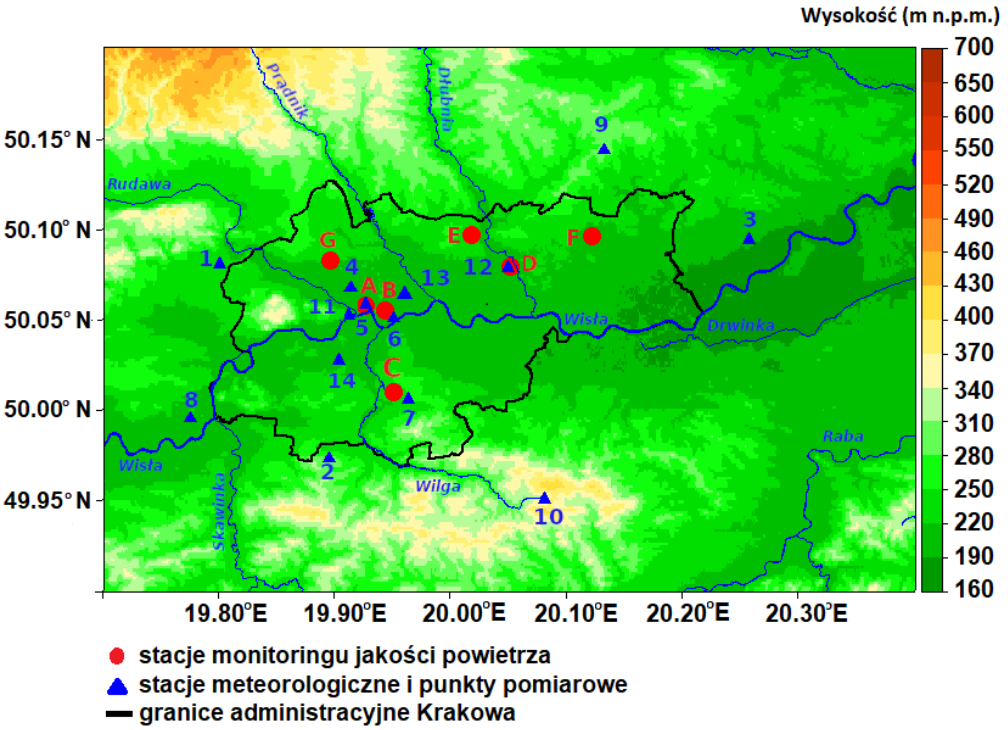
F. os. Wadów: teren podmiejski o charakterze rolniczym z luźną zabudową mieszkalną, położony w pobliżu huty stali, na tarasie rzecznym we wschodniej części doliny Wisły;
G. ul. Złoty Róg: teren podmiejski z dużą dzielnicą blokową i zabudowaną mieszkalną na stoku wyżyny, w zachodniej części miasta.

Szczegółowe informacje dotyczące położenia geograficznego stacji jakości powietrza GIOŚ zamieszczone są w Tabeli 3.

Tabela 3. *Lokalizacja stacji jakości powietrza GIOŚ w Krakowie.*

Symbol	Nazwa	Szerokość geograficzna (°N)	Długość geograficzna (°E)	Wysokość (m n.p.m.)	Położenie
A	Al. Krasińskiego	50.057	19.926	207	Dno doliny
B	ul. Dietla	50.054	19.943	209	Dno doliny
C	os. Kurdwanów	50.011	19.949	223	50 m ponad dnem doliny
D	ul. Bulwarowa	50.079	20.051	195	Dno doliny
E	os. Piastów	50.097	20.018	239	Stok doliny
F	os. Wadów	50.096	20.121	218	Dno doliny
G	ul. Złoty Róg	50.082	19.895	218	Stok doliny

Rycina 3 reprezentuje położenie wszystkich stacji meteorologicznych i jakości powietrza z których pomiary zaprezentowano w **publikacjach A2**-**A5** na tle mapy orograficznej badanego obszaru.



Rycina 3. *Położenie stacji meteorologicznych i jakości powietrza w Krakowie i okolicach zaprezentowanych* ***publikacjach A2***-***A5****.*
Uzupełnienie: litery i liczby odpowiadają stacjom opisanym w Tabeli 2 i 3.

4.2. Badania w profilu pionowym atmosfery

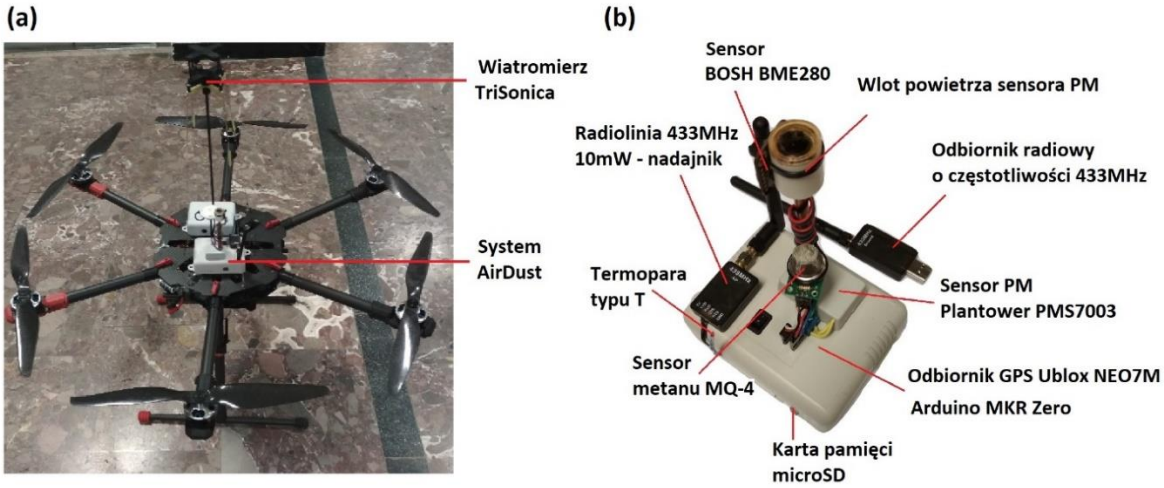
Pomiary stratyfikacji pionowej atmosfery oraz stężenia PM_{10} w profilu pionowym przedstawione w niniejszej pracy zostały wykonane z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego i balonu na uwięzi.

Pomiary z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego

W ramach prac badawczych wykonywanych przez Zespół Fizyki Środowiska WFiIS AGH został skonstruowany układ pomiarowy umożliwiający wykonywanie pomiarów pionowych atmosfery z wykorzystaniem wielowirnikowego bezzałogowego statku powietrznego powszechnie nazywanego dronem.

System pomiarowy wyposażono w czujniki parametrów meteorologicznych oraz jakości powietrza. Został on zamontowany na środku wielowirnikowego statku bezzałogowego, powyżej wysokości śmigieł. Należy zwrócić uwagę, że jest to możliwie najlepsze położenie czujników co potwierdziły dotychczasowe badania (Crazzolara i in, 2019; McKinney i in., 2019).

Rycina 4 i 5 prezentuje bezzałogowy statek powietrzny wyposażony w systemy pomiarowe zaprojektowane i skonstruowane przez Zespół Fizyki Środowiska WFiIS AGH. System AirDust (Rycina 4 b) przeznaczony jest do pomiarów temperatury powietrza, wilgotności względnej, ciśnienia atmosferycznego oraz stężenia PM_{10}. System oparty jest na mikrokontrolerze Arduino MKR Zero, odpowiedzialnym za komunikację z sensorami, zapis danych na karcie pamięci oraz transfer danych w czasie rzeczywistym do naziemnego punktu pomiarowego z wykorzystaniem radiolinii o częstotliwości 433MHz.

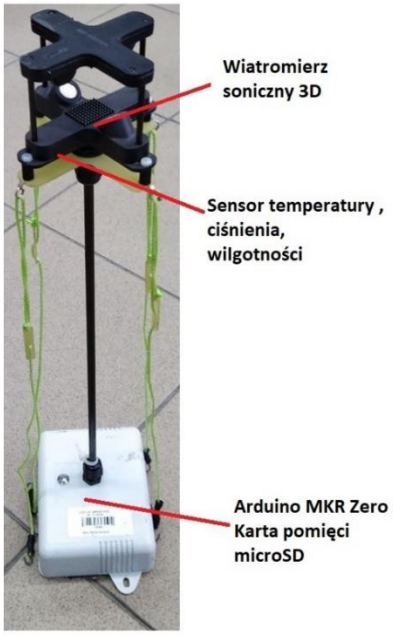


Rycina 4. *Bezzałogowy statek powietrzny wyposażony w czujniki parametrów meteorologicznych i jakości powietrza (a), system pomiarowy AirDust (b) do pomiaru temperatury powietrza, wilgotności względnej, ciśnienia atmosferycznego, stężenia PM_{10} wyposażony w odbiornik GPS i system zapisu danych (Rycina 1 w* ***publikacji A3****).*

System pomiarowy AirDust zasilany jest z baterii drona, w tym celu została wykorzystana przetwornica obniżająca napięcie wejściowe z 22V do 5V o natężeniu pracy 2A. Temperaturę powietrza, wilgotność względną powietrza i ciśnienie atmosferyczne mierzono za pomocą cyfrowego czujnika wilgotności, ciśnienia i temperatury (BME280, Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen, Niemcy). Dodatkowo układ pomiarowy został wyposażony w termoparę typu T do monitorowania nagłych i znaczących zmian temperatury powietrza. Do pomiarów stężenia PM_{10} wykorzystano nisko kosztowy czujnik PMS7003 (Plantower, Pekin, Chiny) oparty na metodzie rozpraszania światła diody. Aby zmniejszyć wpływ kondensacji pary wodnej przy dużej wilgotności i niskiej temperaturze powietrza na pomiar cząstek stałych, wlot powietrza czujnika został podgrzany do temperatury 60°C. W celu redukcji zaburzenia przepływu powietrza, na końcówce rurki doprowadzającej powietrze zamontowano nasadkę zapewniając laminarny przepływ powietrza podczas wznoszenia drona. Uzupełnienie systemu pomiarowego stanowi moduł NEO-7 GNSS (u-blox AG, Thalwil, Szwajcaria) umożliwiający monitorowanie pozycji czujników. Dodatkowo system wyposażony jest w elektrochemiczny czujnik metanu (CH_4) do pomiaru wysokich stężeń gazu ziemnego; pomiary z tego czujnika nie zostały wykorzystane w prezentowanych badaniach. Zestawienie komponentów i ich parametry techniczne podane przez producenta zaprezentowane są w Tabeli 1 w **publikacji A3**. Układ pomiarowy mieści się

w pudełku o wymiarach 11 x 9 x 5 cm o masie 235 g, przymocowanym do platformy drona (Rycina 4 b).

Drugim elementem powietrznego systemu pomiarowego jest wiatromierz soniczny TriSonica™ Mini Wind and Weather Sensor (Anemoment LLC, Longmont CA, USA) zakupiony w roku 2019. Układ pomiarowy wyposażony jest w moduł zapisu danych oparty o mikrokontroler Arduino MKR Zero oraz moduł NEO-7 GNSS (u-blox AG, Thalwil, Szwajcaria) umożliwiający monitorowanie położenia czujników. Czujnik wiatru to miniaturowy anemometr ultradźwiękowy 3D o masie 50 g, wyposażony w czujniki temperatury powietrza, ciśnienia atmosferycznego i wilgotności względnej powietrza (umieszczone w dolnej części czujnika Trisonica), magnetometr i akcelerometr 3D (Rycina 5).



***Rycina 5**. System pomiarowy oparty na czujniku TriSonica™ (Rycina 2 w **publikacji A3**).*

Anemometr dokonuje pomiaru prędkości wiatru dla zakresu pomiarowego 0–50 $m \cdot s^{-1}$ i kierunku wiatru w zakresie 0–360° wraz z aktualną pozycją czujnika z częstotliwością 10Hz. W celu uniknięcia zakłóceń pomiaru spowodowanych turbulencjami generowanymi przez śmigła drona, czujnik wiatru został zamontowany nad poziomem śmigieł na rurce o długości 30 cm (Rycina 3 a). W celu sprawdzenia poprawności wskazań wiatromierza zostały wykonane testy terenowe polegające na zawiśnięciu drona na określonej wysokości i obrocie drona wokół własnej osi. Testy wykonano z wykorzystaniem magnetometru pokładowego. Wyniki pokazały, że zakłócenia pola magnetycznego generowane przez prądy zasilające silniki drona uniemożliwiają wykorzystanie magnetometru do korekty kierunku wiatru. Wiarygodny pomiar kierunku wiatru można uzyskać jedynie poprzez unikanie obrotu drona podczas wykonywania lotu. Zestawienie komponentów wraz z ich parametrami technicznymi zaprezentowane są w Tabeli 2 w **publikacji A3**. Badania czujników temperatury i wilgotności powietrza oraz ciśnienia atmosferycznego w anemometrze Trisonica wykazały, że ich bezwładność jest większa niż czujników stosowanych w systemie AirDust (nie przedstawiono w pracy). Czujniki znajdują się wewnątrz osłony anemometru, co powoduje ich słabą wentylację i dłuższy czas odpowiedzi. Z tego powodu w analizie wykorzystano jedynie pomiary składowych wektora wiatru i temperatury sonicznej wyznaczanej na podstawie prędkości dźwięku i wilgotności względnej powietrza.

W okresie od XII 2017 do XI 2018 w Krakowie zostało wykonanych ponad 60 pomiarów testowych parametrów atmosferycznych profilu pionowego.

W **publikacji A3** zaprezentowano pomiary wykonane dla 3 dni pomiarowych:

- 18.09.2018, czas trwania lotów od 15:00 do 21:00 UTC

- 21.09.2018, czas trwania lotów od 4:00 do 9:30 UTC
- 07.03.2019, czas trwania lotów od 6:00 do 14:30 UTC

Każda kampania pomiarowa składała się z kilku lotów pionowych wykonywanych w tym samym miejscu mniej więcej co godzinę. Czas trwania każdego lotu wynosił od 5 do 15 minut w zależności od maksymalnej wysokości i prędkości wznoszenia, której wartość wahała się od 1 $m \cdot s^{-1}$ do 2 $m \cdot s^{-1}$. Maksymalną prędkość wznoszenia drona (2 $m \cdot s^{-1}$) określono na podstawie założonej wysokości lotu i czasu pracy baterii.

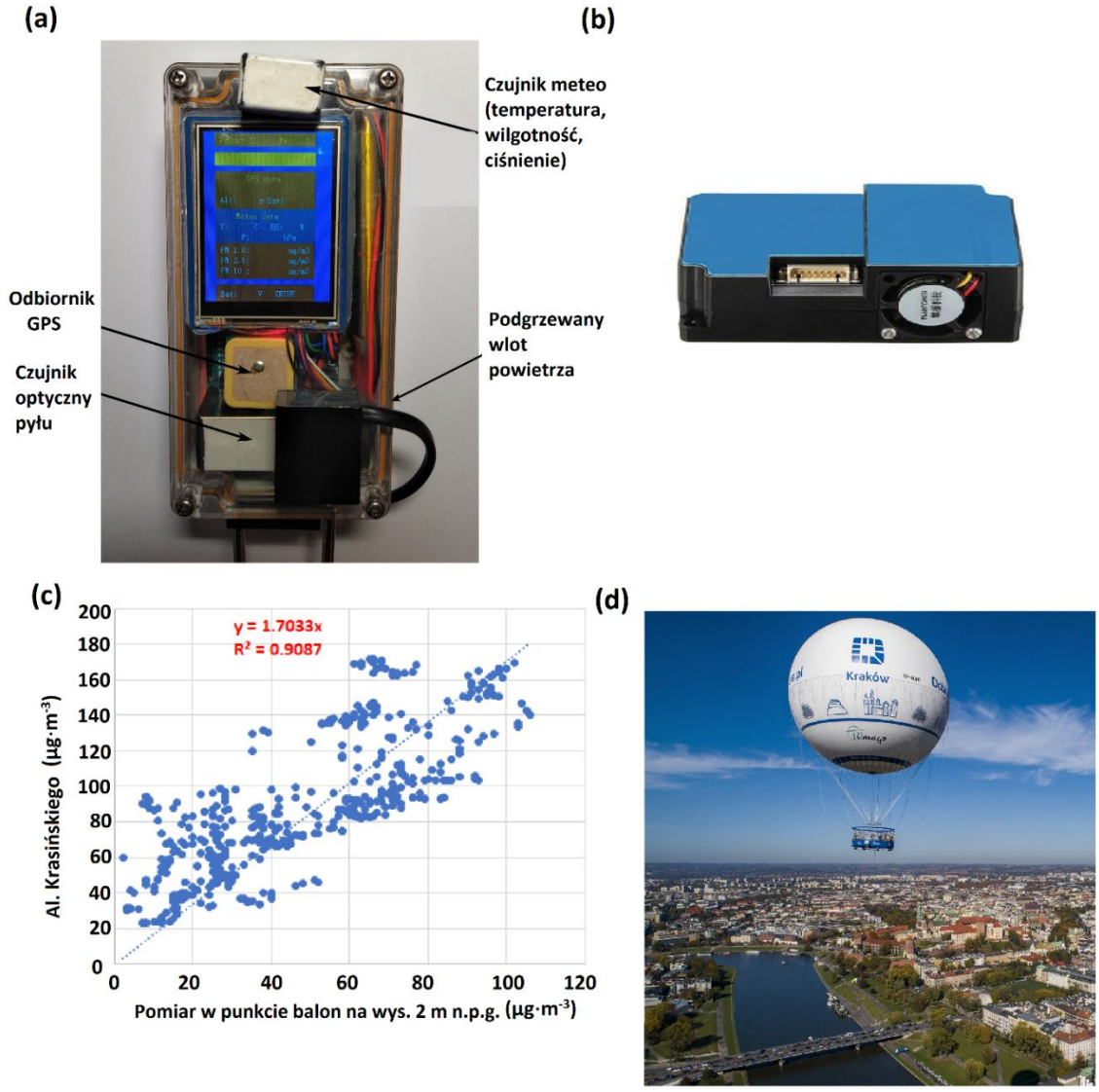
Pomiary profili pionowych atmosfery zostały wykonane na Kampusie UJ (współrzędne geograficzne: 19.898°E 50.026°N). Punkt lotów znajdował się w zachodniej części miasta, teren porośnięty był trawą, a różnice wysokości otoczenia dochodziły do 15 m (średnia wysokość wyniosła 209 m n.p.m.). Loty wykonywano do wysokości 500 m n.p.g., maksymalna wysokość lotu była określona na postawie ograniczeń statku powietrznego oraz przepisów ruchu lotniczego. Lokalizację pomiarów pionowych wybrano w oparciu o wymogi bezpieczeństwa (odległość od zabudowań i skupisk ludzkich), dodatkowo lokalizacja ta znajduje się w niedalekiej odległości od centrum miasta i jest reprezentatywna dla dominującego kierunku napływu mas powietrza (cyrkulacja zachodnia).

Pomiary z wykorzystaniem balonu na uwięzi

Wykorzystanie balonów na uwięzi jest jedną z bardziej rozpowszechnionych metod do profilowania pionowego atmosfery. Pomiary pionowe z wykorzystaniem tej metody mogą stanowić cenne źródło danych o zmienności sezonowej (Renard i in., 2020) bądź dobowej (Han i in., 2018; Samad i in., 2020) składu pionowego atmosfery oraz jego stratyfikacji pionowej. Metoda ta posiada jednak pewne ograniczenia: punktowość wykonywania pomiaru reprezentatywnego dla określonego regionu, ograniczona wysokość lotu, maksymalny udźwig a także ograniczone warunki meteorologiczne wykonywania lotu (np. silne porywy wiatru, przejście frontu atmosferycznego lub wystąpienie silnych zjawisk konwekcyjnych uniemożliwiają wykonanie lotu).

Pomiary pionowe parametrów meteorologicznych i stężenia PM_{10} zostały wykonane we współpracy z firmą Balon Widokowy Sp. z o. o. (http://balonwidokowy.pl/). Pierwsze pomiary stężenia PM_{10} w profilu pionowym zostały wykonane w dniu 28.11.2019. Kampania pomiarowa w sezonie chłodnym 2019-2020 prowadzona była w okresie od 28.11.2019 aż do 9.03.2020. Ze względu na wprowadzenie narodowej kwarantanny 15.03.2020, pomiary pionowe atmosfery zostały wstrzymane aż do maja 2020. Wyniki badań zebrane w okresie od 28.11. 2019 do 3.03.2020 zostały zaprezentowane w **publikacji A4**. Kampania pomiarowa obejmuje 31 dni podczas którego wykonano 317 lotów (634 profile pionowe). Pomiary stężenia PM_{10} w profilu pionowym wykonywane były do maksymalnej wysokości 300 m n.p.g. Loty balonowe odbywały się w zachodniej części miasta, nad rzeką Wisłą, w pobliżu stacji monitoringu jakości powietrza na Al. Krasińskiego i ul. Dietla (współrzędne geograficzne: 19.935°E 50.046°N). Pomiary stężenia PM_{10} wykonywane były z wykorzystaniem aparatury pomiarowej zbudowanej przez Zespół Fizyki Środowiska AGH o nazwie Personal Dust Monitor (PoDust v1.1). Czujnik PoDust oparty jest na nisko kosztowym czujniku optycznym pyłu Plantower PMS1003 i platformie Arduino (Rycina 5). Układ pomiarowy zamocowany został na zewnątrz kosza balonu. Mikrokontroler Arduino Mega 2560, odpowiedzialny jest za komunikację z czujnikami, zapis danych z rozdzielczością 1-sekundową na karcie pamięci oraz przesyłanie informacji w czasie rzeczywistym do bazy danych z wykorzystaniem połączenia WiFi. W celu uniknięcia negatywnego wpływu pary wodnej na pomiar PM_{10} w warunkach wysokiej wilgotności, wlot czujnika został podgrzany do 60°C. Dodatkowo system został wyposażony w odbiornik GPS oraz czujnik temperatury, wilgotności i barometr w celu zapewnienia informacji o aktualnej lokalizacji i warunkach środowiskowych. Charakterystyka lotów pionowych wykonanych w ramach kampanii została zaprezentowana na Rycinie A1 w **publikacji A4**. Na Rycinie 6 przedstawiono porównanie pomiarów stężenia PM_{10} z sensora AirDust przypiętego do balonu na wysokości 2 m n.p.g. z pomiarami z pobliskiej stacji na Al. Krasińskiego. Ponieważ pomiary ze stacji Krasińskiego mają rozdzielczość godzinową, zastosowano interpolację liniową dwóch sąsiednich pomiarów, aby uzyskać spójną rozdzielczość

czasową z pomiarami z lokalizacji balonu. Testy czujnika pyłu Plantower wykazały prawidłowy pomiar dla stężenia bliskiego 0 $\mu g \cdot m^{-3}$, dlatego punkt przecięcia prostej regresji z osią odciętych został przyjęty jako równy 0.



Rycina 6. *System pomiaru pyłu zawieszonego zaprojektowany i skonstruowany przez Zespół Fizyki Środowiska AGH (a), nisko kosztowy czujnik PM Plantower PMS1003 (b), korelacja pomiarów z pomiaru w lokalizacji balonu i najbliższej stacji zanieczyszczenia powietrza (Al. Krasińskiego) z dopasowaną prostą regresji i współczynnikiem R-kwadrat (c) oraz (d) balon widokowy (Rycina 3 w* ***publikacji A4****).*

4.3. Numeryczne modele prognoz pogody

W celu uzupełnienia informacji o aktualnym stanie atmosfery pochodzących zarówno ze stacji naziemnych jak i również z pomiarów w profilu pionowym atmosfery, został wykorzystany system numerycznych prognoz pogody Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International (ALADIN) High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) rozwijany przez międzynarodowe konsorcjum ACCORD (ang. *A Consortium for Convection-scale modeling Reseach and Development*). Konsorcjum ACCORD powstało w wyniku połączenia konsorcjum ALADIN, RC-LACE oraz HIRLAM w roku 2021, w jego skład wchodzi 26 krajów Europy i północnej Afryki. System ALADIN-HIRLAM NWP oparty jest na kodzie, który współdzielony jest z modelem globalnym Integrated Forecast System (IFS) rozwijanym

przez konsorcjum ECMWF oraz modelem globalnym Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle (ARPEGE) wykorzystywanym w operacyjnym prognozowaniu pogody przez francuską służbę meteorologiczną Météo-France. Wyselekcjonowane konfiguracje tego systemu nazywane kanonicznymi konfiguracjami modelu ALADIN (ang. *Canonical Model Configuration*, CMC), są szczegółowo sprawdzane i przygotowane do wykorzystania w operacyjnym prognozowaniu pogody dla partnerskich służb (hydro)meteorologicznych. Obecnie rozwijane są trzy kanoniczne konfiguracje modeli: ALADIN CMC, Application of Research to Operations at Mesoscale (AROME) CMC oraz ALADIN – AROME (ALARO) CMC. Konsorcjum HIRLAM rozwija własną konfigurację modelu AROME, nazwaną HIRLAM ALADIN Regional/Mesoscale Operational NWP in Europe AROME (HARMONIE – AROME), która jest wykorzystywana do operacyjnych krótkoterminowych prognoz pogody w 10 krajach Europy. W ramach badań zaprezentowanych w pracy zostały wykorzystane trzy kanoniczne konfiguracje modeli numerycznych. Wyniki badań z ich wykorzystaniem zamieszczono w **publikacjach A1**, **A2** i **A4**. Ze względu na ciągły rozwój modeli numerycznych prognoz pogody w ramach badań zostały wykorzystane dwie wersje modelu o numerze cy40t1 i cy43t2, które zostały szczegółowo sprawdzone celem wykorzystania w operacyjnej osłonie kraju (Szczęch-Gajewska i in., 2017; Bochenek i in., 2020). Ponadto należy również wspomnieć, że w trakcie realizacji pracy doktorskiej zmianie uległa operacyjna wersja modelu globalnego ARPEGE oraz rozdzielczość danych brzegowych i początkowych. W badaniach zaprezentowanych w artykułach wykorzystano wyniki prognoz operacyjnych modeli prognoz pogody oraz dedykowanych konfiguracji o mniejszej rozdzielczości przestrzennej i większej liczbie poziomów pionowych. Domeny przestrzenne modeli charakteryzowały się wymiarami komórki elementarnej równej 1 x 1 km, 2 x 2 km i 4 x 4 km i liczbie poziomów wertykalnych mieszczących się w zakresie od 60 do 105. W przypadku domeny o rozmiarach komórki elementarnej równej 1 x 1 km, długość prognozy i maksymalna liczba poziomów pionowych ograniczona była zasobami obliczeniowymi dostępnymi na klastrze obliczeniowym EUROS będącym własnością IMGW-PIB.

Dwa modele numeryczne systemu ALADIN-HIRLAM: ALARO i AROME wykorzystywane są w osłonie operacyjnej. Wszystkie trzy modele wykorzystane w badaniach (ALARO, AROME i AROME-HARMONIE) wykorzystują ten sam dynamiczny rdzeń (Benard i in., 2010); pewne różnice między tymi modelami dotyczą reprezentacji powierzchni, turbulencji, konwekcji, mikrofizyki i promieniowania. Szczegółowe informacje dotyczące schematów fizycznych wykorzystanych w modelach zawarte są w Tabeli 3 w **publikacji A1**.

4.4. Reanalizy atmosferyczne

W celu przeanalizowania stratyfikacji dolnej troposfery w okresie od października 2000 do września 2020 r., dla różnych typów cyrkulacji atmosferycznej, zostały wykorzystane reanalizy atmosferyczne ERA5 (Hersbach i in., 2020). Reanaliza atmosferyczna to przestrzenny zbiór danych otrzymany na podstawie analizy wszystkich dostępnych danych modelowych i obserwacyjnych celem opracowania spójnych szeregów czasowych. Dane ERA5 charakteryzują się wysoką rozdzielczością przestrzenną i czasową (rozdzielczość przestrzenna 0.25° i krok czasowy 1 godzina), dostępne są zarówno dla określonych poziomów ciśnieniowych, wysokościowych, jak i dla powierzchni gruntu. Reanalizy atmosferyczne zostały wykorzystane w **publikacji A5** w celu określenia zmienności w profilu pionowym temperatury, wilgotności względnej i wiatru dla punktu reprezentującego obszar Krakowa (współrzędne geograficzne 50°N 20°E) dla różnych sytuacji synoptycznych. Dane wykorzystane w badaniach pochodzą z trzech poziomów izobarycznych 975, 925 i 850 hPa, dla godzin 00:00, 6:00, 12:00 i 18:00 UTC. W analizie nie wykorzystano najniższego dostępnego poziomu izobarycznego 1000 hPa ze względu na fakt, że w niektórych przypadkach poziom ten był wyliczany jako znajdujący się poniżej powierzchni Ziemi. Wykorzystując powyższe dane został wyznaczony gradient pionowy temperatury powietrza, wilgotności względnej oraz kierunku i prędkości wiatru pomiędzy sąsiednimi poziomami izobarycznymi (975 i 925 hPa oraz 925 i 850 hPa).

4.5. Typy cyrkulacji atmosfery

W celu oceny ilościowej wpływu cyrkulacji atmosferycznej na poziom zanieczyszczenia na terenie Krakowa dla okresu wielolecia od października 2000 r. do września 2020 r. posłużono się dwiema metodami klasyfikacji cyrkulacji atmosferycznej (**publikacja A5**): klasyfikacją manualną autorstwa Niedźwiedzia (Niedźwiedź i Ustrnul, 2021) oraz klasyfikacją automatyczną autorstwa J. Lityńskiego (Lityński, 1969; Ustrnul i in., 2013). Dwie różne klasyfikacje zostały wykorzystane w celu zminimalizowania ryzyka błędnej interpretacji wyników, co zostało zasugerowane we wcześniejszych pracach naukowych (Huth i in., 2008; Philipp i in., 2010). Obie metody klasyfikacji były szeroko stosowane przez różne grupy naukowe w badaniach typów cyrkulacji atmosfery nad Europą Środkową (Beck i Philipp, 2010; Leśniok i in., 2010; Nowosad, 2017). Należy tutaj wspomnieć, że wyselekcjonowane typy cyrkulacji reprezentują dwie różne grupy klasyfikacji cyrkulacji atmosferycznej.

Klasyfikacja cyrkulacji Niedźwiedzia reprezentuje manualną klasyfikację subiektywną, która jest powszechnie stosowana w badaniach klimatycznych regionu południowej Polski (Niedźwiedź i Ustrnul, 2021). Oparta jest na typologii cyrkulacji atmosferycznej opracowanej przez Lamba (1972) dla Wysp Brytyjskich, z pewnymi modyfikacjami, dotyczącymi głównie sytuacji bezadwekcyjnych. Klasyfikacja Niedźwiedzia składa się z 21 typów, 16 typów kierunkowych (typ cyklonalny i antycyklonalny) oraz czterech typów bezadwekcyjnych (typ cyklonalny i antycyklonalny). Ze względu na fakt, że analizowany okres jest stosunkowo krótki w ujęciu klimatologicznym (okres od roku 2000 do roku 2020), w badaniach zastosowano skróconą klasyfikację składającą się z 11 typów. Miało to na celu zwiększenia liczebności próbek i uzyskanie bardziej wiarygodnych wyników analizy statystycznej.

Drugą metodą wykorzystaną w badaniach jest obiektywna klasyfikacja według oryginalnej koncepcji Lityńskiego (Lityński, 1969). Należy wspomnieć, że klasyfikacja ta została wielokrotnie zastosowana w badaniach dla obszaru Polski i Europy Środkowej (Lityński, 1969; Ustrnul i in., 2010). Obecnie typy cyrkulacji atmosferycznej Lityńskiego definiuje się z wykorzystaniem trzech wskaźników: strefowego Ws, południkowego Wp oraz wskaźnika ciśnienia w Polsce Cp oraz z wykorzystaniem reanaliz NCEP/NCAR na obszarze 40–65°N i 0–35°E. Lityński wyróżnił 27 typów cyrkulacji, trzy typy bezadwekcyjne (symbol Oo, Oc, Oa) oraz osiem typów kierunkowych (z trzema typami: cyklonalną, antycyklonalną i pośrednią, określaną jako typ bliski zera). Warto zauważyć, że system klasyfikacji Lityńskiego, jako jedna z metod skalowalnych, jest częścią katalogu klasyfikacji COST 733 (Philipp i in., 2010). Klasyfikacja Lityńskiego zastosowana w niniejszych badaniach zawierała modyfikacje wprowadzone przez Krystynę Pianko-Kluczyńską (Pianko-Kluczynska, 2007). Najnowsze badania potwierdzają wysoki poziom zbieżności w przebiegu wskaźników cyrkulacyjnych według klasyfikacji Niedźwiedzia i Lityńskiego (Niedźwiedź i Ustrnul, 2021).

5. Metody pozyskania i opracowania danych

5.1. Kryterium wystąpienia wiatru fenowego

Wyznaczenie epizodów trwania wiatru fenowego w Karpatach, lokalnie nazywanego wiatrem halnym zostało wykonane na podstawie kryteriów zamieszczonych w artykule Ustrnula (1992b). Okresy potencjalnego trwania wiatru fenowego były wykonane na podstawie analizy danych pomiarowych z górskiej stacji meteorologicznej zarządzanej przez IMGW-PIB i położonej na Kasprowym Wierchu (1991 m n.p.m.); potencjalne wystąpienie wiatru fenowego określone było jak przedział czasowy trwający przynajmniej 6 godzin, gdzie prędkość wiatru wynosiła co najmniej 10 $m \cdot s^{-1}$ oraz kierunek wiatru mieścił się w zakresie 140-220˚.

W kolejnym etapie dokonano weryfikacji wystąpienia wiatru fenowego na terenie Krakowa i okolic. Epizody wiatru fenowego uwzględnione w niniejszej pracy to klasyczne przypadki fenu według znanej teorii Hanna (Hann, 1901). Należy jednak zwrócić uwagę, że wiatry fenowe są złożonymi zjawiskami atmosferycznymi pod względem ich genezy i występowania (np. Gohm i Mayr, 2004; Drobinski i in., 2007; Cetti i in., 2015). W szczególności złożoność ta dotyczy oceny występowania wiatru fenowego na

poziomie stacji, na której niekiedy trudno zarejestrować określone cechy tego wiatru które są ewidentne i które można stwierdzić w najbliższym otoczeniu. Jak wiadomo, obszar badań wykorzystany w niniejszej pracy charakteryzuje się urozmaiconego ukształtowaniem powietrzni oraz użytkowaniem terenu co powoduje bardzo duże zróżnicowanie warunków klimatycznych w skali lokalnej i tym samym konieczność dokładnej detekcji tego zjawiska.

Dla okresów potencjalnego występowania wiatru fenowego w Krakowie potwierdzono jego faktyczne wystąpienie, jeśli był spełniony co najmniej jeden z poniższych zestawów kryteriów (na podstawie obserwacji ze stacji Balice i/lub Libertów i/lub Igołomi):

- kierunek wiatru: 90-270˚, prędkość wiatru: ≥5 $m \cdot s^{-1}$, wystąpienie chmur Altocumulus lenticularis;
- kierunek wiatru: 90-270˚, prędkość wiatru: ≥5 $m \cdot s^{-1}$, wilgotność względna ≤70%;
- wilgotność względna ≤70% i wystąpienie chmur Altocumulus lenticularis.

Obserwacje chmur Altocumulus lenticularis (Ac len) pozyskane były ze stacji klimatologicznej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Ogrodzie Botanicznym UJ w Krakowie.

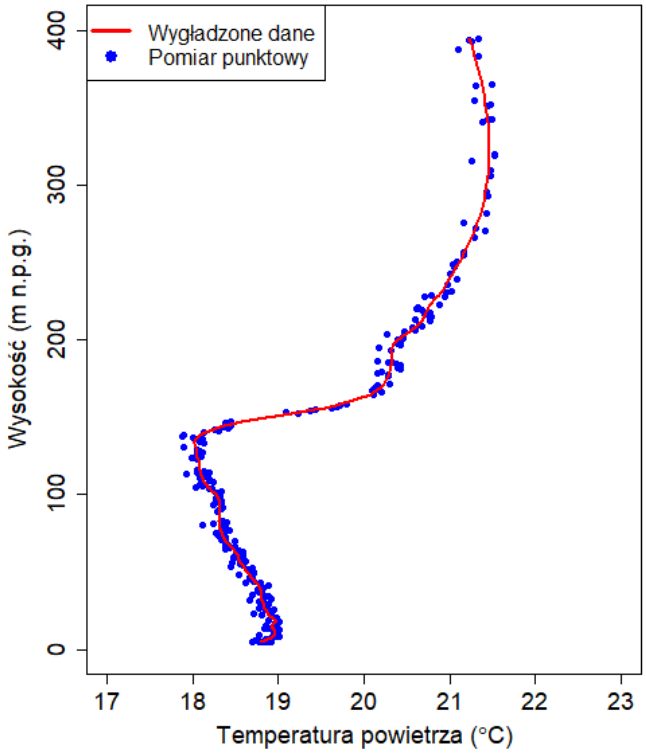
Kryteria przedstawione powyżej zostały wyznaczone dla obszaru Polski południowej na podstawie analiz map synoptycznych i danych pomiarowych z lat 1966–1985 przez Ustrnula (1992a, 1992b). Takie podejście pozwoliło na wyselekcjonowanie okresów, w których wiatr fenowy występował na całym obszarze od Tatr aż po Kraków. Należy jednak wspomnieć, że bardzo prawdopodobnym jest, że wystąpienie fenu mogło nie być widoczne we wszystkich punktach pomiarowych na analizowanym obszarze, m.in. w dnach dolin, gdzie częstym obserwowanym zjawiskiem są inwersje temperatury powietrza, które zapobiegają wnikaniu fenu do dolin. Czas trwania wiatru fenowego na terenie Krakowa zdefiniowano jako liczbę kolejnych godzin, w których spełnione zostały powyższe kryteria. Kryterium wystąpienia wiatru fenowego zostało wykorzystane w badaniach przedstawionych w **publikacjach A2**, **A3** i **A4**.

5.2. Opracowanie danych systemu AirDust

System pomiarowy AirDust (opisany w podrozdziale 4.2) zbudowany w celu wykonywania pomiarów parametrów meteorologicznych i jakości powietrza w profilu pionowym został skalibrowany z wykorzystaniem stacji meteorologicznej na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, położonej na dachu wydziału. Pomiary referencyjne temperatury, wilgotności powietrza, ciśnienia atmosferycznego oraz składowych wiatru na poziomie 20 m n.p.g. zostały wykonane z wykorzystaniem platformy VAISALA WXT520. Dodatkowo w tym samym punkcie przeprowadzono pomiary frakcji cząstek stałych (PM_{10}) za pomocą optycznego monitora aerozoli TSI 8530 skalibrowanego metodą grawimetryczną. Przykładowe wyniki kalibracji sensorów dla trzydniowego okresu zamieszczone są na Rycinie 3 w **publikacji A3**. Dodatkowo na powyższej rycinie zostały zamieszczone równania kalibracyjne prostej regresji oraz współczynników korelacji R^2. Równania kalibracyjne zostały wykorzystane do korekty błędu systematycznego czujników.

Kolejnym krokiem obróbki danych pomiarowych było usunięcie szumów aparaturowych, w poniższych badaniach została zastosowana lokalna metoda dopasowania regresji wielomianowej. Metoda regresji LOESS (ang. *Locally Estimated Scatterplot Smoothing*, LOESS) jest jedną z najczęstszych reprezentacji powyższej procedury, która łączy modele regresji wielokrotnej w meta–modelu k–najbliższego sąsiada (ang. *Local regression*). Metoda wykorzystana w badaniach jest zaimplementowana w środowisku R pod nazwą funkcji LOESS (John i Sanford, 2018).

Rycina 7 prezentuje punktowe pomiary temperatury powietrza w profilu pionowym oraz dopasowaną krzywą z wykorzystaniem metody regresji LOESS. Stopień wygładzenia przyjęto równy 0,1 co oznacza, że do obliczeń dla każdego punktu wykorzystano 10% całego zakresu danych. Użycie wyższego stopnia wygładzania spowodowałoby zbyt silne wygładzenie danych, co przyczyniłoby się do utraty dużej części informacji o stratyfikacji pionowej atmosfery. Stopień wielomianu wykorzystany w obliczeniach był zgodny z wartością domyślną równą 2. Metoda wygładzania została zastosowana w celu usunięcia szumu z profili pionowych temperatury powietrza, wilgotności powietrza, ciśnienia powietrza, prędkości wiatru i stężenia PM_{10}.



Rycina 7. *Profil pionowy temperatury powietrza z wykorzystaniem metody wygładzania danych opartej na lokalnej regresji liniowej LOESS; godzina startu lotu 3:23 UTC (3.08.2018) (Rycina 4 w* ***publikacji A3****).*

Kalibracja sensorów opisana powyżej wykonana została dla wolno zmieniających się parametrów meteorologicznych (przebieg dobowy), z tego względu wpływ bezwładności badanego czujnika był niewidoczny w czasie kalibracji. Podczas wieczornych lub porannych pomiarów, w profilu pionowym atmosfery od powierzchni gruntu do wysokości kilkuset metrów mogą wystąpić znaczące i nagłe zmiany parametrów meteorologicznych i jakości powietrza. Z tego względu pomiary elementów meteorologicznych (Joachim i in., 2009) oraz koncentracji gazów (Kunz i in., 2018) w atmosferze są narażone na różne źródła błędów związane z pracą czujników. Jednym z najczęstszych błędów jest błąd związany z opóźnioną reakcją sensora na zmianę warunków otoczenia, występującą m.in. w sondażach pionowych (Miloshevich i in., 2004) czy pomiarach mobilnych (Achberger i Barring, 1999). Błąd pomiaru spowodowany jest faktem, że czujnik potrzebuje określoną ilość czasu w celu osiągnięcia równowagi z otoczeniem. W celu wykonania korekty tego błędu dla czujnika temperatury i wilgotności względnej powietrza opracowano procedurę opartą na równaniu 1 (Jonassen, 2008):

$$\frac{dU_m}{dt} = \frac{1}{k} \cdot (U_a - U_m), \tag{1}$$

Zmienne U_a i U_m to odpowiednio wartości parametrów otoczenia i wartości zmierzonych; współczynnik k jest stałą czasową czujnika zależną od warunków atmosferycznych. Dotychczasowe badania wskazały, że stała czasowa czujnika jest różna w zależności od warunków otoczenia. W przypadku czujnika temperatury stwierdzono, że stała czasowa zależy przede wszystkim od ciśnienia atmosferycznego (gęstości powietrza) i wentylacji czujnika. W przypadku czujników wilgotności względnej stała czasowa czujnika jest dodatkowo funkcją temperatury bezwzględnej i zawartości pary wodnej. Spadek temperatury i ciśnienia atmosferycznego prowadzi do wydłużenia czasu odpowiedzi czujnika, podobnie jak brak wentylacji i niska zawartość pary wodnej (Jonassen, 2008). Należy również

zwrócić uwagę, że błąd opóźnienia czasowego sensora w profilowaniu pionowym atmosfery zależy od prędkości pionowej statku powietrznego. Rozwiązanie równania 1 dla zmiennej U_a zapewnia prosty sposób obliczenia rzeczywistego parametru otoczenia na podstawie pomiarów sensora (Kunz i in., 2018). Oryginalne zbiory danych wykorzystane do wyznaczenia pochodnych w pierwszej kolejności zostały wygładzone w celu usunięcia szumów aparaturowych. Dotychczasowe badania tego zagadnienia potwierdzają potrzebę wygładzenia danych przed korektą (Achberger i Barring, 1999; Miloshevich i in., 2004; Jonassen, 2008). Do obliczenia pochodnej $\frac{dU_m}{dt}$ został wykorzystany filtr 4-go rzędu Savitzky-Golay (Savitzky i Golay, 1964) o długości próbki równej 11 punktów pomiarowych, co pozawalało na możliwie niewielką utratę szczegółowych informacji o strukturze pionowej atmosfery. Wyznaczona pochodna $\frac{dU_m}{dt}$ następnie została wygładzona, w celu usunięcia nagłych, nie fizycznych zmian parametrów w profilu pionowym.

5.3. Klasyfikacja profili pionowych zanieczyszczenia PM_{10}

Pomiary pionowe stężenia PM_{10} wykonane we współpracy z firmą „Balon Widokowy sp. z o. o." w okresie od 28.11.2019 aż do 9.03.2020 zostały szczegółowo przeanalizowane i sklasyfikowane na podstawie charakterystycznych cech (**publikacja A4**). W celu wykonania analizy danych została opracowana metoda pozwalająca na podział profili pionowych stężenia zanieczyszczenia PM_{10} na trzy charakterystyczne grupy opisane poniżej:

- Grupa I: profil ze stałym poziomem stężenia PM_{10} (niewielkie fluktuacje);
- Grupa II: profil ze znaczącym liniowym spadkiem stężenia od poziomu gruntu do określonej wysokości;
- Grupa III: profil pionowy charakteryzujący się stałym poziomem stężenia PM_{10} do określonej wysokości, następnie nagłym jego spadkiem i utrzymywaniem się niskich wartości powyżej; profil o kształcie zbliżonym do krzywej sigmoidalnej.

Profile pionowe stężenia PM_{10} zostały sklasyfikowane przy użyciu subiektywnej metody dopasowania krzywej sigmoidalnej. W tym celu wykorzystano krzywą logistyczną, którą opisuje równanie:

$$Y = c + \frac{d - c}{1 + \exp(b(X - e))} \tag{2}$$

gdzie: b – nachylenie wokół punktu przegięcia; c - dolna asymptota; d - górna asymptota; e - wartość X dająca odpowiedź w połowie drogi między d i c.

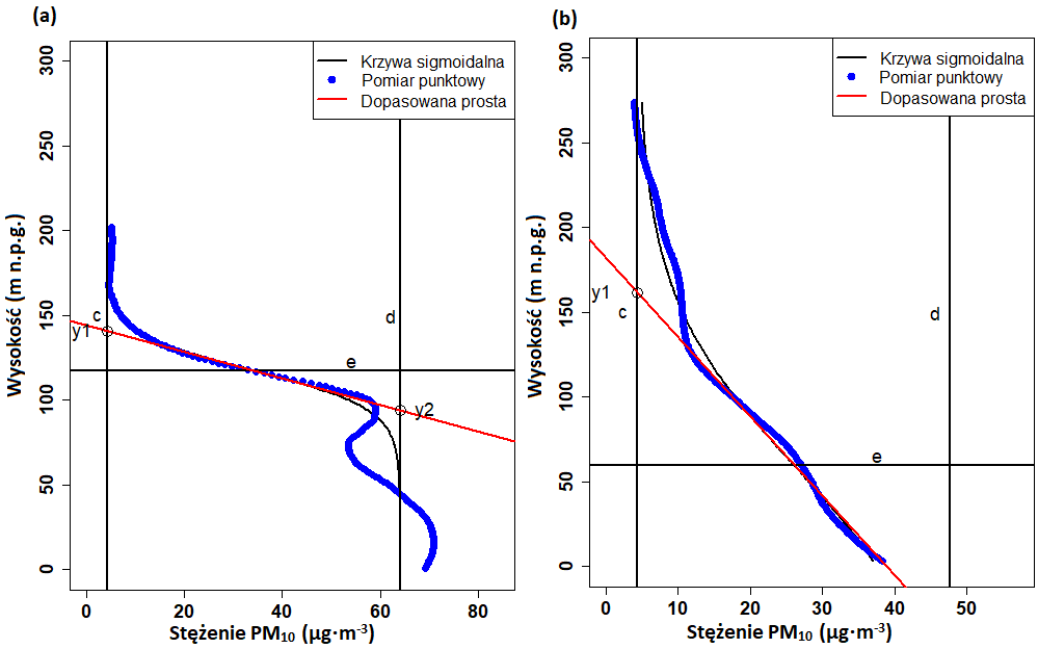
Dodatkowo, aby lepiej przeanalizować dopasowaną krzywą sigmoidalną, w pobliżu punktu przegięcia dopasowano prostą liniową w celu wyznaczenia punktu przecięcia z asymptotami c i d (zmienne y_1 i y_2 na Rycinie 7). Różnice między y_1 i y_2 reprezentowały grubość warstwy przejściowej.

W celu dokonania podziału profili pionowych na trzy grupy określono warunki brzegowe:

- Grupa I: stężenie PM_{10} w warstwie przygruntowej (poniżej 10 m n.p.g) było mniejsze niż 30 $\mu g \cdot m^{-3}$ (275 profili pionowych) lub różnica między stężeniem PM_{10} blisko gruntu i w warstwie górnej (tj. blisko maksymalnego położenia) była mniejsza niż 25 $\mu g \cdot m^{-3}$ (208 profili pionowych);
- Grupa II: różnica między stężeniem PM_{10} w warstwie przygruntowej i górnej była większa niż 25 $\mu g \cdot m^{-3}$, a zmienna y_2 mieściła się w zakresie od -200 do 30 m n.p.g. (określona eksperymentalnie dla tego zbioru danych) (17 profili pionowych);
- Grupa III: różnica między stężeniem PM_{10} w warstwie przygruntowej i górnej była większa niż 25 $\mu g \cdot m^{-3}$, a zmienna y_2 większa niż 30 m n.p.g. (134 profile pionowe).

Na Rycinie 7 przedstawiono przykładowe profile pionowe zaklasyfikowane do grupy II i III wraz z dopasowanymi krzywymi sigmoidalnymi i zmiennymi b, c, d, e, y_1 i y_2. Należy tutaj wspomnieć, że dopasowanie krzywej sigmoidalnej do profili pionowych stężenia PM_{10} było przydatne ze względu

na możliwość oszacowania stężenia PM_{10} w warstwie górnej (przy założeniu, że profil pionowy PM_{10} miał kształt zgodny z dopasowaną funkcją) oraz określenia położenia warstwy przejściowej.



Rycina 8. *Profile pionowe stężenia PM_{10} z dopasowaną krzywą sigmoidalną dla profilu w kształcie litery „S" – grupa III (a) oraz profile stężenia charakteryzujące się znaczącym liniowym spadkiem stężenia począwszy od poziomu gruntu – grupa II (b). Na wykresach zaznaczone są parametry b, c, d, e użyte w równaniu (1) oraz punkty przecięcia z asymptotami c i d (zmienne y_1 i y_2) (Rycina 4 w* ***publikacji A4****).*

5.4. Metody uczenia maszynowego

W ostatnim czasie znacząco wzrosło zainteresowanie zastosowaniem technik uczenia maszynowego w analizie statystycznej (Grange i in., 2018; Vu i in., 2019) a także w prognozowaniu jakości powietrza w szerokiej skali czasowej i przestrzennej (Gariazzo i in., 2020; Hu i in., 2017). Do najczęściej używanych narzędzi uczenia maszynowego należą: Artificial Neural Network (Joharestani i in., 2019), Deep Neural Network, Extreme-Gradient Boosting (AlThuwaynee i in., 2021) oraz Random Forests (Gariazzo i in., 2020). Techniki uczenia maszynowego zostały z powodzeniem zastosowane do oceny ekspozycji ludności na złą jakość powietrza w obszarach metropolitalnych (Gariazzo i in., 2020), zwiększenia rozdzielczości przestrzennej prognoz stężenia zanieczyszczenia powietrza w mieście (Stafoggia i in., 2020) a także normalizacji meteorologicznej stosowanej w analizie trendów jakości powietrza (Grange i in., 2018). Random Forests, czyli metoda uczenia maszynowego oparta na konstruowaniu drzew decyzyjnych, jest szeroko stosowana do regresji i klasyfikacji. Jedną z głównych zalet tej metody, oprócz jej dokładności i prostoty w implementacji, jest prosty i intuicyjny sposób dostępu do zmiennych, które kluczowe są przy rozwiązywaniu złożonych i nieliniowych zagadnień.

W celu określenia zależności między poziomem stężeń PM_{10} a warunkami meteorologicznymi w Krakowie został wykorzystany algorytm Random Forests. Badania przeprowadzono dla okresu od października 2000 roku do września 2020 roku. Ponadto wyniki modelu Random Forests zostały porównane z wynikami otrzymanymi za pomocą regresji wielorakiej (**publikacja A5**).

Zbiór danych wykorzystanych w badaniach obejmował:

- obserwacje meteorologiczne ze stacji synoptycznej w Balicach z rozdzielczością 6-godzinną: temperatura powietrza, wilgotność względna powietrza, prędkość i kierunek wiatru, zachmurzenie, 6-godzinna suma opadów atmosferycznych;
- temperatura powietrza, wilgotność względna powietrza oraz prędkość i kierunek wiatru dla trzech poziomów izobarycznych uzyskanych z reanaliz ERA5 (975, 925 i 850 hPa); różnice

temperatury powietrza, wilgotności względnej, prędkości i kierunku wiatru między sąsiednimi poziomami ciśnienia (warstwy 975-925 hPa i 925-850 hPa) z rozdzielczością 6 godzinną;
- średnie dobowe stężenia PM_{10};
- różnica średniego dobowego stężenia PM_{10} pomiędzy dniem bieżącym a poprzednim (w celu prognozowania spadku stężenia PM_{10}) dla stacji na Al. Krasińskiego;
- dzień tygodnia;
- typ cyrkulacji atmosferycznej według klasyfikacji Niedźwiedzia i Lityńskiego.

Selekcję zmiennych wykorzystanych do modeli Random Forests przeprowadzono metodą Boruty dostępną w pakiecie Pomona (Degenhardt i in., 2019). W celu optymalizacji hiperparametrów modelu Radnom Forests zastosowano metodę LGOCV (ang. *Repeated Leave-Group-Out Cross-Validation*). Metoda próbkowania LGOCV była dostępna w funkcji „trainControl" w pakiecie „caret" w środowisku R. Dla modelu regresji wielorakiej zastosowano krokowy algorytm AIC (ang. *Akaike Information Criterion*) (Akaike, 1998), który jest dostępny w funkcji „stepAIC" w pakiecie „MASS" w środowisku R. Bazę danych meteorologicznych ze stacji Balice reanaliz ERA-5 i poziomów stężeń PM_{10} wykorzystano jako dane wejściowe do prognozowania dobowego stężenia PM_{10} i dobowych zmian na losowo wybranej próbce danych stanowiących 75% zestawu danych. Pozostałe 25% zestawu danych wykorzystano do walidacji modeli Random Forests i regresji wielorakiej. W badaniach wykorzystano dwa zestawy danych wejściowych, które różnią się rozdzielczością czasową wymienionych powyżej parametrów meteorologicznych (dane z rozdzielczością 6-godzinną oraz średnie dobowe uzyskane z danych o rozdzielczości 6-godzinnej). Analiza ta miała na celu weryfikację hipotezy czy zwiększenie rozdzielczości czasowej parametrów opisujących warunki pogodowe w ciągu dnia poprawi celność prognozy. Optymalizacja hiperparametrów i selekcja kluczowych zmiennych przeprowadzona została oddzielnie dla każdego modelu Random Forests i modelu regresji wielorakiej. W celu określenia cząstkowej zależności pomiędzy średnimi dobowymi poszczególnych parametrów meteorologicznych a poziomem dobowego stężenia PM_{10} zastosowano zoptymalizowany model Random Forests. Zależności częściowe z wykorzystaniem tego modelu uzyskano za pomocą funkcji „partial_dependence" dostępnej w pakiecie ogólnodostępnym „edarf" w środowisku R.

6. Streszczenie artykułów tworzących rozprawę doktorską

6.1. Publikacja A1

Prediction of Air Temperature in the Polish Western Carpathian Mountains with the ALADIN-HIRLAM Numerical Weather Prediction System

Prognoza temperatury powietrza w Polskich Karpatach Zachodnich z wykorzystaniem numerycznego systemu prognoz pogody ALADIN-HIRLAM

Publikacja A1 stanowi szczegółową weryfikację wyników prognoz temperatury powietrza dla trzech różnych konfiguracji numerycznych modeli prognoz pogody na obszarze Karpat Zachodnich w miesiącach sezonu chłodnego w okresie 2017-2018, podzielonych na trzy krótsze interwały czasowe (problem dostępności danych dla poszczególnych stacji pomiarowych). Celem niniejszej pracy była ocena działania operacyjnego modelu AROME wykorzystywanego przez Polski Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB) dla analizowanego regionu oraz **weryfikacja hipotezy H1, że zwiększenie rozdzielczości przestrzennej i pionowej siatki modelu w terenach górskich znacząco poprawi dokładność prognoz temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g.** Do weryfikacji powyższej hipotezy wykorzystano trzy testowe konfiguracje wersji systemu ALADIN-HIRLAM NWP (AROME 1 x 1 km, 105 poziomów pionowych; ALARO niehydrostatyczny (NH) 1 x 1 km, 105 poziomów pionowych; HARMONIE-AROME 2 x 2 km, 60 poziomów pionowych). Weryfikację wyników prognoz modelowych dokonano poprzez porównanie z pomiarami z 19 stacji meteorologicznych zlokalizowanych w Polskich Karpatach Zachodnich.

Wyniki i dyskusja

Porównanie wartości prognozowanej temperatury powietrza z obserwacjami obejmuje: (I) weryfikację modelu AROME CMC 2 km dla trzech przedziałów czasowych: zima/wiosna, 1.01.2017-30.04.2017 i 1.01.2018-30.04.2018; oraz okres jesień/zima, 1.09.2017-31.12.2017; (II) porównanie obserwacji z wynikami prognoz modeli o rozdzielczości przestrzennej 2 x 2 km AROMCE CMC 2 km i HARMONIE-AROME, dla okresu od 1 stycznia do 16 lutego 2017 (dane dostępne dla 39 dni); porównanie obserwacji z wynikami modeli rozdzielczości kilometrowej AROME CMC 1 km i ALARO NH oraz modelu operacyjnego AROME CMC 2 km. Ponieważ horyzont czasowy prognozy modeli o rozdzielczości kilometrowej jest krótszy niż modelu operacyjnego, tylko wspólny przedział czasowy od 6 do 18 godziny prognozy został wykorzystany w procesie weryfikacji. Okres weryfikacji dwóch modeli o rozdzielczości kilometrowej obejmował przedział od 1.01.2017 do 16.02.2017 (dane dostępne dla 31 dni).

Warunki cyrkulacyjne w badanym okresie, wyznaczone na podstawie klasyfikacji Niedźwiedzia (Niedźwiedź, 2017) były zbliżone do średniej wieloletniej. Badania cyrkulacji atmosfery dla tego regionu zaprezentowane w pracy Ustrnula (2007) wskazują, że w chłodnej porze roku, różnice między standardową jesienią (od września do listopada) i zimą (od grudnia do lutego) są nieznaczące. W wyselekcjonowanym okresie dominowała adwekcja mas powietrza z zachodu, związana z aktywnością zarówno cyklonalnych, jak i antycyklonalnych ośrodków barycznych.

Weryfikacja wyników modelu AROME CMC 2 km dla trzech przedziałów czasowych potwierdziła zgodność prognoz numerycznych z obserwacjami oraz podobieństwo jakości prognoz dla wyselekcjonowanych przedziałów czasowych. Badania wykazały wystąpienie pewnych różnic parametrów statystycznych dla stacji reprezentujących różne ukształtowanie terenu. W przypadku stacji zlokalizowanych na szczytach średnie wartości RMSE dla wszystkich okresów oraz wartości minimalnej dobowej temperatury powietrza wskazały na lepszą zgodność prognozy z obserwacjami niż dla stacji dolinnych. Ponieważ cechy te występują we wszystkich trzech okresach, można przyjąć, że były one typowe dla badanego obszaru. Największy błąd prognozy temperatury powietrza w dolinach związany był z wpływem ośrodków wysokiego ciśnienia, co potwierdzają epizody wystąpienia tych warunków synoptycznych (7-9.01.2017, 27-31.01.2017 oraz 26.02.2018-4.03-2018). Minimalna

dobowa temperatura powietrza w tych okresach dla stacji dolinnych była przeszacowana nawet o 10°C, co miało wpływ na wartość RMSE wyznaczoną dla całego analizowanego okresu. W czasie trwania takich sytuacji synoptycznych, w dolinach często formowały się zastoiska chłodnego powietrza, które wywołane były ciszami atmosferycznymi lub bardzo słabym wiatrem a także spływami katabatycznych w nocy. W wyniku wystąpienia tych zjawisk, przygruntowa temperatura powietrza osiągała znacznie niższe wartości temperatury niż w obszarach zlokalizowanych na podobnej wysokości bezwzględnej, ale na otwartej, równinnej formie ternu. Pomimo zaobserwowanego problemu związanego z prognozą minimalnych temperatur w dolinach badania wykazały, że na podstawie gradientów temperatury obliczonych z wykorzystaniem par stacji o różnicy wysokości większej niż 500 m można wiarygodnie zaprognozować wystąpienie inwersji termicznych przyczyniających się do wystąpienia epizodów smogu w dolinach.

Druga część badań skupiła się na porównaniu wyników dla różnych konfiguracji modeli systemu ALADIN-HIRLAM. Ponadto, została zweryfikowana hipoteza H1, że w obszarach górskich, zwiększona rozdzielczość przestrzenna modeli systemu ALADIN-HIRLAM wpłynie znacząco na poprawę prognozowanej temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. W pierwszej kolejności dokonano porównania wyników modelu operacyjnego AROME CMC 2 km z modelem HARMONIE-AROME, wykorzystującego odmienną parametryzację turbulencji i dynamikę. Wyniki badań nie wykazały jednak znaczącej poprawy prognozy temperatury powietrza dla stacji zlokalizowanych w dolinach i na szczytach. Porównanie wyników modelu operacyjnego AROME CMC 2 km z testowymi konfiguracjami modeli o rozdzielczości przestrzennej 1 km i zwiększonej liczbie poziomów pionowych (105 poziomów) również nie wykazało znaczącej poprawy prognozowanej temperatury. **Na podstawie powyższych wyników nie można potwierdzić słuszności hipotezy badawczej H1.** Mogło być to spowodowane wciąż zbyt małą liczbą poziomów wertykalnych reprezentujących masy powietrza w dolinach, ale również co jest bardziej prawdopodobne niewystarczającym odwzorowaniem warunków stabilnej atmosfery przez schematy turbulencji wykorzystywane w numerycznych modelach prognoz pogody.

Warto tu zwrócić uwagę, że wcześniejsze badania wskazywały jednak, że ważniejszym czynnikiem dla prawidłowego prognozowania przestrzennej zmienności temperatury powietrza na obszarach o zmiennej topografii jest rozdzielczość pozioma, a nie pionowa (Chen i in. 2004; Billings i in., 2006).

6.2. Publikacja A2

The impact of a foehn wind on PM_{10} concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland

Wpływ wiatru fenowego na stężenie PM10 i strukturę miejskiej warstwy granicznej w warunkach zróżnicowanej rzeźby terenu na przykładzie Krakowa

Publikacja A2 realizuje drugi cel szczegółowy przedłożonej rozprawy doktorskiej, czyli rozpoznanie głównych mechanizmów mających wpływ na dyspersję zanieczyszczenia powietrza w dolinie, towarzyszących wystąpieniu wiatru fenowego w okresie chłodnym na przykładzie Krakowa. **Ponadto w ramach badań zweryfikowano hipotezę H2, że adwekcja ciepłych i suchych mas powietrza w sezonie chłodnym z sektora południowego (w tym wiatru halnego) negatywnie wpływa na warunki dyspersyjne w Krakowie modyfikując strukturę miejskiej warstwy granicznej.** W poniższych badaniach zostały wykorzystane dane z dwóch sezonów chłodnych: IX 2017-IV 2018 i IX 2018-IV 2019. Na postawie kryteriów zaprezentowanych w podrozdziale 5.1 zostało wyselekcjonowanych 14 epizodów potencjalnego wystąpienia fenu o czasie trwania dłuższym niż 24 godziny. Powyższe epizody zostały wykorzystane w celu dokonania oceny wpływu wiatru fenowego na dynamikę przestrzenną i czasową stężenia pyłu PM_{10} w Krakowie.

Wyniki i dyskusja

Mechanizmy kształtujące przestrzenno-czasowy rozkład zanieczyszczenia PM_{10}

Pierwszym krokiem analizy danych było wyodrębnienie faz zmian stężenia pyłu PM_{10} w okresie trwania poszczególnych epizodów. Dla wyselekcjonowanych okresów wyróżniono cztery schematy przestrzenno-czasowego rozkładu stężenia pyłu PM_{10} (Rycina 2 w **publikacji A2**):

1. nagły, znaczący wzrost stężenia PM_{10} we wszystkich punktach pomiarowych (8 przypadków);
2. nagły, znaczący spadek stężenia PM_{10} we wszystkich punktach pomiarowych (11 przypadków);
3. krótkoterminowe piki lub długoterminowe okresy wystąpienia wysokiego stężenia PM_{10} tylko w zachodniej części miasta (15 przypadków);
4. długoterminowe okresy wystąpienia wysokich stężeń PM_{10} we wszystkich punktach pomiarowych (3 przypadki).

Dla każdej zmiany rozkładu stężenia PM_{10} w poszczególnych epizodach wystąpienia fenu przeanalizowano dane pomiarowe i modelowe w celu określenia mechanizmów odpowiedzialnych za określony schemat rozkładu zanieczyszczenia PM_{10}. Dostępne dane dotyczące temperatury i wilgotności powietrza, zarówno obserwacje, jak i wyniki analiz modelu numerycznego, posłużyły przede wszystkim do określenia, czy w dolinie wystąpiło zastoisko chłodnego powietrza oraz jaki był jego zasięg pionowy. Następnie zebrane dane zostały wykorzystane do obserwacji zmian właściwości miejskiej warstwy granicznej w dolinie. Do zbadania turbulencji wykorzystano pionowe pola turbulentnej energii kinetycznej z modelu AROME (wymiary komórki elementarnej 1 x 1 km; 87 poziomów pionowych), dostarczające informację o mechanicznej turbulencji i potencjale konwekcyjnym w badanym regionie. Wszystkie dostępne dane dotyczące prędkości i kierunku wiatru posłużyły do prześledzenia wystąpienia wiatru fenowego na badanym obszarze, jego wpływu na zastoisko chłodnego powietrza, występowania spływów katabatycznych oraz lokalnych modyfikacji pola wiatru związanych z ukształtowaniem rzeźby terenu. Poniżej została przedstawiona charakterystyka każdego schematu PM_{10} wraz z mechanizmami modyfikującymi strukturę UBL i warunki dyspersji PM_{10}. Należy tutaj wspomnieć, że dla większości analizowanych epizodów w czasie ich trwania wystąpiło kilka różnych schematów lub kilka przypadków wybranego schematu. Ponadto, procesy decydujące o zmianach rozkładu stężenia PM_{10} były różne dla każdego schematu, dlatego nie można było zastosować jednego wskaźnika do scharakteryzowania wszystkich badanych przypadków.

Schemat 1: nagły, znaczący wzrost stężenia PM_{10} we wszystkich punktach pomiarowych

Schemat nr 1 reprezentuje sytuację, kiedy wiatr fenowy przemieszcza się nad doliną, powodując intensyfikację inwersji temperatury powietrza i zastoiska chłodnego powietrza przyczyniając się w ten sposób do redukcji wysokości warstwy granicznej atmosfery.

Epizody które zostały zaklasyfikowane do powyższej grupy charakteryzowały się wzrostem stężenia PM_{10} z poziomu poniżej 50 $\mu g \cdot m^{-3}$ (europejska norma dobowa) do wartości 150-200 $\mu g \cdot m^{-3}$ w okresie od 3 do 5 godzin. We wszystkich przypadkach wzrost stężenia PM_{10} był związany z silnym rozwojem inwersji temperatury w dnie doliny Wisły. Różnica temperatur powietrza pomiędzy poziomem 2 m n.p.g. a 100 m n.p.g. w zachodniej części doliny (stacja Maszt RTCN) sięgała od około 4°C aż do ponad 10°C. W tym samym czasie wilgotność względna powietrza sięgała 80-90% w dnie doliny na terenach podmiejskich, co wskazuje na występowanie mgły, gdyż jej wartości szybko spadała wraz z wysokością. Prędkość wiatru wewnątrz doliny nie przekraczała 3 $m \cdot s^{-1}$, natomiast na wysokości ok. 100 m n.p.g. (tj. nad dnem doliny) wzrastała do 6–8 $m \cdot s^{-1}$ (sytuacja dla centrum miasta).

Dodatkowo w zachodniej części doliny na poziomie stacji (10 m n.p.g.) obserwowano słaby wiatr północny. Dane wskazują, że w dolinie występowało zastoisko chłodnego powietrza, które tworzyło stabilną warstwę przygruntową powietrza. Stabilność warstwy przygruntowej wzmocniły spływy katabatyczne ze stoków wyżyn, przedstawione na Rycinie 4 w **publikacji A2**. Wiatr z sektora południowego prognozowany był jedynie na szczytach wzgórz oraz w wybranych częściach doliny, natomiast w wielu miejscach w dolnej części doliny położonych na przedpolu północnych zboczy prognozowany był słaby wiatr z sektora NW–NE. Wiatr północny w dolinie nie przekraczał 2 $m \cdot s^{-1}$

i wynikał z orograficznego odbicia strumienia powietrza napływającego z południa. Przykład takiego zjawiska został opisany m.in. w pracy Sheridan (2019), tj. przepływ zwrotny typu prądu gęstościowego (ang. *density current-like return flow*) powietrza w obrębie warstwy inwersyjnej i pod nią (spływ katabatyczny ze zboczy wyżyn). Warto tutaj wspomnieć, że tereny położone na północ od Krakowa są silnie zaludnione i stanowią znaczące lokalne źródło emisji zanieczyszczenia. Z tego powodu, spływy katabatyczne wnikające do miasta od północnej strony mogą charakteryzować się wysokim stężeniem PM_{10} i znacznie pogarszać warunki aerosanitarne w Krakowie.

Schemat 2: nagły, znaczący spadek stężenia PM_{10} we wszystkich punktach pomiarowych

Przypadki spadku stężenia PM_{10} zaklasyfikowane do grupy 2 uznano za nagłe i znaczące, jeżeli poziom stężenia zmienił się od 150-200 $\mu g \cdot m^{-3}$ do wartości poniżej 50 $\mu g \cdot m^{-3}$ w okresie od 3 do 5 godzin. Spadki stężenia PM_{10} były związane z wniknięciem wiatru fenowego do doliny, zlikwidowaniem zastoiska chłodnego powietrza i wzrostem prędkości wiatru. Badania pozwoliły na wyróżnienie dwóch różnych przebiegów tego procesu. W pierwszym przypadku wiatr fenowy, przemieszczając się z południa, wnikał najpierw do doliny rzeki Raby (prawy dopływ rzeki Wisły) na wschód od Krakowa, a następnie przemieszczał się w okolice Krakowa od wschodniej strony, gdzie dolina Wisły jest znacznie szersza niż jej zachodnia część. W wyniku tego zjawiska, prędkość wiatru w dolinie stopniowo wzrastała ze wschodu na zachód. Warstwa inwersyjna w dolinie ulegała zniszczeniu, co przyczyniało się do poprawy warunków dyspersji, co z kolei doprowadziło do szybkiego i znaczącego spadku stężenia PM_{10}.

Drugi przypadek przedstawia wniknięcie wiatru fenowego do doliny Wisły od górnej granicy zastoiska chłodnego powietrza, przykład takiej sytuacji zaobserwowano w okresie 6-7.03.2019 (Rycina 6 w **publikacji A2**). Dla tej sytuacji, w początkowym okresie wystąpienia wiatru fenowego nad doliną, prędkość wiatru rośnie stopniowo od górnej granicy zastoiska chłodnego powietrza w dół, a ponadto zjawisku temu towarzyszył wzrost temperatury powietrza w wyższych warstwach atmosfery (Rycina 6 d w **publikacji A2**). Pomimo faktu, że przygruntowa inwersja termiczna w warstwie 2-100 m n.p.g. jest wzmacniana przez adwekcję suchych i ciepłych mas powietrza poziom stężenia PM_{10} na stacjach maleje, w wyniku wymiany mas powietrza z zastoiska chłodnego powietrza z warstwą znajdującą się powyżej. Całkowite przełamanie zastoiska chłodnego powietrza następuje w wyniku nagrzania powierzchni czynnej w ciągu dnia i zainicjowania ruchów konwekcyjnych. Podsumowując, w analizowanym okresie w dolinie Wisły wystąpiło zastoisko chłodnego powietrza, dodatkowo prognozowany był topograficznie wymuszony przepływ wiatru fenowego od wschodniej części doliny.

Mechanizmy opisane powyżej dobrze odpowiadają tym zdefiniowanym dla usuwania zastoiska chłodnego powietrza w dolinie Renu podczas wystąpienia wiatru fenowego (Flamant i in., 2006). Dla powyższego przypadku można przyjąć, że ruchy konwekcyjne wewnątrz zastoiska chłodnego powietrza mają najmniejszy wpływ na przełamanie przygruntowej inwersji termicznej, ze względu na niewielki strumień promieniowania krótkofalowego w sezonie chłodnym oraz zacienienie doliny.

Turbulentna erozja w górnej warstwie zastoiska chłodnego powietrza, związana z silnym ścinaniem wiatru między wiatrem fenowym a zastoiskiem chłodnego powietrza, prowadzi do procesów mieszania niezbędnych do przełamania warstwy inwersyjnej, co wydaje się decydujące w drugim przypadku opisanym powyżej. W przypadku doliny Renu (Flamant i in., 2006) dynamiczne usuwanie zastoiska chłodnego powietrza przez wiatr fenowy przypisywano wpływowi fal górskich, natomiast w przypadku doliny Wisły należy to przypisać tunelowemu przepływowi wiatru fenowego najpierw w dolinie Raby, a następnie w dolinie Wisły.

Schemat 3: krótkotrwałe piki lub długoterminowe okresy wysokiego stężenia pyłu zawieszonego PM_{10} tylko w zachodniej części miasta

Różnice w rzeźbie terenu pomiędzy zachodnią a wschodnią częścią doliny Wisły w Krakowie przyczyniają się do występowania schematu 3, przedstawionego na przykładzie w okresie 11-12.12.2017. Wyniki badań naukowych dla wyidealizowanych przypadków (Sheridan, 2019) wskazują, że szerokość doliny jest istotnym parametrem wpływającym na interakcje między zastoiskiem chłodnego powietrza a przepływem mas powietrza nad doliną. We wszystkich przypadkach schematu

3 znacznie większe stężenie PM_{10} zaobserwowano w zachodniej niż we wschodniej części doliny. Okresy występowania wysokich stężeń PM_{10} były albo długotrwałe, albo występowały jako nagłe piki stężenia PM_{10}. Jednocześnie prędkość wiatru we wschodniej części doliny była znacznie wyższa niż w zachodniej, znaczące różnice widoczne były również w przypadku stabilności atmosfery w dolinie.

Pierwszy wyszczególniony przypadek prezentuje wpływ rzeźby terenu na wiatr fenowy w skali lokalnej, przyczyniając się do wystąpienia zamkniętych wirów w dolinie, które mogą prowadzić do lokalnego gromadzenia się zanieczyszczenia powietrza. Warunki atmosferyczne dla powyższego przypadku zostały zaprezentowane na Rycinie 7 i 8 w **publikacji A2**.

Drugi przypadek schematu 3. prezentujący wpływ fal grawitacyjnych na dynamikę zastoiska chłodnego powietrza przedstawiono na danych z dnia 9.10.2019. Na terenach pogórskich na południe od Krakowa widoczne są silne ruchy pionowe wznoszące, natomiast w dolinie Wisły zjawisko to jest znacznie słabsze (Rycina 9 f w **publikacji A2**). Jak pokazują pomiary ze stacji Maszt RTCN, w warstwie powietrza 50–100 n.p.g. w zachodniej części doliny panowały warunki izotermiczne, od 18 UTC w dniu 9.02.2019 do 8 UTC dnia następnego. Fale grawitacyjne powodowały wzrost turbulencji w południowej części miasta, podczas gdy w północnej prognozowana turbulentna energia kinetyczna była bliska zeru, a ponadto południowa część miasta była cieplejsza o około 2-3°C niż północna. W późniejszych godzinach, między 9 a 11 UTC (10.02.2019), w zachodniej części doliny prędkość wiatru była mała co pokazują mapy powierzchniowe prognozowanej prędkości wiatru dla poziomów 30 m i 110 m n.p.g. (Rycina 10 w **publikacji A2**). Należy zwrócić również uwagę na znaczące różnice rozkładu przestrzennego prędkości wiatru i TKE pomiędzy zachodnią i wschodnią częścią doliny. W kierunku południowym i południowo-zachodnim od stacji meteorologicznej Balice, zaobserwowano silne ruchy pionowe wznoszące, równoległe do grzbietów pogórskich na przekrojach S–N i SW–NE prędkości pionowej (25–30 km od punktu odniesienia), które zostały zidentyfikowane jako skoki hydrauliczne (oznaczone przez HJ na Rycina 11 c–d w **publikacji A2**). Przestrzenny rozkład temperatury powietrza, wilgotności powietrza i składowych wiatru na przekrojach S-N i SW-NE (Rycina 11 a–b w **publikacji A2**) wskazuje na występowanie silnych fluktuacji temperatury i wilgotności powietrza w obszarze wystąpienia skoków hydraulicznych. Wystąpienie skoku hydraulicznego spowodowało osłabienie wiatru w dolinie i ścinanie wiatru nad doliną. Należy tutaj wspomnieć, że wyniki symulacji numerycznej rzeczywistego studium przypadku (Elvidge i in., 2016) i wyidealizowanych warunków (Sheridan i Vosper, 2005) są zbieżne się z obserwacjami zaprezentowanymi w niniejszej pracy.

Schemat 4: długotrwałe okresy wysokiego stężenia PM_{10} we wszystkich punktach pomiarowych

W przypadku schematu 4, mechanizmy odpowiedzialne za długo utrzymujące się wysokie stężenie PM_{10} są podobne jak dla schematu 1, ale ich czas trwania jest dłuższy (przykładowy epizod: 20.12.2018; Wykres 12 w **publikacji A2**). Decydującym czynnikiem jest tutaj zjawisko osłonięcia doliny, tj. strumień ciepłego powietrza generowany przez wiatr fenowy przemieszcza się nad doliną o przebiegu równoleżnikowym (W–E), powodując osłonięcie znacznie chłodniejszych mas powietrza w dolinie, o stabilnej stratyfikacji (często lokalnie występującą mgłą), wskutek czego wzmacnia inwersję temperatury powietrza. Taka sytuacja może się utrzymywać nawet w ciągu dnia. W obrębie doliny prędkość wiatru jest bliska zeru, podobnie jak turbulentna energia kinetyczna, która przyczyniała się do zmniejszenia dostępnej dla procesów mieszania objętości powietrza i zatrzymania emitowanego zanieczyszczenia wewnątrz doliny, podczas gdy na obszarach położonych powyżej wartości prędkości wiatru i turbulentnej energii kinetycznej były znacznie wyższe.

Sytuacja przedstawiona powyżej może być również zaobserwowana w innych obszarach górskich, należy jednak zwrócić uwagę, że wyznaczenie czynników mających decydujących wpływ na wniknięcie wiatru fenowego do doliny nie jest proste. Przykład stanowią badania wiatru fenowego w dolinie Morza Martwego z wykorzystaniem modelu wysokiej rozdzielczości WRF (Kunin i in., 2019). Wskazały one, że wniknięcie wiatru fenowego zależy od warunków synoptycznych i mezoskalowych, które wpływają na strukturę pionową dolnej troposfery i determinują wysokość stabilnej warstwy atmosfery. W okresie wystąpienia wysokiej stabilnej warstwy nad doliną Morza Martwego, wiatr fenowy osiągnął

dno doliny, natomiast w okresie, kiedy wystąpiła niska stabilna warstwa atmosfery w dolinie wiatr fenowy nie wniknął do doliny.

Dyskusja

Wyniki badań przedstawione powyżej wskazują, że wiatr fenowy występujący Karpatach Zachodnich w znaczący sposób może modyfikować PBL kształtując warunki dyspersji zanieczyszczenia powietrza oraz poziom zanieczyszczenia. Ważnym aspektem niniejszej pracy była ocena roli wiatru fenowego w modyfikacji warunków dyspersji PM_{10} w odniesieniu do innych czynników, które regularnie wpływają na dynamikę UBL w Krakowie.

W przypadku Krakowa, głównym czynnikiem modyfikującym warunki pogodowe w skali lokalnej jest rzeźba terenu. Czynnik ten decyduje również o oddziaływaniu wiatru fenowego na miejską warstwę graniczną. Miasto położone jest w dolinie, o przebiegu równoleżnikowym, prostopadłym do wiatrów południowych, gdzie wschodnia część doliny jest znacznie szersza niż zachodnia. W okresie półrocza chłodnego stratyfikacja pionowa atmosfery wewnątrz UBL charakteryzuje się częstym występowaniem stabilnych warunków atmosferycznych. Wiatr fenowy może przemieszczać się nad doliną lub wnikać do doliny w różnoraki sposób. Wystąpienie wiatru fenowego może zarówno pogorszyć jak i poprawić warunki dyspersji zanieczyszczenia powietrza, w efekcie czego przyczynić się wzrostu lub redukcji poziomu stężenia PM_{10}. Ponadto, wystąpienie wiatru fenowego może przyczynić się do wystąpienia znaczących różnic stężenia PM_{10} w poszczególnych częściach miasta. Wpływ wiatru fenowego na warunki atmosferyczne zależy w dużej mierze od kierunku, z którego wiatr fenowy dociera do miasta, co jest efektem ogólnych warunków cyrkulacji atmosfery i oddziaływania topografii terenu. **Powyższe badania wskazały, że hipoteza H2 mówiąca, że adwekcja ciepłych i suchych mas powietrza w sezonie chłodnym z sektora południowego (w tym wiatru halnego) negatywnie wpływa na warunki dyspersyjne w Krakowie modyfikując strukturę miejskiej warstwy granicznej nie jest w pełni słuszna.**

Mechanizmy interakcji między UBL a wiatrem fenowym opisane powyżej są modyfikowane przez procesy w skali lokalnej. Jak pokazano np. dla Urumqi (Li X. i in., 2015) lub dla doliny Morza Martwego (Vullers i in., 2018) wpływ wiatru fenowego na PBL i zanieczyszczenie powietrza silnie zależy od jego modyfikacji przez lokalną rzeźbę terenu, co dodatkowo wskazuje, że możliwe jest skonstruowanie modelu koncepcyjnego dotyczącego wpływu wiatru fenowego na przestrzenny rozkład zanieczyszczenia powietrza w mieście, ale tylko dla określonego typu położenia miasta. W przypadku Krakowa taki model składa się z następujących elementów:

1. Wiatr fenowy w Tatrach jest wystarczająco silny, aby dotrzeć do obszaru miasta Krakowa. Może on modyfikować warunki rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia powietrza w mieście i w efekcie przyczynić się do nagłego i dużego spadku lub do wzrostu poziomów stężenia PM_{10} w całym mieście, jak i do wystąpienia pików stężenia PM_{10} tylko w zachodniej części miasta lub do długotrwałych wysokich poziomów stężenia PM_{10} w całym mieście. Wystąpienie określonego efektu uzależnione jest od sposobu przemieszczania się wiatru fenowego przez obszar miasta i jego okolic.
2. Zidentyfikowano następujące rodzaje przemieszczania się wiatru fenowego: a. wiatr fenowy przemieszcza się nad doliną, gdzie występuje silne zastoisko chłodnego powietrza, dodatkowym zjawiskiem towarzyszącym tej sytuacji może być odwrotny napływ mas powietrza (odbicie mas powietrza od stoków wyżyn północnych); b. wiatr fenowy wnika do doliny od wschodu lub od szczytu doliny niszcząc zastoisko chłodnego powietrza; c. fale grawitacyjne generowane przez wiatr fenowy są na tyle silne, że przedostają się do zachodniej, wąskiej części doliny powodując duże przestrzenne zróżnicowanie turbulencji w obrębie miasta.
3. Pierwszy rodzaj przemieszczania się wiatru fenowego powoduje pogorszenie warunków dyspersji zanieczyszczenia powietrza w całym mieście i prowadzi do znaczących wzrostów stężenia PM_{10}, drugi tryb poprawia warunki dyspersji i prowadzi do dużych spadków stężenia

PM_{10} w całym mieście, trzeci natomiast przyczynia się do wystąpienia dużego zróżnicowania przestrzennego stężenia PM_{10} w obrębie miasta.

6.3. Publikacja A3

Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics

Ultralekki bezzałogowy system pomiarowy do badania dynamiki miejskiej warstwy granicznej

Publikacja A3 realizuje trzeci szczegółowy cel przedłożonej rozprawy doktorskiej, czyli skonstruowanie bezzałogowego systemu do pomiarów pionowych atmosfery i opracowanie procedury obróbki danych pomiarowych. Ponadto, w ramach wykonanych badań **zweryfikowano hipotezę H3, że bezzałogowe statki powietrze mogą być wykorzystane w miastach do profilowania warstwy granicznej atmosfery, dostarczając dodatkowych informacji o dynamice struktury pionowej atmosfery**. W badaniach wykorzystane zostały nisko kosztowe czujniki parametrów meteorologicznych i jakości powietrza zainstalowane na pokładzie wielowirnikowego statku powietrznego popularnie nazywanego dronem.

Wyniki i dyskusja

W **publikacji A3** zaprezentowane są pomiary w profilu pionowym dla trzech kampanii pomiarowych. W pracy zamieszczone są profile pionowe temperatury potencjalnej powietrza, wilgotności względnej i stężenia PM_{10}. Ponadto dla trzeciej kampanii pomiary uzupełnione są o profile prędkości wiatru. Porównanie wyników w profilu pionowym zostało wykonane z użyciem obserwacji ze stacjonarnych punktów pomiarowych (stacja Kampus UJ i Maszt RTCN). Wszystkie czujniki wykorzystane w badaniach zostały skalibrowane a ich pomiary w profilu pionowym zostały wygładzone celem usunięcia szumów aparaturowych. Pomiar temperatury powietrza oraz wilgotności względnej w profilu pionowym został dodatkowo skorygowany z wykorzystaniem procedury korekty czasowej odpowiedzi sensora na zmianę warunków otoczenia zaprezentowanych w Rozdziale 5.3. W związku z tym, że kampania pomiarowa prowadzona była w warunkach nocnych i dziennych, zaobserwowano czasową zmienność pionowej struktury UBL. W celu analizy dynamiki UBL wyznaczono pionowe gradienty temperatury potencjalnej i wilgotności względnej powietrza. Wysokość, na której obserwowana była znacząca zmiana gradientu w pionowym profilu temperatury potencjalnej, określana była jako szacunkowa wysokość warstwy inwersyjnej (Rycina 8 w **publikacji A3**). Na podstawie analiz wszystkich profili pionowych temperatury potencjalnej powietrza oraz analiz klimatologicznych badanego obszaru (nie zaprezentowane w pracy) dla warunków neutralnych i stabilnych przyjęto przedział potencjalnego gradientu temperatury odpowiednio [-0,7–0,7]°C/100 m oraz >0,7°C/100 m. Ogólne informacje przedstawiające charakterystykę profili pionowych względnej wilgotności powietrza i potencjalnej temperatury powietrza dla trzech kampanii pomiarowych zawarte są w Tabelach A1-A4 w **publikacji A3**.

Wyniki uzyskane podczas trzech kampanii z wykorzystaniem powietrznej platformy pomiarowej pozwoliły na szczegółową analizę czasowej zmienności pionowej struktury UBL w skali lokalnej dla dwóch różnych sytuacji synoptycznych (adwekcja z południowego zachodu typu cyklonalnego i antycyklonalnego). Wyniki dwóch kampanii porannych (21.09.2018 i 7.09.2019) wskazały, że na granicy przygruntowej warstwy inwersyjnej występowały znaczące zmiany stężenia PM_{10}. W trakcie występowania stabilnych warunków w warstwie od poziomu gruntu do wysokości 100 m n.p.g. (głębokość dna doliny) poziom stężenia PM_{10} nie zmieniał się znacząco. W warstwach powyżej, obserwowane były znaczące fluktuacje stężenia PM_{10}. Możliwym wyjaśnieniem tego zjawiska jest osłabienie turbulencji mechanicznych w dolinie na skutek osłonięcia topograficznego oraz występowanie dolnotroposferycznego prądu strumieniowego ponad dnem doliny, co może inicjować wystąpienie turbulencji mechanicznej w efekcie modyfikując dyspersję zanieczyszczenia. Inne badania przedstawiające występowanie warstwy o zwiększonym stężeniu zanieczyszczenia powietrza na określonej wysokości wskazują, że warunki te były związane z dyfuzją pionową - zwiększone stężenia

zanieczyszczenia w warstwie kilkudziesięciu metrów nad poziomem gruntu (Strbova i in., 2017), dyfuzją smugi zanieczyszczenia ze źródeł wzniesionych - górne warstwy atmosfery na wysokości nawet kilkuset metrów nad poziomem gruntu (Xu i in., 2019) lub spływów zanieczyszczenia regionalnego z górnych warstw atmosfery (Han i in., 2018). Badania pionowych profili temperatury potencjalnej powietrza i wilgotności względnej wskazały, że istotnym czynnikiem wpływającym na erozję zastoiska chłodnego powietrza w godzinach porannych jest adwekcja ciepłych mas powietrza. W czasie pierwszej kampanii pomiarowej (18.09.2018), adwekcja ciepłych mas powietrza przyczyniła się do intensyfikacji przygruntowej warstwy inwersyjnej w nocy. Dane temperaturowe uzyskane podczas 1. i 2. kampanii pomiarowej posłużyły do porównania procesów atmosferycznych zachodzących podczas rozwoju warstwy konwekcyjnej i stabilnej warstwy granicznej w okresie nocnym. Szczególną uwagę poświęcono gradientowi temperatury potencjalnej i wysokości, na której występowała gwałtowną zmiana gradientu pionowego w czasie kolejnych lotów. Porównanie wyników prędkości wiatru z drona z obserwacjami ze stacji meteorologicznej Kampus UJ dla trzeciej kampanii wykazało dobrą zgodność dla warunków wystąpienia słabego wiatru w dolinie (poniżej 2 $m \cdot s^{-1}$), podczas występowania silniejszej prędkości wiatru wykonane pomiary mieściły się w zakresie między średnią a maksymalną prędkością wiatru (dla większości przypadków prędkość chwilowa z wykorzystaniem drona była bliższa wartości maksymalnej zmierzonej na stacji przygruntowej). Efekt ten może być związany z lokalną redukcją prędkości wiatru w miejscu lokalizacji stacji Kampus UJ na skutek wpływu otaczającej go zabudowy, podczas gdy loty odbywały się w terenie otwartym. Analiza okresu występowania wiatru fenowego w dolinie pozwoliła zidentyfikować dwa przeciwstawne efekty związane ze zwiększoną prędkością wiatru. Z jednej strony zaobserwowano poprawę jakości powietrza wywołaną intensywnym rozproszeniem zanieczyszczeń stymulowanym silną turbulencją związaną z dużą prędkością wiatru w pierwszej fazie wystąpienia wiatru fenowego (prędkość przy powierzchni poniżej 5 $m \cdot s^{-1}$, na wyższych poziomach znacznie przekraczających 5 $m \cdot s^{-1}$), ale z drugiej strony pogorszenie jakości powietrza przez resuspensję osadzonych cząstek z powierzchni gruntu obserwowaną w drugiej fazie, gdy prędkość wiatru przy powierzchni przekroczyła wartość 5 $m \cdot s^{-1}$ (Rycina 17 w **publikacji A3**). Podobny efekt został zaobserwowany dla doliny Morza Martwego przedstawiony w pracy Kishcha i in. (2016).

W ramach badań podjęto również próbę wyznaczenia turbulentnej energii kinetycznej na podstawie obserwacji profilu pionowego wiatru, która może być bardzo przydatna do analizy sytuacji atmosferycznej w dolinie. Badania wskazały jednak, że wahania pozycji drona podczas lotów w warunkach silnej turbulencji powodowały silne zaszumienie sygnału, dlatego uniemożliwiały wykonanie poprawnego pomiaru fluktuacji składowych wiatru do obliczenia TKE. Konieczne są tutaj dalsze badania, w celu określenia, czy analiza danych zapisywanych przez system lotu drona może być przydatna do wyznaczenia parametru TKE w profilu pionowym.

Weryfikacja pomiarów w profilu pionowym otrzymanych przy użyciu bezzałogowego statku powietrznego z obserwacjami pochodzącymi ze stacjonarnych punktów pomiarowych potwierdziła słuszność hipotezy H3, że dane te mogą dostarczyć dodatkowych informacji o dynamice struktury pionowej atmosfery. Konieczna jest tutaj jednak szczegółowa analiza otrzymanych danych oraz ich opracowanie co związane jest między innymi z bezwładnością czujników pomiarowych.

6.4. Publikacja A4

Measurement report: Effect of wind shear on PM_{10} concentration vertical structure in the urban boundary layer in a complex terrain

Raport pomiarowy: Wpływ ścinania wiatru na profil pionowy stężenia PM_{10} w miejskiej warstwie granicznej w warunkach zróżnicowanej rzeźby terenu

Publikacja A4 realizuje czwarty cel szczegółowy przedłożonej rozprawy doktorskiej, czyli poznanie rozkładu pionowego zanieczyszczenia w zurbanizowanej dolinie i identyfikację głównych czynników atmosferycznych kształtujących jego dyspersję pionową. **W ramach badań zweryfikowano hipotezę**

H4, że występowanie ścinania wiatru nad doliną przyczynia się do pogorszenia warunków aerosanitarnych poprzez modyfikację wysokości warstwy mieszania. W poniższych badaniach zostały wykorzystane dane pomiarowe i prognostyczne obejmujące dwa sezony chłodne (IX 2018 – IV 2019 i IX 2019 – IV 2020) jako tło pomiarowe oraz szczegółowe dane dla balonowej kampanii pomiarowej odbywającej się w okresie XI 2019 – III 2020. Obserwacje dla dwóch sezonów chłodnych składają się pomiarów meteorologicznych (4 stacje meteorologiczne) i jakości powietrza (7 stacji jakości powietrza) oraz wyników prognoz numerycznych operacyjnego modelu meteorologicznego AROME (wymiary komórki elementarnej 2 x 2 km; 70 poziomów pionowych). Dane wykorzystane do analizy poszczególnych epizodów balonowej kampanii pomiarowej obejmują również pomiary meteorologiczne (8 stacji meteorologicznych) i jakości powietrza (7 stacji jakości powietrza) oraz wyniki prognoz testowej wersji numerycznego modelu meteorologicznego AROME (wymiary komórki elementarnej 1 x 1 km; 87 poziomów pionowych). Szczegółowy opis sieci pomiarowej i modelu AROME zamieszczony jest w podrozdziałach 4.1 i 4.3. Pomiary w profilu pionowym atmosfery stanowiły kluczowe źródło informacji o pionowym rozkładzie stężenia zanieczyszczenia PM_{10} w zachodniej części doliny Wisły, szczegółowy opis tej stacji badawczej zamieszczony jest w podrozdziale 4.2.

Wyniki i dyskusja

W ramach badań została wykonana analiza danych dla tła pomiarowego (dwóch sezonów chłodnych IX 2018-IV 2019 i IX 2019-IV 2020) której celem było: 1. określenie przestrzennej zmienności wybranych parametrów meteorologicznych i jakości powietrza na badanym obszarze; 2. zdefiniowanie warunków wystąpienia uskoku wiatru; oraz 3. weryfikacja reprezentatywności okresu kampanii pomiarowej dla całego sezonu chłodnego. Zastosowane wskaźniki obejmowały róże wiatrów dla stacji naziemnych, histogramy prognozowanej prędkości wiatru dla trzech poziomów wysokości z modelu operacyjnego AROME (tj. 50, 100 i 200 m n.p.g.), gradienty temperatury powietrza, różnice stężeń PM_{10} między stacjami oraz korelacje między poziomami stężeń PM_{10} a prędkością wiatru w dolinie. Porównanie danych dla obu sezonów chłodnych z okresem trwania balonowej kampanii pomiarowej wskazały, że okres kampanii można uznać za reprezentatywny jedynie dla dni charakteryzujących się niską prędkością wiatru, o znacznie częstszym występowaniu przyziemnej inwersji termicznej i zjawisku ścinania wiatru w warstwie między 50 a 200 m n.p.g. niż w obu pełnych sezonach chłodnych. Badania rozkładu stężenia PM_{10} na terenie Krakowa w sezonach chłodnych potwierdziły występowanie znaczących różnic poziomu stężenia między zachodnią a wschodnią częścią miasta. Z tego też względu pionowe pomiary stężenia PM_{10} można uznać reprezentatywne jedynie dla zachodniej części doliny Wisły. Należy również wspomnieć, że wyselekcjonowane dni w okresie 28.11.2019 – 3.03.2020 reprezentują okres o znacznie wyższych poziomach stężenia PM_{10} w porównaniu ze stężeniem w całym sezonie chłodnym 2019/2020. Po szczegółowym zapoznaniu się z analizowanym okresem badawczym, w kolejnym kroku została wykonana analiza warunków meteorologicznych towarzyszących wystąpieniu trzech charakterystycznych rozkładów pionowych stężenia zanieczyszczenia. Szczegółowy opis klasyfikacji profili pionowych stężenia PM_{10} został zaprezentowany w podrozdziale 5.3.

Grupa I

Profile pionowe stężenia PM_{10}, które zostały przypisane do Grupy 1 charakteryzowały się stałym poziomem stężenia. Dla większości dni, kiedy wystąpił ten typ profilu pionowego, turbulencja mechaniczna i termiczna odgrywała kluczową rolę w kształtowaniu pionowego rozkładu zanieczyszczenia powietrza przyczyniając się do wystąpienia silnego mieszania pionowego zanieczyszczenia. Należy jednak zwrócić uwagę na różnice w dynamice warstwy mieszania, kształtowanej przez turbulencję mechaniczną i turbulencję termiczną. W przypadku wystąpienia turbulencji mechanicznej następował szybki rozwój warstwy mieszania również w okresie nocnym, a następnie gwałtowny zanik warstwy mieszania w godzinach wieczornych. Prognozowana górna granica warstwy mieszania dla dni, kiedy dominująca role odgrywała turbulencja mechaniczna osiągała poziom 300–500 m n.p.g (wyznaczona z wykorzystaniem prognostycznych profili pionowych TKE modelu AROME). Niestety wysokość lotów dla tych dni w większości przypadków nie przekraczała 200

m n.p.g., co było przyczyną obserwowanego (prawie) stałego stężenia PM_{10} w profilu pionowym. W przypadku, gdy dynamikę warstwy mieszania determinowała turbulencja termiczna, obserwowany był stopniowy rozwój warstwy mieszania w ciągu dnia i jej grubość była niższa niż gdy dominującą rolę odgrywała turbulencja mechaniczna. Miąższość warstwy mieszania w tych dniach nie przekraczała wysokości 200 m n.p.g., a dodatkowo powyżej tego poziomu obserwowany był uskok wiatru. Maksymalna wysokość lotów w tych dniach nie przekraczała 150 m n.p.g., z tego powodu nie można było zaobserwować górnej warstwy o (najprawdopodobniej) znacznie niższych stężeniach PM_{10}. Taki scenariusz jest przykładem modyfikacji turbulencji na górnej granicy warstwy mieszania, zmniejszenia efektywności mieszania pionowego przez uskok wiatru, przedstawiony m.in. w pracy Rodier i in. (2017).

Grupa II

Grupę II stanowią profile pionowe zanieczyszczenia PM_{10} charakteryzujące się znaczącym liniowym spadkiem stężenia od poziomu gruntu aż do określonej wysokości lotu. Gwałtowny spadek stężenia PM_{10} wraz z wysokością w profilu pionowym był efektem wystąpienia dwóch procesów: (1) zwiększenia emisji zanieczyszczenia przy gruncie oraz usunięcia zanieczyszczenia z górnych warstw atmosfery; (2) wystąpienia turbulencji mechanicznej spowodowanej uskokiem wiatru. Uskok wiatru dla tych przypadków charakteryzował się wzrostem prędkości wiatru w pobliżu wysokości dna doliny (100 m n.p.g.) oraz znaczącą zmianą kierunku wiatru będącą wynikiem złożonego oddziaływania topografii. Nagły spadek stężenia PM_{10} w profilu pionowym wystąpił głównie w godzinach wieczornych, po osłabieniu ruchów konwekcyjnych i spadku prędkości wiatru na wysokości 10 m n.p.g. W przypadku pojedynczego epizodu, wystąpienie turbulencji mechanicznej przyczyniającej się do usunięcia zanieczyszczenia z doliny było spowodowane obecnością fal górskich (ang. *mountain waves*) silnie modyfikujących ruchy konwekcyjne w dolinie. Analiza profili pionowych stężenia PM_{10} wykazała, że taki typ profilu pionowego zanieczyszczenia był krótkotrwały, mógł on wystąpić m.in. w momencie chwilowego zaniku ruchów konwekcyjnych lub przejścia frontu atmosferycznego. Jako przykład procesów przedstawionych powyżej, w publikacji A4 został szczegółowo opisany przypadek z dnia 27.01.2020 (Rycina 7 i 8 w **publikacji A4**). Znaczący spadek stężenia PM_{10} wraz wysokością spowodowany był stopniowym zanikiem warstwy mieszania po godzinie 13 UTC i mechanicznym usuwaniem zanieczyszczenia z wyższych warstw atmosfery nad doliną. Najsilniejszy spadek stężenia w profilu pionowym zaobserwowano podczas ostatniego lotu, wysokość warstwy przygruntowej ze stałym stężeniem PM_{10} nie przekraczała średniej wysokości zabudowy miasta (30 m n.p.g.), a powyżej tej warstwy następował liniowy spadek stężenia PM_{10}. Spadek stężenia w warstwie od 30 do 150 m n.p.g. był związany z wystąpieniem uskoku wiatru (Rycina 8 d w **publikacji A4**).

Grupa III

Profil pionowy stężenia PM_{10} typu III stwierdzono w ponad 40% dni pomiarowych całej kampanii pomiarowej (13 z 31 dni). Kluczową rolę odgrywało tutaj zjawisko ścinania wiatru, które dla poszczególnych epizodów mogło znacząco się różnić m.in. intensywnością, wysokością wystąpienia oraz grubością warstwy, w której było prognozowane. Zjawisko to było odpowiedzialne za usuwanie zanieczyszczeń z górnej warstwy atmosfery. Kierunek wiatru obserwowany w dolnej warstwie był zdeterminowany lokalną rzeźbą terenu (wiatr dolinny), podczas gdy w warstwie górnej występował orograficznie wymuszony przepływ powietrza. Oddzielenie dwóch warstw atmosferycznych silnym uskokiem wiatru dla ponad połowy epizodów było wzmocnione adwekcją ciepłych mas powietrza. Ponadto, gdy w dolinie występowało zastoiska chłodnego powietrza, adwekcja ciepłych mas powietrza utrudniała pionowy transport zanieczyszczenia powietrza poprzez intensyfikację przygruntowej inwersji termicznej.

W celu zaprezentowania warunków atmosferycznych obserwowanych przy wystąpieniu typu III wykorzystano dane pomiarowe z dnia 28.11.2019. Profile pionowe wilgotności i temperatury powietrza z prognoz modelowych i pomiarów z Masztu RTCN w tym dniu wskazywały na wystąpienie silnej przygruntowej inwersji termicznej, intensyfikowanej poprzez adwekcję ciepłego i suchego

powietrza z południowego zachodu (Rycina 9 a–b w **publikacji A4**). Dane ze stacji pomiarowych jakości powietrza wykazały znaczną przestrzenną zmienność stężenia pyłu zawieszonego PM_{10} w Krakowie – maksymalna godzinowa różnica stężeń PM_{10} między punktami pomiarowymi wynosiła 170 $\mu g \cdot m^{-3}$. Istotny wpływ na wystąpienie niekorzystnych warunków dyspersji miało zjawisko uskoku hydraulicznego na południowych i południowo-zachodnich stokach wyżyn oddalonych o 25-30 km od centrum miasta (prognoza modelu AROME; Rycina 9 c–d w **publikacji A4**). Wystąpienie uskoku hydraulicznego spowodowało osłabienie wiatru w profilu pionowym od poziomu gruntu i przyczyniło się do wystąpienie silnego ścinania wiatru w warstwie powyżej (Rycina 9 c w **publikacji A4**). Wysokość, na której obserwowany był nagły spadek stężenia zanieczyszczenia PM_{10} nie przekraczała wysokości dna doliny, różnice pomiędzy poszczególnymi pionowymi profilami stężenia PM_{10} w tym dniu nie były istotne. O wysokości warstwy przejściowej decydowała głównie wysokość warstwy mieszania; profile pionowe wiatru wskazywały na występowanie uskoku wiatru powyżej warstwy mieszania. Ograniczony zasięg warstwy mieszania w dniu 28.11.2019 był wynikiem dużego zachmurzenia w ciągu dnia. W tym dniu na stacji Kasprowy Wierch i Balice nie były spełnione potencjalne warunki wystąpienia wiatru halnego, jednak przekroje pionowe z modelu AROME wskazywały na wystąpienie wiatru fenowego w południowo-zachodniej części Karpatach Zachodnich. Zjawisko to mogło przyczynić się do wzmocnienia adwekcji ciepłego powietrza z południowego zachodu. Podobne warunki atmosferyczne dla dolin górskich, charakteryzujące się znaczącą zmianą kierunku wiatru w profilu pionowym, jednocześnie przy słabej prędkości wiatru, zostały przedstawione w pracy m.in. (Vergeiner, 2004; Li i in., 2012; Li i in., 2015) dla okresów wystąpienia skoku hydraulicznego. W górnej warstwie powyżej wystąpienia nagłej zmiany kierunku wiatru, kierunek jest stały, podczas gdy prędkość wiatru rośnie wraz z wysokością.

W celu wykonania analizy statystycznej zależności położenia warstwy przejściowej dla profili pionowych w grupie III została zbadana zależność między wysokością środka warstwy przejściowej (parametr *e* w równaniu nr 2, podrozdział 5.3) a dwoma parametrami meteorologicznymi które uznano za kluczowe: (1) wysokość warstwy mieszania określana za pomocą profilu pionowego TKE; (2) położenie uskoku wiatru określone na podstawie zmiany kierunku bądź prędkości wiatru pomiędzy dwoma sąsiednimi poziomami modelowymi. Oba przypadki dla pionowego ścinania wiatru zostały przeanalizowane osobno. Jako położenie ścinania wiatru przyjęto wysokość niższej warstwy spośród dwóch między którymi zaobserwowano znacząca zmianę kierunku bądź prędkości wiatru. Wyniki badań wraz z opisem statystycznym próbek zostały zaprezentowane na Rycinie 11 w **publikacji A4**. Badania wskazały, że dla jednej trzeciej wyselekcjonowanych profili pionowych wysokość warstwy mieszania, uskoku wiatru i warstwy przejściowej były zgodne. Dla prawie połowy profili pionowych kluczowym czynnikiem determinującym rozkład pionowy zanieczyszczenia była wysokość warstwy mieszania. Z kolei w przypadku uskoku wiatru, dla jednej trzeciej profili pionowych położenie uskoku wiatru związane ze wzrostem prędkości w profilu pionowym było zbliżone do wysokości środka warstwy przejściowej a dla uskoku wiatru związanego ze znaczącą zmianą kierunku wiatru, liczba takich przypadków, stanowiła ponad połowę wszystkich profili pionowych. Wartość zbiorów danych średniokwadratowego oraz współczynnika korelacji Pearsona były zbliżone dla wszystkich próbek zaprezentowanych na Rycinie 11 w **publikacji A4**. Należy jednak wspomnieć, że wysokość występowania uskoku wiatru związanego ze zmianą w kierunku wiatru w profilu pionowym była w większości przypadków niższa niż wysokość środka warstwy przejściowej, w przeciwieństwie do przypadków, gdzie ścinanie wiatru związane było z nagłą zmianą prędkości wiatru w profilu pionowym.

Dyskusja

Badania prezentujące złożoną strukturę termiczną warstwy granicznej (m.in. Wang i in., 2018; Xu i in., 2019) wskazują, że lokalne zanieczyszczenie w większości przypadków uwięzione zostaje w najniższej warstwie atmosfery. Występowanie wielowarstwowej struktury pionowej w warstwie granicznej zostało zaobserwowane między innymi w okresach wystąpienia wiatru fenowego, gdzie adwekcja ciepłych mas powietrza przyczyniała się do wzmocnienia inwersji temperatury powietrza

i ograniczenia objętości powietrza dostępnej do mieszania pionowego zanieczyszczenia (Vergeiner, 2004; Li i in., 2015).

Analiza wyników zebranych podczas balonowej kampanii pomiarowej wskazała, że występowanie profilu pionowego zanieczyszczenia PM_{10} typu III związane było z adwekcją mas powietrza z południa. Należy zwrócić uwagę, że południowy kierunek adwekcji może być tutaj związany z wystąpieniem wiatru fenowego na obszarze Karpat Zachodnich.

Badania przedstawiające wpływ dynamiki PBL na stężenie zanieczyszczenia potwierdzają, że w warunkach konwekcyjnych (silnej turbulencji mechanicznej i termicznej) pionowy rozkład stężenia PM jest stały w profilu (Strbova i in., 2017; Wang i in., 2018; Li, Ma i in., 2019). Turbulencje mechaniczne mogą być spowodowane silnym uskokiem wiatru połączonym z wystąpieniem dolnotroposferycznego prądu strumieniowego (Li, Hu i in., 2019), falami górskimi (Zangl, 2003), skokiem hydraulicznym (Kishcha i in., 2016), wystąpieniem rotorów (Kunin i in., 2019) lub przejściem frontu atmosferycznego. W prezentowanych badaniach istotnym czynnikiem wpływającym na modyfikację profilu pionowego PM_{10} okazał się uskok wiatru. W przypadku badanego obszaru uskok wiatru powstaje na skutek oddziaływania topografii na mezoklimat badanego regionu. Wyniki badań przedstawione w (Sheridan, 2019) wskazują, że szerokość doliny jest istotnym parametrem wpływającym na interakcje między zastoiskiem chłodnego powietrza w dolinie a masami powietrza przemieszczającymi się nad nią.

Hipoteza H4 postawiona na początku badań mówiąca, że wystąpienie ścinania wiatru nad doliną przyczynia się do pogorszenia warunków aerosanitarnych poprzez modyfikację wysokości warstwy mieszania nie jest w pełni słuszna. Powyższe badania wskazały, że wystąpienie silnego ścinania wiatru może powodować wzrost wysokości warstwy mieszania (profil pionowy typu I), usuwanie zanieczyszczenia przy zaniku ruchów konwekcyjnych (profil pionowy typu II) ale również ograniczenie rozwoju warstwy mieszania poprzez separację mas powietrza w dolinie i ponad nią (ścinanie wiatru powyżej warstwy inwersyjnej).

Porównanie pomiarów meteorologicznych i poziomów stężeń PM_{10} w okresie trwania kampanii pomiarowej z obserwacjami z dwóch sezonów chłodnych, wskazało, że okres kampanii jest reprezentatywny dla przypadków charakteryzujących się słabą prędkością wiatru i podwyższonym stężeniem zanieczyszczenia w dolinie.

6.5. Publikacja A5

Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography

Oszacowanie roli cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu stężenia PM_{10} w obszarze miejskim w warunkach zróżnicowanej rzeźby terenu przy zastosowaniu techniki Random Forests

Publikacja A5 realizuje dwa cele szczegółowe przedłożonej rozprawy doktorskiej: (1) ilościową ocenę wpływu cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza w Krakowie opartą na długich, współczesnych seriach danych i ocenę możliwości ich zastosowania do prognozowania jakości powietrza w mieście oraz (2) wyznaczenie zależności pomiędzy poszczególnymi elementami pogody a poziomem zanieczyszczenia w mieście. **Wykonane badania umożliwiły weryfikację hipotezy H5, że metody uczenia maszynowego mogą być wykorzystane do prognozowania jakości powietrza dla obszarów o dużym zróżnicowaniu terenu.** Okres badań obejmował przedział od października 2000 r. do września 2020 r. Badania zrealizowano z zastosowaniem różnych wskaźników statystycznych, narzędzi meteorologii synoptycznej, metody uczenia maszynowego Random Forests i regresji wielorakiej. Należy wspomnieć, że w analizowanym okresie zaobserwowano znacząca tendencję spadkową poziomu stężenia PM_{10} i silne zróżnicowanie cyrkulacji atmosferycznej. W celu lepszego zrozumienia zależności między poziomem stężenia PM_{10} a zmiennością warunków meteorologicznych, w pracy zastosowano metodę Random Forests. Dane wejściowe dla modelu Random Forests i regresji wielorakiej obejmowały: (1) pomiary meteorologiczne ze stacji synoptycznej w Balicach; (2) pomiary jakości powietrza ze stacji na Al. Krasińskiego; (3) parametry meteorologiczne w dolnej troposferze

otrzymane z reanaliz ERA5; (4) typy cyrkulacji atmosferycznej według klasyfikacji Lityńskiego i Niedźwiedzia.

Wyniki i dyskusja

Okres badawczy zaprezentowany w **publikacji A5** został podzielony na dwa półrocza, półrocze ciepłe, trwające od kwietnia do września oraz półrocze chłodne, od października do marca. Podział okresu badawczego był podyktowany faktem, że wyróżnione podokresy różnią się znacząco między sobą poziomem emisji zanieczyszczeń pyłowych oraz warunkami meteorologicznymi które w znaczącym stopniu determinują poziom zanieczyszczenia przy gruncie. Autorzy są świadomi, że podział na dwa półrocza jest jednym z możliwych, posiada on pewne ograniczenia, należy jednak wspomnieć, że taka klasyfikacja była wykorzystywana przez inne grupy badawcze w dotychczasowych badaniach (Jaagus, 2006; Hyncica i Huth, 2019). W pierwszej kolejności została wykonana analiza zmienności stężenia PM_{10} w okresie wielolecia, określono liczbę dni z przekroczeniem poziomu 50, 100 i
200 $\mu g \cdot m^{-3}$ w poszczególnych półroczach oraz wyznaczono odsezonowany trend stężenia PM_{10} w całym wieloleciu. Uzyskane wyniki potwierdziły znaczącą poprawę jakości powietrza w Krakowie, zarówno w przypadku redukcji liczby dni z przekroczeniem określonego poziomu dla obu półroczy jak i ujemnego trendu odsezonowanego stężenia PM_{10} w wieloleciu. Analiza częstości występowania poszczególnych typów cyrkulacji z wykorzystaniem klasyfikacji Niedźwiedzia dla półroczy ciepłych i chłodnych wskazała na wystąpienie trendu malejącego liczby dni z sytuacjami antycyklonalnymi bezadwekcyjnymi w obu półroczach. Taka sytuacja związana była ze znaczącym spadkiem liczby dni, kiedy badany region znajdował się pod wpływem klina lub wału wyżowego.

Analiza statystyczna wpływu cyrkulacji na jakość powietrza została wykonana dla dwóch grup pomiarowych: (1) dni ze szczególnie wysokim stężeniem w odniesieniu do poziomu stężenia w danym półroczu oraz (2) dni charakteryzujących się znaczącym spadkiem stężenia zanieczyszczenia w porównaniu z dniem poprzedzającym.

Po wykonaniu dogłębnej analizy zebranych danych w **publikacji A5** zostały zaprezentowane tylko wyniki obejmujące półrocze chłodne, co związane było ze znacząco wyższymi poziomami stężenia PM_{10} w tym okresie w porównaniu z półroczem ciepłym. Wykorzystana została klasyfikacja Niedźwiedzia (w wersji 11 typów cyrkulacji). Jest ona zdefiniowana dla obszaru południowej Polski, podczas gdy klasyfikacja Lityńskiego reprezentuje obszar Europy Środkowej.

Badanie wpływu typów cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza pozwoliło na wyróżnienie dominujących typów cyrkulacji, podczas których albo prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia szczególnie wysokiego poziomu stężenia PM_{10}, albo prawdopodobieństwo wystąpienia znaczącej poprawy jakości powietrza w porównaniu z dniem poprzednim było najwyższe. Dni z wysokim stężeniem PM_{10} w półroczu chłodnym występowały najczęściej podczas adwekcji mas powietrza z sektora południowego (S–SW), w czasie antycyklonalnych sytuacji bezadwekcyjnych oraz sytuacji antycyklonalnych z adwekcją z sektora zachodniego (W–NW). Wyselekcjonowane okresy charakteryzowały się niższą prędkością wiatru i niższą temperaturą powietrza na 2 m n.p.g. a także większą stabilnością atmosfery w okresach dziennych i nocnych w porównaniu z dniami nieprzypisanymi do obu grup badawczych. Ponadto, w dniach o wysokim poziomie stężenia PM_{10} często obserwowane było lokalne minimum wilgotności względnej powietrza na poziomie 925 hPa. W przypadku wystąpienia adwekcji suchych mas powietrza, szczególnie częstych dla typów cyrkulacji S+SWa i W+NWa (według klasyfikacji Niedźwiedzia), następowało zwiększenie stabilności atmosfery w dolinie co powodowało wydłużenie czasu występowania zastoiska chłodnego powietrza. Należy tutaj wspomnieć, że wcześniejsze badania wskazywały, że dla typów cyrkulacji S+SWa i Ca+Ka występowanie mgły w Krakowie było najczęstsze, co potwierdza wystąpienie niekorzystnych warunków dyspersji zanieczyszczenia w dolinie (Bokwa i in., 2018). W przypadku dni charakteryzujących się znaczącą poprawą jakości powietrza w odniesieniu do warunków w dniu poprzednim wyróżniono dni z adwekcją z sektora W-NW (typ cyklonalny i antycyklonalny) oraz typ cyklonalny ze zróżnicowanym kierunkiem

adwekcji. Powyższe dni charakteryzowały się wyższą prędkością wiatru oraz większą liczbą dni z opadem atmosferycznym w porównaniu z dniami nie przypisanymi do obu grup.

Analiza wpływu cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza została poszerzona o wyniki modeli Random Forests i regresji wielorakiej. Do zbudowania modeli statystycznych zostały wykorzystane dwa zestawy danych różniące się rozdzielczością czasową parametrów meteorologicznych (średnie dobowe oraz pomiary z rozdzielczością sześciogodzinną). Zastosowanie danych meteorologicznych o rozdzielczości 6-godzinnej w porównaniu ze średnimi dobowymi do przewidywania dobowego stężenia PM_{10} i jego codziennych zmian wykazało podobne wyniki dla obu metod. Potwierdza to opinię, że wykorzystanie średnich dobowych parametrów meteorologicznych jest wystarczające do prognozowania dobowego stężenia PM_{10} w dniu kolejnym. Badania istotności zmiennych w prognozowaniu dobowych zmian poziomu stężenia PM_{10} z wykorzystaniem danych o rozdzielczości 6-godzinnej wykazały, że liczba kluczowych parametrów była znacząco mniejsza niż w przypadku przewidywania dobowego stężenia pyłu PM_{10} dla modelu Random Forests (27 ze 111 możliwych zmiennych). Wyniki modelu Random Forests zbudowanego w celu prognozowania dobowego stężenia PM_{10} z wykorzystaniem średnich dobowych posłużyły do określenia zależności między indywidualnymi parametrami meteorologicznym a prognozowanym poziomem stężenia PM_{10}. Oprócz parametrów, których istotny wpływ na jakość powietrza jest dobrze poznany (temperatura powietrza, prędkość wiatru na 10 m n.p.g. oraz gradient temperatury powietrza), kluczowymi czynnikami były również gradient względnej wilgotności powietrza i ścinanie wiatru w najniższej warstwie troposfery (warstwa między 975 a 925 hPa; Rycina 3 a w **publikacji A5**).

Badania dla okresów o różnej długości z wykorzystaniem pomiarów od października 2000 r. do września 2020 r. jednoznacznie wskazały, że wyniki uzyskane z modeli Random Forests były bardziej zgodne z obserwacjami niż prognozy otrzymane za pomocą modeli regresji wielorakiej co potwierdza słuszność hipotezy H5, że powyższa metoda jest bardziej skuteczna w prognozowaniu jakości powietrza. Badania wykonane z wykorzystaniem krótszych okresów do uczenia (okres badawczy 5 lat) dały lepsze wyniki, m.in. niższa wartość RMSE i mniejsze przeszacowanie stężenia PM_{10}, jednak w okresie wystąpienia epizodów smogowych poziom stężenia PM_{10} był niedoszacowany w porównaniu z prognozami wykorzystującymi dłuższy zbiór danych uczących (okres badawczy 20 lat). Analiza przebiegu czasowego prognozowanego stężenia PM_{10} wykazała, że model wieloraki w pewnych przypadkach przeszacował spadek stężenia PM_{10}, podczas gdy model Random Forests lepiej prognozował niskie stężenie PM_{10}.

Przeprowadzone badania jednoznacznie wykazały, że konieczne jest uwzględnienie informacji o zmienności typów cyrkulacji atmosferycznej w ciągu doby. Przypisanie tylko jednego typu cyrkulacji dla danego dnia nie pozwala na uwzględnienie dynamiki atmosfery w skali regionalnej, która jest szczególnie zmienna w Europie Środkowej w okresie chłodnym.

7. Podsumowanie i wnioski

Wyniki badań uzyskanych w ramach realizacji niniejszej pracy potwierdziły kluczowe znaczenie warunków pogodowych, tak o charakterze regionalnym jak i lokalnym, w kształtowaniu rozkładu czasowego i przestrzennego stężenia PM_{10} w obszarze zurbanizowanym, położonym we wklęsłej formie terenu, jaki stanowi aglomeracja krakowska. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że przedstawione wyniki badań stanowią kolejny przyczynek przedstawionego zagadnienia i nie wyczerpują jego zakresu z uwagi na bardzo złożony charakter. Pomimo faktu, że badania realizowane były w skali lokalnej, wyniki zaprezentowane w pracy mogą być przydatne w badaniach wpływu atmosfery na jakość powietrza w obszarach miast położonych w podobnej formie rzeźby terenu w strefie klimatu umiarkowanego.

Pierwsza część badań stanowiąca wprowadzenie do tematyki całego problemu dotyczyła czasowej zmienności i przestrzennego zróżnicowania występowania przygruntowej inwersji temperatury powietrza na terytorium Karpat Zachodnich. Wyniki tych badań zaprezentowane w **publikacji A1**

wskazały zbieżność prognoz temperatury powietrza dla różnych konfiguracji modeli numerycznych prognoz pogody systemu ALADIN-HIRLAM. Porównanie prognozowanej i obserwowanej temperatury powietrza wykazało dużą sprawdzalność prognoz operacyjnej wersji modelu AROME w miesiącach sezonu chłodnego w obszarze o dużym zróżnicowaniu rzeźby terenu. Ze względu na ten fakt, model AROME został wykorzystany w dalszych badaniach warunków atmosferycznych w skali lokalnej. Wyniki analiz wskazały, że w przypadku płytkich dolin prognozowana stabilna warstwa inwersyjna była znacząco słabsza w porównaniu z obserwacjami, z kolei dla obszarów, gdzie różnica wysokości między dnem doliny a szczytem wierzchowiny jest większa niż 500 m błąd prognozowanego gradientu temperatury nie przekraczał 1°C/100 m. Badania rozkładu prognozowanej temperatury powietrza na obszarze Karpat Zachodnich potwierdziły, że w okresie chłodnym w czasie wystąpienia bezadwekcyjnych warunków antycyklonalnych prognozowana minimalna temperatura powietrza w dolinach była przeszacowana, co spowodowane było niedoszacowaniem bardzo stabilnych warunków atmosferycznych w dnie doliny. W czasie trwania takich sytuacji synoptycznych, w dolinach formowały się zastoiska chłodnego powietrza wzmacniane przez spływy katabatyczne w nocy. W przypadku modeli numerycznych o rozdzielczości kilometrowej prognozowanie spływów katabatycznych stanowi trudność ze względu na skalę tego zjawiska. Zrealizowane badania umożliwiły weryfikację hipotezy **H1** mówiącej, że poprawa zmienności przestrzennej temperatury powietrza jest możliwa poprzez zmniejszenie rozdzielczości siatki obliczeniowej (mniejsze wymiary komórki elementarnej i większa liczba poziomów pionowych modelu). **Na podstawie uzyskanych wyników nie można potwierdzić słuszności zaproponowanej hipotezy.** Niestety problem reprezentacji stabilnej warstwy atmosfery w operacyjnych modelach numerycznych jest bardziej złożony i wymaga dalszych prac nad schematami turbulencji celem ich optymalizacji do zdefiniowanej siatki modelu.

Analiza warunków meteorologicznych oraz jakości powietrza towarzyszących wystąpieniu wiatru fenowego (halnego) w okresie chłodnym z wykorzystaniem stacjonarnych pomiarów naziemnych i numerycznych prognoz wysokiej rozdzielczości zostały zaprezentowane w **publikacji A2**. Badania jednoznacznie potwierdziły konieczność wykorzystania prognoz modeli numerycznych do szerszej analizy warunków meteorologicznych oraz ich wpływu na dyspersję zanieczyszczenia w dolinie. Należy wspomnieć, że takie podejście pozwala na uzyskanie wyników przydatnych w zarządzaniu poszczególnymi jednostkami administracyjnymi np. gminą, w tym zwłaszcza w planowaniu przestrzennym i polityce ochrony środowiska. Wyniki badań zaprezentowane w artykule stanowią uzupełnienie wiedzy dotyczącej wpływu wiatru fenowego na dynamikę miejskiej warstwy granicznej. Wyniki badań pozwoliły na wyróżnienie trzech rodzajów ruchów powietrza w czasie epizodów fenowych na obszarze Krakowa zależnych od lokalnych warunków atmosferycznych oraz charakterystyki fenu (intensywność zjawiska i kierunek przemieszczania powietrza): 1) przepływ powietrza nad doliną; 2) wniknięcie wiatru do doliny od wschodu lub południa; 3) oraz wystąpienie fal grawitacyjnych towarzyszących wiatrowi fenowemu. Badania jednoznacznie potwierdziły, że w przypadku Krakowa kluczowym czynnikiem modyfikującym warunki pogodowe w skali lokalnej jest rzeźba terenu. Lokalna topografia determinuje oddziaływanie wiatru fenowego na miejską warstwę graniczną powodując zarówno jej poprawę lub pogorszenie warunków dyspersji zanieczyszczenia w mieście. Model konceptualny zaprezentowany w pracy może być przydatny w badaniach dla innych miast położonych w podobnych formach rzeźby terenu jak Kraków, tj. w dużych dolinach położonych u podnóża pasm górskich, ze szczególnym uwzględnieniem dolin prostopadłych do kierunku wiatru fenowego. **Hipoteza H2, postawiona w pracy twierdząca, że adwekcja ciepłych mas powietrza z sektora południowego negatywnie wpływa na warunki dyspersji w Krakowie okazała się nie w pełni słuszna.**

Wyniki badań profilowania pionowego z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych zostały zaprezentowane w **publikacji A3**. Badania miały na celu doprecyzowanie metodyki opracowania danych pomiarowych oraz weryfikacji hipotezy **H3**, że bezzałogowe statki powietrze mogą być wykorzystane w miastach do profilowania miejskiej warstwy granicznej, dostarczając dodatkowych informacji o dynamice struktury pionowej atmosfery. **Publikacja A3** prezentuje metodykę opracowania danych w profilu pionowym uwzględniającą opóźnienie odpowiedzi czujnika na zmianę warunków otoczenia. Badania wykazały, że powyższa metoda posiada pewne ograniczenia

i może być wykorzystana jedynie, gdy profile pionowe parametrów meteorologicznych dla lotu wznoszącego i opadającego są podobne względem siebie. Badania jakości powietrza zaprezentowane w **publikacji A3** i również **A4** z wykorzystaniem nisko kosztowego czujnika do pomiaru stężenia PM_{10} potwierdziły możliwość wykorzystania go w badaniach jakości powietrza pod warunkiem zapewnienia niezaburzonego przepływu powietrza a także podgrzania wlotu powietrza celem uniknięcia błędu pomiaru dla warunków wysokiej wilgotności. Wyniki badań wskazały, że przy doborze czujników do profilowania pionowego atmosfery kluczowy jest czas odpowiedzi na zmianę warunków otoczenia. W celu zminimalizowania błędu związanego z czasem odpowiedzi została wykorzystana termopara do możliwie dokładnego pomiaru temperatury powietrza w profilu pionowym. Wykorzystanie wiatromierza sonicznego do pomiaru kierunku i prędkości wiatru w profilu pionowym za pomocą drona wskazało trudność pomiaru tych parametrów ze względu na znaczące wahania tego urządzenia w czasie lotu i zaburzenie pola magnetycznego wokół wiatromierza przez jego silniki (problem z wyznaczeniem kierunku wiatru). W ramach badań został skonstruowany oraz przetestowany system AirDust do pomiarów pionowych parametrów meteorologicznych i jakości powietrza. **Wyniki badań zaprezentowane w publikacji A3 potwierdziły słuszność hipotezy H3, że powyższa metoda może być wykorzystana jako dodatkowe źródło danych do badań dynamiki miejskiej warstwy granicznej a także stanowiły podstawę do realizacji dalszych badań w profilu pionowym atmosfery.**

Wyniki balonowej kampanii pomiarowej dla obszaru Krakowa zaprezentowane w **publikacji A4** umożliwiły identyfikację czynników atmosferycznych kształtujących dyspersję pionową zanieczyszczenia w zurbanizowanej dolinie. Ze względu na brak optymalnej metody do klasyfikacji struktury pionowej zanieczyszczenia otrzymanej w kampanii balonowej została zaproponowana własna metoda oparta na dopasowaniu krzywej sigmoidalnej do profilu pionowego stężenia PM_{10}. Metoda ta pozwala również na oszacowanie stężenia powyżej maksymalnej wysokości pomiaru dla wybranych przypadków. W ramach powyższych badań została zweryfikowana hipoteza **H4** mówiąca, że wystąpienie ścinania wiatru nad doliną przyczynia się do pogorszenia warunków aerosanitarnych poprzez modyfikację wysokości warstwy mieszania. Badania wykazały również, że wystąpienie silnego ścinania wiatru może powodować wzrost wysokości warstwy mieszania (profil pionowy typu I), usuwanie zanieczyszczenia przy zaniku ruchów konwekcyjnych (profil pionowy typu II) ale również ograniczenie rozwoju warstwy mieszania poprzez separację mas powietrza w dolinie i ponad nią (ścinanie wiatru powyżej warstwy inwersyjnej). **Na podstawie powyższych wyników badań stwierdzono, że hipoteza H4 nie jest w pełni słuszna.** Pomiary stężenia zanieczyszczenia zebrane w czasie kampanii pomiarowej mogą być wykorzystane do weryfikacji prognozowanego rozkładu przestrzennego zanieczyszczenia przez numeryczne modele dyspersji zanieczyszczenia. W świetle uzyskanych wyników, można stwierdzić, że kolejnym krokiem do lepszego poznania dyspersji zanieczyszczenia będą jedoczesne pomiary w profilu pionowym zanieczyszczenia w różnych częściach miasta w okresie epizodów smogowych w ciągu doby.

Publikacja A5 stanowiąca podsumowanie zrealizowanych badań miała na celu dokonanie ilościowej oceny wpływu cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza w Krakowie w okresie ostatniego wielolecia, kiedy obserwuje się mniejsze stężenia zanieczyszczeń niż w ubiegłych dekadach. Praca ta pozwoliła również na współczesne określenie możliwości zastosowania typów cyrkulacji do prognozowania jakości powietrza w mieście. Zrealizowane badania potwierdziły zgodność wyników z dotychczasowymi badaniami wpływu cyrkulacji na warunki aerosanitarne w Krakowie. Ze względu na dużą zmienność warunków meteorologicznych w okresie chłodnym dla poszczególnych typów cyrkulacji ich istotność w prognozowaniu wystąpienia epizodów smogowych jest niewielka. W celu wykonania szczegółowych analiz wpływu poszczególnych elementów pogody na jakość powietrza wykorzystano metodę uczenia maszynowego Random Forests, której wyniki porównano z modelem regresji wielorakiej. Wyniki badań pozwoliły na określenie zależności cząstkowej pomiędzy poszczególnymi elementami pogody a poziomem zanieczyszczenia w mieście. Badania zrealizowane z wykorzystaniem modelu Random Forests wskazały, że prócz parametrów, dobrze poznanych takich jak temperatura powietrza, prędkość wiatru na wysokości 10 m n.p.g. oraz gradient pionowy temperatury powietrza, kluczowymi czynnikami determinującymi poziom stężenia zanieczyszczenia PM_{10} są gradient pionowy względnej wilgotności powietrza oraz zjawisko ścinania wiatru w dolinie.

Badania wskazały, że w przypadku, gdy ścinanie wiatru związane jest ze wzrostem prędkości wiatru w profilu pionowym następuje poprawa warunków aerosanitarnych, natomiast gdy jest ona związana z nagłą zmianą kierunku wiatru nad doliną występuje pogorszenie warunków aerosanitarnych w mieście. Porównanie wyników prognoz stężenia PM_{10} metody Random Forests z wykorzystaniem danych meteorologicznych o różnej rozdzielczości czasowej potwierdziło słuszność wykorzystania średnich dobowych do prognozowania stężenia zanieczyszczenia w dniu kolejnym. **Ponadto została pozytywnie zweryfikowana hipoteza H5 mówiąca, że metody uczenia maszynowego mogą być wykorzystane do prognozowania jakości powietrza dla obszarów o dużym zróżnicowaniu terenu**. Ze względu na fakt, że badania zostały wykonane dla rozdzielczości dobowej planowane są dalsze analizy o rozdzielczości godzinowej uwzględniając zróżnicowanie przestrzenne stężenia zanieczyszczenia PM_{10} w Krakowie.

Reasumując, wyniki badań uzyskane w niniejszej rozprawie pozwoliły na nowe spojrzenie na zagadnienie zanieczyszczenia atmosfery w obszarze zurbanizowanym o zróżnicowanej rzeźbie terenu. W pracy uwzględniono najnowsze dane, które obejmują ostatni okres charakteryzujący się nieco mniejszymi wartościami stężeń PM_{10} w Krakowie niż w poprzednich dekadach. Należy tu jednak podkreślić, że pomimo tego, w badanym okresie 2000-2021 również stwierdzono wiele epizodów z wysokimi stężeniami zanieczyszczeń świadczącymi o aktualności rozpatrywanej problematyki.

Uwzględnienie wielu rodzajów danych meteorologicznych, środowiskowych i modelowych a także zastosowanie nowych metod i technik badawczych pozwoliło na sformułowanie nie udokumentowanych stwierdzeń.

Za najważniejsze należy uznać następujące:

a) zwiększenie rozdzielczości przestrzennej siatki modelu numerycznego nie jest wystarczające do lepszego odwzorowania warunków stabilnej atmosfery w obszarze o dużym zróżnicowaniu topograficznym,
b) wpływ wiatru halnego na poziom stężenia zanieczyszczenia nie jest jednoznaczny i zależy od struktury atmosfery oraz dynamiki tego zjawiska,
c) zastosowanie wielowirnikowych bezzałogowych statków powietrznych umożliwia dokładne profilowanie atmosfery miejskiej warstwy granicznej,
d) wpływ pionowego ścinania wiatru na strukturę pionową zanieczyszczenia powietrza nie jest jednoznaczny i zależy od warunków atmosferycznych i dynamiki tego zjawiska,
e) wpływ lokalnej rzeźby terenu na dynamikę miejskiej warstwy granicznej na obszarze aglomeracji krakowskiej jest bezsprzeczny co zostało wielokrotnie potwierdzone w skali mikroklimatycznej,
f) wpływ wybranych typów cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza w Krakowie został jednoznacznie potwierdzony, choć zaznaczają się pewne różnice w stosunku do wcześniejszego stanu badań,
g) zastosowanie metod uczenia maszynowego pozwala na znaczącą poprawę dokładności oceny jakości powietrza w warunkach zróżnicowanej rzeźby i zagospodarowania terenu.

Jak wspomniano na początku niniejszego podsumowania, mimo uzyskania wielu nowych istotnych treści, liczne aspekty dotyczące zależności zanieczyszczenia powietrza od warunków atmosferycznych wciąż nie doczekały się pełnego wyjaśnienia i potwierdzenia. Analizując jednak postęp techniczny i metodyczny można przypuszczać, że w najbliższych latach dzięki jeszcze lepszej rozdzielczości modeli wspartych nowymi urządzeniami pomiarowymi oraz nowymi metodami badawczymi np. szerszym wykorzystaniem uczenia maszynowego uda się wyjaśnić kolejne nierozwiązane zagadnienia.

Reasumując, można stwierdzić, że choć wszystkie badania zostały przeprowadzone na przykładzie Krakowa, dużej aglomeracji miejskiej zlokalizowanej w znaczącym stopniu w dnie doliny Wisły, to ich wyniki można odnieść do obszarów podobnie uwarunkowanych geograficznie i urbanistycznie nie tylko w Polsce. Oczywiście wyniki te muszą być poprzedzone wnikliwym rozpoznaniem lokalnych warunków meteorologicznych oraz środowiskowych tych obszarów uwzględniającym zarówno wszystkie podobieństwa jak i różnice.

Bibliografia

Abbassi Y., Ahmadikia H., Baniasadi E. (2020). Prediction of pollution dispersion under urban heat island circulation for different stratification. *Building and Environment, 168*. *https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106374*

Achberger C., Barring L. (1999). Correction of surface air temperature measurements from a mobile platform. *Agricultural and Forest Meteorology, 98-99*, 227 - 238. *https://doi.org/ 10.1016/S0168-1923(99)00099-4*

Adetona O., Reinhardt T. E., Domitrovich J., Broyles G., Adetona A. M., Kleinman M. T. i in. (2016). Review of the health effects of wildland fire smoke on wildland firefighters and the public. *Inhalation Toxicology, 28*(3), 95-139. *https://doi.org/10.3109/08958378.2016.1145771*

Akaike H. (1998). Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In E. Parzen, K. Tanabe, & G. Kitagawa (Eds.), *Selected Papers of Hirotugu Akaike. Springer Series in Statistics*. New York: Springer.

Almeida S. M., Manousakas M., Diapouli E., Kertesz Z., Samek L., Hristova E. i in. (2020). Ambient particulate matter source apportionment using receptor modelling in European and Central Asia urban areas. *Environmental Pollution, 266*. *https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115199*

AlThuwaynee O. F., Kim S. W., Najemaden M. A., Aydda A., Balogun A. L., Fayyadh M. M., Park H. J. (2021). Demystifying uncertainty in PM10 susceptibility mapping using variable drop-off in extreme-gradient boosting (XGB) and random forest (RF) algorithms. *Environmental Science and Pollution Research, 28*(32), 43544-43566. *https://doi.org/10.1007/s11356-021-13255-4*

Alvarez C. A., Carbajal N. (2019). Regions of influence and environmental effects of Santa Ana wind event. *Air Quality Atmosphere and Health, 12*(9), 1019-1034. *https://doi.org/10.1007/s11869-019-00719-3*

Amato F., Cassee F. R., van der Gon, H., Gehrig R., Gustafsson M., Hafner W. i in. (2014). Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions. *Journal of Hazardous Materials, 275*, 31-36. *https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.053*

Amodei M., Sanchez I., Stein J. (2015). Verification of the French operational high-resolution model AROME with the regional Brier probability score. *Meteorological Applications, 22*(4), 731-745. *https://doi.org/10.1002/met.1510*

Barlow J. F. (2014). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate, 10*, 216-240. *https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.011*

Bartyzel J., Chmura Ł., Gałkowski M., Zimnoch M., Różański K. (2016). *Mobilne pomiary stężeń pyłów zawieszonych w obrębie Krakowa, Podhala oraz Górnego Śląska*. [dostęp 12 marca 2021] https://polskialarmsmogowy.pl/files/artykuly/569.pdf

Beck C., Philipp A. (2010). Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain. *Physics and Chemistry of the Earth, 35*(9-12), 374-387. *https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.01.001*

Benard P., Vivoda J., Masek J., Smolikova P., Yessad K., Smith C. i in. (2010). Dynamical kernel of the Aladin-NH spectral limited-area model: Revised formulation and sensitivity experiments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136*(646), 155-169. *https://doi.org/10.1002/qj.522*

Biggart M., Stocker J., Doherty R. M., Wild O., Hollaway M., Carruthers D. i in. (2020). Street-scale air quality modelling for Beijing during a winter 2016 measurement campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics, 20*(5), 2755-2780. *https://doi.org/10.5194/acp-20-2755-2020*

Billings B. J., Grubisic V., Borys R. D. (2006). Maintenance of a mountain valley cold pool: A numerical study. *Monthly Weather Review, 134*(8), 2266-2278. *https://doi.org/10.1175/mwr3180.1*

Bochenek B., Sekuła P., Jerczyński M., Kolonko M., Szczęch-Gajewska M., Woyciechowska J., Stachura G. (2020). ALADIN in Poland. *30th ALADIN Wk & HIRLAM ASM 2020, Lublana* [dostęp 12 maj 2020] http://www.umr-cnrm.fr/aladin/IMG/pdf/poster_poland.pdf

Bokwa A. (2007). Zanieczyszczenie powietrza. In M. D. (Ed.), *Klimat Krakowa w XX wieku*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, 187-199, Kraków [dostęp 12 kwietnia 2021] http://denali.geo.uj.edu.pl/publikacje,000112?&page=Klimatologia

Bokwa A. (2010). *Wieloletnie zmiany struktury mezoklimatu miasta na przykładzie Krakowa.* IGiGP UJ, Kraków [dostęp 1 marca 2021] http://denali.geo.uj.edu.pl/publikacje,000155?&page=Klimatologia

Bokwa, A. (2011). Influence of air temperature inversions on the air pollution dispersion conditions in Krakow. *Prace Geograficzne IGiGP UJ, 126*, 41-51.

Bokwa A., Wypych A., Hajto M. J. (2018). Impact of Natural and Anthropogenic Factors on Fog Frequency and Variability in Krakow, Poland in the Years 1966-2015. *Aerosol and Air Quality Research, 18*(1), 165-177. *https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.12.0580*

Burnett R. T., Pope C. A., Ezzati M., Olives C., Lim S. S., Mehta S., i in. (2014). An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure. *Environmental Health Perspectives, 122*(4), 397-403. *https://doi.org/10.1289/ehp.1307049*

Butwin M. K., von Lowis S., Pfeffer M. A., Thorsteinsson T. (2019). The effects of volcanic eruptions on the frequency of particulate matter suspension events in Iceland. *Journal of Aerosol Science, 128*, 99-113. *https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.12.004*

Castorina G., Caccamo M. T., Colombo F., Magazu S. (2021). The Role of Physical Parameterizations on the Numerical Weather Prediction: Impact of Different Cumulus Schemes on Weather Forecasting on Complex Orographic Areas. *Atmosphere, 12*(5). *https://doi.org/10.3390/atmos12050616*

Cetti C., Buzzi B., Sprenger M. (2015). *Climatology of Alpine north foehn*. Scientific Report MeteoSwiss, 100, 76 [dostęp 1 marca 2021] https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwie6-vph6f3AhUmif0HHcagDswQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.meteosuisse.admin.ch%2Fcontent%2Fdam%2Fmeteoswiss%2Fen%2Fservice-und-publikationen%2Fpublikationen%2Fdoc%2FSR_Cetti.pdf%3Ftopic%3D%2Fcontent%2Fmeteoswiss%2Ftags%2Ftopics%2Fforschung-und-zusammenarbeit%2Fpublication%2Fscientific-reports&usg=AOvVaw3pQEHg445xSalhxW4yM9r1

Chen Y., Ludwig F. L., Street R. L. (2004). Stably stratified flows near a notched transverse ridge across the Salt Lake valley. *Journal of Applied Meteorology, 43*(9), 1308-1328. *https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<1308:ssfnan>2.0.co;2*

Chilinski M. T., Markowicz K. M., Kubicki M. (2018). UAS as a Support for Atmospheric Aerosols Research: Case Study. *Pure and Applied Geophysics, 175*(9), 3325-3342. *https://doi.org/10.1007/s00024-018-1767-3*

Corsmeier U., Kossmann M., Kalthoff N., Sturman A. (2006). Temporal evolution of winter smog within a nocturnal boundary layer at Christchurch, New Zealand. *Meteorology and Atmospheric Physics, 91*(1-4), 129-148. *https://doi.org/10.1007/s00703-005-0111-5*

Crazzolara C., Ebner M., Platis A., Miranda T., Bange J., Junginger A. (2019). A new multicopter-based unmanned aerial system for pollen and spores collection in the atmospheric boundary layer. *Atmospheric Measurement Techniques, 12*(3), 1581-1598. *https://doi.org/10.5194/amt-12-1581-2019*

Czarnecka M., Nidzgorska-Lencewicz J. (2011). Impact of weather conditions on winter and summer air quality. *Int. Agrophys., 25*, 7-12.

Czernecki B., Marosz M., Jedruszkiewicz J. (2021). Assessment of Machine Learning Algorithms in Short-term Forecasting of PM10 and PM2.5 Concentrations in Selected Polish Agglomerations. *Aerosol and Air Quality Research, 21*(7). *https://doi.org/10.4209/aaqr.200586*

Degenhardt F., Seifert S., Szymczak S. (2019). Evaluation of variable selection methods for random forests and omics data sets. *Briefings in Bioinformatics, 20*(2), 492-503. *https://doi.org/10.1093/bib/bbx124*

Drechsel S., Mayr G. J. (2008). Objective forecasting of foehn winds for a subgrid-scale alpine valley. *Weather and Forecasting, 23*(2), 205-218. *https://doi.org/10.1175/2007waf2006021.1*

Drobinski P., Steinacker R., Richner H., Baumann-Stanzer K., Beffrey G., Benech B. i in. (2007). Foehn in the Rhine Valley during MAP: A review of its multiscale dynamics in complex valley geometry. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133*(625), 897-916. *https://doi.org/10.1002/qj.70*

Elvidge A. D., Renfrew I. A., King J. C., Orr A., Lachlan-Cope T. A. (2016). Foehn warming distributions in nonlinear and linear flow regimes: a focus on the Antarctic Peninsula. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142*(695), 618-631. *https://doi.org/10.1002/qj.2489*

EEA (2020). Air quality in Europe – 2020 report [dostęp 13 październik 2021] https://www.eea.europa.eu//publications/air-quality-in-europe-2020-report

EEA (2021). European Union emission inventory report 1990-2019 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention) [dostęp 12 luty 2022] https://www.eea.europa.eu/publications/lrtap-1990-2019

EEA (2021a). Urban population exposure to air pollution by particulate matter [dostęp 15 październik 2021] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_rn210/default/table?lang=en&page=PM10

EEA (2022). Annual AQ statistics [dostęp 11 stycznia 2022] https://discomap.eea.europa.eu/App/AirQualityStatistics/index.html

Fedorovich E., Conzemius R. (2008). Effects of wind shear on the atmospheric convective boundary layer structure and evolution. *Acta Geophysica, 56*(1), 114-141. *https://doi.org/10.2478/s11600-007-0040-4*

Fernandez-Gonzalez S., Martin M. L., Garcia-Ortega E., Merino A., Lorenzana J., Sanchez J. L. I in. (2018). Sensitivity Analysis of the WRF Model: Wind-Resource Assessment for Complex Terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57*(3), 733-753. *https://doi.org/10.1175/jamc-d-17-0121.1*

Ferrero L., Riccio A., Ferrini B. S., D'Angelo L., Rovelli G., Casati M. i in. (2019). Satellite AOD conversion into ground PM10, PM2.5 and PM1 over the Po valley (Milan, Italy) exploiting information on aerosol vertical profiles, chemistry, hygroscopicity and meteorology. *Atmospheric Pollution Research, 10*(6), 1895-1912. *https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.08.003*

Flamant C., Drobinski P., Furger M., Chimani B., Tschannett S., Steinacker R. i in. (2006). Fohn/cold-pool interactions in the Rhine valley during MAP IOP 15. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 132*(621), 3035-3058. *https://doi.org/10.1256/qj.06.36*

Franchini M., Mannucci P. M. (2007). Short-term effects of air pollution on cardiovascular diseases: outcomes and mechanisms. *Journal of Thrombosis and Haemostasis, 5*(11), 2169-2174. *https://doi.org/10.1111/j.1538-7836.2007.02750.x*

Franchini M., Mannucci, P. M. (2011). Thrombogenicity and cardiovascular effects of ambient air pollution. *Blood, 118*(9), 2405-2412. *https://doi.org/10.1182/blood-2011-04-343111*

Gabryelewicz I., Stryjski R., Wędrychowicz M., Dąbrowski T. (2020). The State of the Air Quality in Poland. *Rocznik Ochrona Środowiska, 22*, 998-1013.

Gariazzo C., Carlino G., Silibello C., Renzi M., Finardi S., Pepe N. i in. (2020). A multi -city air pollution population exposure study: Combined use of chemical -transport and random -Forest models with dynamic population data. *Science of the Total Environment, 724*. *https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138102*

Garrido-Perez J. M., Ordonez C., Garcia-Herrera R., Barriopedro D. (2018). Air stagnation in Europe: Spatiotemporal variability and impact on air quality. *Science of the Total Environment, 645*, 1238-1252. *https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.238*

Giovannini L., Ferrero E., Karl T., Rotach M. W., Staquet C., Castelli S. T., Zardi D. (2020). Atmospheric Pollutant Dispersion over Complex Terrain: Challenges and Needs for Improving Air Quality

Measurements and Modeling. *Atmosphere, 11*(6), 32. *https://doi.org/10.3390/atmos11060646*

Godłowska, J. (2019). *Wpływ warunków meteorologicznych na jakość powietrza w Krakowie. Badania porównawcze i próba podejścia modelowego.* IMGW-PIB, Warszawa [dostęp 11 marca 2021] https://www.imgw.pl/sites/default/files/2019-12/wplyw-warunkow-meteorologicznych-na-jakosc-powietrza-w-krakowie.pdf

Gohm A., Mayr G. J. (2004). Hydraulic aspects of fohn winds in an Alpine valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 130*(597), 449-480. *https://doi.org/10.1256/qj.03.28*

Grange S. K., Carslaw D. C., Lewis A. C., Boleti E., Hueglin C. (2018). Random forest meteorological normalisation models for Swiss PM10 trend analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics, 18*(9), 6223-6239. *https://doi.org/10.5194/acp-18-6223-2018*

Green M. C., Chow J. C., Watson J. G., Dick K., Inouye D. (2015). Effects of Snow Cover and Atmospheric Stability on Winter PM2.5 Concentrations in Western U.S. Valleys. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54*(6), 1191-1201. *https://doi.org/10.1175/jamc-d-14-0191.1*

Grimmond C. S. B., Roth M., Oke T. R., Au Y. C., Best M., Betts R. i in. (2010). Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). *World Climate Conference - 3, 1*, 247-274. *https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.016*

GIOŚ (2020). Stan środowiska w województwie Małopolskim. Raport 2020. [dostęp 12 czerwca 2021] https://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/raporty/stan_srodowiska_2020_malopolskie.pdf

Han S. Q., Hao T. Y., Zhang Y. F., Liu J. L., Li P. Y., Cai Z. Y. i in. (2018). Vertical observation and analysis on rapid formation and evolutionary mechanisms of a prolonged haze episode over central-eastern China. *Science of the Total Environment, 616*, 135-146. *https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.278*

Hann J. (1901). *Lehrbuch der Meteorologie (1st edition), Leipzig: Verlag C. H. Tauchnitz*.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horanyi A., Munoz-Sabater J. i in. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146*(730), 1999-2049. *https://doi.org/10.1002/qj.3803*

Hertwig D., Grimmond S., Kotthaus S., Vanderwel C., Gough H., Haeffelin M., Robins A. (2021). Variability of physical meteorology in urban areas at different scales: implications for air quality. *Faraday Discussions, 226*, 149-172. *https://doi.org/10.1039/d0fd00098a*

Hess M. (1965). Piętra klimatyczne w polskich Karpatach Zachodnich. *Zesz. Nauk. UJ Pr. Geogr., 105*(11), 105.

Hu X. F., Belle J. H., Meng X., Wildani A., Waller L. A., Strickland M. J., Liu Y. (2017). Estimating PM2.5 Concentrations in the Conterminous United States Using the Random Forest Approach. *Environmental Science & Technology, 51*(12), 6936-6944. *https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01210*

Huth R., Beck C., Philipp A., Demuzere M., Ustrnul Z., Cahynova M. i in. (2008). Classifications of Atmospheric Circulation Patterns Recent Advances and Applications. *Trends and Directions in Climate Research, 1146*, 105-152. *https://doi.org/10.1196/annals.1446.019*

Hyncica M., Huth R. (2019). Long-term changes in precipitation phase in Europe in cold half year. *Atmospheric Research, 227*, 79-88. *https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.04.032*

Jaagus J. (2006). Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology, 83*(1-4), 77-88. *https://doi.org/10.1007/s00704-005-0161-0*

Jeong S. J. (2013). The Impact of Air Pollution on Human Health in Suwon City. *Asian Journal of Atmospheric Environment, 7-4*, 227-233. *https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.4.227*

Joachim R., Pascal B., Muller J. M., Stephanie M. (2009). The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research. Meteorologische Zeitschrift, 18, 141-147. *https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/0363*

Joharestani M. Z., Cao C. X., Ni X. L., Bashir B., Talebiesfandarani S. (2019). PM2.5 Prediction Based on Random Forest, XGBoost, and Deep Learning Using Multisource Remote Sensing Data. *Atmosphere, 10*(7). *https://doi.org/10.3390/atmos10070373*

John F., Sanford W. (2018). Nonparametric Regression in R. In *An Appendix to: An R Companion to Applied Regression* (third edition ed.) [dostęp 11 marca 2021] https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/appendices/Appendix-Nonparametric-Regression.pdf

Jonassen M. (2008). *The small unmanned meteorological observer (SUMO): Characterization and test of a new measurement system for atmospheric boundary layer research.* University of Bergen, Bergen, Norwegia [dostęp 11 marca 2022] https://w2.uib.no/filearchive/master_jonassen.pdf

Juda-Rezler K., Reizer M., Oudinet J. P. (2011). Determination and analysis of PM10 source apportionment during episodes of air pollution in Central Eastern European urban areas: The case of wintertime 2006. *Atmospheric Environment, 45*(36), 6557-6566. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.020*

Ketterer C. (2011). *Investigation of the planetary boundary layer using remote sensing and in-situ measurements at the Kleine Scheidegg and at the Jungfraujoch.* University of Bern, Brno, Szwajcaria [dostęp 1 luty 2021] https://occrdata.unibe.ch/students/theses/msc/75.pdf

Kishcha P., Starobinets B., Alpert P. (2016). *Modeling of Foehn-Induced Extreme Local Dust Pollution in the Dead Sea Valley.* Paper presented at the 35th International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application (ITM), Chania, GREECE.

Kunin P., Alpert P., Rostkier-Edelstein D. (2019). Investigation of sea-breeze/foehn in the Dead Sea valley employing high resolution WRF and observations. *Atmospheric Research, 229*, 240-254. *https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.06.012*

Kunz M., Lavric J. V., Gerbig C., Tans P., Neff D., Hummelgard C. i in. (2018). COCAP: a carbon dioxide analyser for small unmanned aircraft systems. *Atmospheric Measurement Techniques, 11*(3), 1833-1849. *https://doi.org/10.5194/amt-11-1833-2018*

Lamb H. H. (1972). *British Isles weather types and a register of the daily sequence of circulation patterns 1861-1971.* Geophysical memoirs.

Lehner M., Rotach M. W. (2018). Current Challenges in Understanding and Predicting Transport and Exchange in the Atmosphere over Mountainous Terrain. *Atmosphere, 9*(7). *https://doi.org/10.3390/atmos9070276*

Leśniok M., Małarzewski Ł., Niedźwiedź T. (2010). Classification of circulation types for Southern Poland with an application to air pollution concentration in Upper Silesia. *Physics and Chemistry of the Earth, 35*(9-12), 516-522. *https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.11.006*

Leuenberger D., Haefele A., Omanovic N., Fengler M., Martucci G., Calpini B. i in. (2020). Improving High-Impact Numerical Weather Prediction with Lidar and Drone Observations. *Bulletin of the American Meteorological Society, 101*, E1036-E1051. *https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0119.1*

Lewińska J., Bartosik J., Baścik J., Czerwieniec M., Zgud K. (1982). Wpływ miasta na klimat lokalny (na przykładzie aglomeracji krakowskiej). *Instytut Kształtowania Środowiska*, 1-162.

Li J. W., Han Z. W. (2016). Aerosol vertical distribution over east China from RIEMS-Chem simulation in comparison with CALIPSO measurements. *Atmospheric Environment, 143*, 177-189. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.045*

Li X., Xia X., Wang L., Cai R., Zhao L., Feng Z. i in. (2015). The role of foehn in the formation of heavy air pollution events in Urumqi, China. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 120*(11), 5371-5384. *https://doi.org/10.1002/2014jd022778*

Li X., Xia X. G., Xin Y., Ma Y. F., Yang J., Li J. L., Yang X. H. (2012). An examination of boundary layer structure under the influence of the gap winds in Urumqi, China, during air pollution episode in winter. *Journal of the Air & Waste Management Association, 62*(1), 26-37. *https://doi.org/10.1080/10473289.2011.617628*

Li X. L., Hu X. M., Ma Y. J., Wang Y. F., Li L. G., Zhao Z. Q. (2019). Impact of planetary boundary layer structure on the formation and evolution of air-pollution episodes in Shenyang, Northeast China. *Atmospheric Environment, 214*, 11. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116850*

Li X. L., Ma Y. J., Wei W., Zhang Y. H., Liu N. W., Hong Y., Wang Y. (2019). Vertical Distribution of Particulate Matter and its Relationship with Planetary Boundary Layer Structure in Shenyang, Northeast China. *Aerosol and Air Quality Research, 19*(11), 2464-2476. *https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.06.0311*

Li X. L., Wang Y. F., Shen L. D., Zhang H. S., Zhao H. J., Zhang Y. H., Ma Y. J. (2018). Characteristics of Boundary Layer Structure during a Persistent Haze Event in the Central Liaoning City Cluster, Northeast China. *Journal of Meteorological Research, 32*(2), 302-312. *https://doi.org/10.1007/s13351-018-7053-6*

Li Y., Zhang J. C., Sailor D. J., Ban-Weiss G. A. (2019). Effects of urbanization on regional meteorology and air quality in Southern California. *Atmospheric Chemistry and Physics, 19*(7), 4439-4457. *https://doi.org/10.5194/acp-19-4439-2019*

Lityński J. (1969). Liczbowa klasyfikacja typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski. *Prace PHIM, 97*, 3-14.

Łupikasza E. B., Niedźwiedź T. (2022). Relationships between Vertical Temperature Gradients and PM10 Concentrations during Selected Weather Conditions in Upper Silesia (Southern Poland). *Atmosphere, 13*. *https://doi.org/10.3390/atmos13010125*

Maricq M. M. (2007). Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review. *Journal of Aerosol Science, 38*(11), 1079-1118. *https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.08.001*

Markowicz K. M., Stachlewska I. S., Zawadzka-Manko O., Wang D. X., Kumala W., Chilinski M. T. i in. (2021). A Decade of Poland-AOD Aerosol Research Network Observations. *Atmosphere, 12*(12). *https://doi.org/10.3390/atmos12121583*

Marynowski L., Łupikasza E., Dąbrowska-Zapart K., Małarzewski Ł., Niedźwiedź T., Simoneit B. R. T. (2020). Seasonal and vertical variability of saccharides and other organic tracers of PM10 in relation to weather conditions in an urban environment of Upper Silesia, Poland. *Atmospheric Environment, 242*, 117849. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117849*

McKinney K. A., Wang D., Ye J. H., de Fouchier J. B., Guimaraes P. C., Batista C. E. i in. (2019). A sampler for atmospheric volatile organic compounds by copter unmanned aerial vehicles. *Atmospheric Measurement Techniques, 12*(6), 3123-3135. *https://doi.org/10.5194/amt-12-3123-2019*

Miloshevich L. M., Paukkunen A., Vömel H., Oltmans S. J. (2004). Development and Validation of a Time-Lag Correction for Vaisala Radiosonde Humidity Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 21*(9), 1305-1327. *https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<1305:davoat>2.0.co;2*

Mira-Salama D., Van Dingenen R., Gruening C., Putaud J. P., Cavalli F., Cavalli P. i in. (2008). Using Fohn conditions to characterize urban and regional sources of particles. *Atmospheric Research, 90*(2-4), 159-169. *https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.02.007*

Morawska-Horawska M. (1978). Struktura termiczna dolnej części troposfery i jej wpływ na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie. *Człowiek i Środowisko, 2*, 61-85.

Munoz R. C., Corral M. J. (2017). Surface Indices of Wind, Stability, and Turbulence at a Highly Polluted Urban Site in Santiago, Chile, and their Relationship with Nocturnal Particulate Matter Concentrations. *Aerosol and Air Quality Research, 17*(11), 2780-2790. *https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.05.0190*

Murthy B. S., Latha R., Tiwari A., Rathod A., Singh S., Beig G. (2020). Impact of mixing layer height on air quality in winter. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 197*. *https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105157*

Nidzgorska-Lencewicz J., Czarnecka M. (2015). Winter weather conditions vs. air quality in Tricity, Poland. *Theoretical and Applied Climatology, 119*(3-4), 611-627. *https://doi.org/10.1007/s00704-014-1129-8*

Niedźwiedź, T. (2017). Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej — zbiór komputerowy. Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec [dostęp 12 stycznia 2021] *http://www.kk.wnoz.us.edu.pl/nauka/kalendarz-typow-cyrkulacji/*

Niedźwiedź T., Olecki Z. (1994). Wpływ sytuacji synoptycznych na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie. *Zesz. Nauk UJ, Pr. Geogr., 96*, 55-68.

Niedźwiedź T., Olecki Z. (1995). The variability of air pollution in Cracow. In K. Kłysik (Ed.), *Klimat i Bioklimat Miast (red. K. Kłysik), Wyd. Uniw. Łódzkiego*, 205-212.

Niedźwiedź T., Ustrnul Z. (2021). Change of Atmospheric Circulation. In M. Falarz (Ed.), *Climate Change in Poland*: Springer, Cham. *https://doi.org/10.1007/978-3-030-70328-8_6*

Nowosad M. (2017). Variability of the zonal circulation index over Central Europe according to the Lityński method. *Geographia Polonica, 90*(4), 417-430. *https://doi.org/10.7163/GPol.0111*

Oke T., Mills G., Christen A., Voogt J. A. (2017). Urban Climates. *Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781139016476*

Oleniacz R., Bogacki M., Szulecka A., Rzeszutek M., Mazur M. (2016). Assessing the impact of wind speed and mixing-layer height on air quality in Krakow (Poland) in the years 2014-2015. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, 33*, 315-342. *https://doi.org/10.7862/rb.2016.168*

Ormanova G., Karaca F., Kononova N. (2020). Analysis of the impacts of atmospheric circulation patterns on the regional air quality over the geographical center of the Eurasian continent. *Atmospheric Research, 237*. *https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104858*

Ortiz-Amezcua P., Guerrero-Rascado J. L., Granados-Munoz M. J., Benavent-Oltra J. A., Bockmann C., Samaras S. i in. (2017). Microphysical characterization of long-range transported biomass burning particles from North America at three EARLINET stations. *Atmospheric Chemistry and Physics, 17*(9), 5931-5946. *https://doi.org/10.5194/acp-17-5931-2017*

Palarz A., Celinski-Myslaw D., Ustrnul Z. (2018). Temporal and spatial variability of surface-based inversions over Europe based on ERA-Interim reanalysis. *International Journal of Climatology, 38*(1), 158-168. *https://doi.org/10.1002/joc.5167*

Palarz A., Celiński-Mysław, D. (2017). The effect of temperature inversions on the particulate matter PM10 and sulfur dioxide concentrations in selected basins in the Polish Carpathians. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 12*, 629-640.

Pardyjak E. R., Stoll R. (2017). Improving measurement technology for the design of sustainable cities. *Measurement Science and Technology, 28*(9), 16. *https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa7c77*

Pearce J. L., Beringer J., Nicholls N., Hyndman R. J., Tapper N. J. (2011). Quantifying the influence of local meteorology on air quality using generalized additive models. *Atmospheric Environment, 45*(6), 1328-1336. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.051*

Pernigotti D., Belis C. A., Spano L. (2016). SPECIEUROPE: The European data base for PM source profiles. *Atmospheric Pollution Research, 7*(2), 307-314. *https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.007*

Philipp A., Bartholy J., Beck C., Erpicum M., Esteban P., Fettweis X. i in. (2010). Cost733cat-A database of weather and circulation type classifications. *Physics and Chemistry of the Earth, 35*(9-12), 360-373. *https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.12.010*

Pianko-Kluczynska K. (2007). Nowy kalendarz typów cyrkulacji atmosfery według J. Lityńskiego. *Wiadomości Meteorologii, Hydrologii, Gospodarki Wodnej, 1*, 65-85.

Posyniak M. A., Markowicz K. M., Czyzewska D., Chilinski M. T., Makuch P., Zawadzka-Manko O. i in. (2021). Experimental study of smog microphysical and optical vertical structure in the Silesian Beskids, Poland. *Atmospheric Pollution Research, 12*(9). *https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101171*

Renard J. B., Michoud V., Giacomoni J. (2020). Vertical Profiles of Pollution Particle Concentrations in the Boundary Layer above Paris (France) from the Optical Aerosol Counter LOAC Onboard a Touristic Balloon. *Sensors, 20*(4). *https://doi.org/10.3390/s20041111*

Rodier Q., Masson V., Couvreux F., Paci A. (2017). Evaluation of a Buoyancy and Shear Based Mixing Length for a Turbulence Scheme. *Frontiers in Earth Science, 5*, 17. *https://doi.org/10.3389/feart.2017.00065*

Samad A., Vogt U., Panta A., Uprety, D. (2020). Vertical distribution of particulate matter, black carbon and ultra-fine particles in Stuttgart, Germany. *Atmospheric Pollution Research, 11*, 1441-1450. *https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.05.017*

Savitzky A., Golay M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry, 36*(8), 1627-&. *https://doi.org/10.1021/ac60214a047*

Schween J. H., Hirsikko A., Lohnert U., Crewell S. (2014). Mixing-layer height retrieval with ceilometer and Doppler lidar: from case studies to long-term assessment. *Atmospheric Measurement Techniques, 7*(11), 3685-3704. *https://doi.org/10.5194/amt-7-3685-2014*

Serafin S., Adler B., Cuxart J., De Wekker S. F. J., Gohm A., Grisogono B. i in. (2018). Exchange Processes in the Atmospheric Boundary Layer Over Mountainous Terrain. *Atmosphere, 9*(3). *https://doi.org/10.3390/atmos9030102*

Sheridan P. F. (2019). Synoptic-flow interaction with valley cold-air pools and effects on cold-air pool persistence: Influence of valley size and atmospheric stability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 145*(721), 1636-1659. *https://doi.org/10.1002/qj.3517*

Sheridan P. F., Vosper S. B. (2005). Numerical simulations of rotors, hydraulic jumps and eddy shedding in the Falkland Islands. *Atmospheric Science Letters, 6*(4), 211-218. *https://doi.org/10.1002/asl.118*

Solon J., Borzyszkowski J., Bidlasik M., Richling A., Badora K., Balon J. i in. (2018). Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographia Polonica, 91*(2), 143-170. *https://doi.org/10.7163/GPol.0115*

Stafoggia M., Johansson C., Glantz P., Renzi M., Shtein A., de Hoogh K. i in. (2020). A Random Forest Approach to Estimate Daily Particulate Matter, Nitrogen Dioxide, and Ozone at Fine Spatial Resolution in Sweden. *Atmosphere, 11*(3). *https://doi.org/10.3390/atmos11030239*

Strbova K., Raclavska H., Bilek J. (2017). Impact of fugitive sources and meteorological parameters on vertical distribution of particulate matter over the industrial agglomeration. *Journal of Environmental Management, 203*, 1190-1198. *https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.001*

Struzewska J., Kaminski J. W. (2012). Impact of urban parameterization on high resolution air quality forecast with the GEM - AQ model. *Atmospheric Chemistry and Physics, 12*(21), 10387-10404. *https://doi.org/10.5194/acp-12-10387-2012*

Szczepanik D., Markowicz K. M. (2018). The relation between columnar and surface aerosol optical properties in a background environment. *Atmospheric Pollution Research, 9*(2), 246-256. *https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.10.001*

Szczęch-Gajewska M., Bochenek B., Kolonko M., Jerczyński M., Woyciechowska J., Sekula P. (2017). ALADIN in Poland. *39th EWGLAM and 24rd SRNWP Meeting* [dostęp 10 październik 2021] http://srnwp.met.hu/Annual_Meetings/2017/download/monday/posters/poster-EWGLAM2017.pdf

Thürkow M., Kirchner I., Kranenburg R., Timmermans R. M. A., Schaap M. (2021). A multi-meteorological comparison for episodes of PM10 concentrations in the Berlin agglomeration area in Germany with the LOTOS-EUROS CTM. *Atmospheric Environment, 244*, 117946. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117946*

Toro R., Kvakic M., Klaic Z. B., Koracin D., Morales R. G. E., Leiva, M. A. (2019). Exploring atmospheric stagnation during a severe particulate matter air pollution episode over complex terrain in Santiago, Chile. *Environmental Pollution, 244*, 705-714. *https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.067*

Trompetter W. J., Grange S. K., Davy P. K., Ancelet T. (2013). Vertical and temporal variations of black carbon in New Zealand urban areas during winter. *Atmospheric Environment, 75*, 179-187. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.036*

Turton J. V., Kirchgaessner A., Ross A. N., King J. C. (2018). The spatial distribution and temporal variability of fohn winds over the Larsen C ice shelf, Antarctica. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144*(713), 1169-1178. *https://doi.org/10.1002/qj.3284*

US (2021). Biuletyn statystyczny miasta Krakowa III kwartał 2021 r. [dostęp 12 luty 2022] https://krakow.stat.gov.pl/opracowania-biezace/komunikaty-i-biuletyny/inne-opracowania/biuletyn-statystyczny-miasta-krakowa-iii-kwartal-2021,4,46.html

Ustrnul, Z. (1992a). Infulence of foehn winds on air-temperature and humidity in the Polish Carpathians. *Theoretical and Applied Climatology, 45*(1), 43-47. *https://doi.org/10.1007/bf00865992*

Ustrnul, Z. (1992b). Potencjalne warunki występowania wiatrów fenowych w Karpatach Polskich. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 90*, 97-112.

Ustrnul, Z. (2007). Warunki Cyrkulacyjne. In D. Matuszko (Ed.), *Klimat Krakowa w XX w.* Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytet Jagielloński (pp. 21-40), Kraków [dostęp 11 listopad 2021] http://denali.geo.uj.edu.pl/publikacje,000112?&page=Klimatologia

Ustrnul Z., Czekierda D., Wypych A. (2010). Extreme values of air temperature in Poland according to different atmospheric circulation classifications. *Physics and Chemistry of the Earth, 35*(9-12), 429-436. *https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.12.012*

Ustrnul Z., Wypych A., Czekierda, D. (2013). Composite circulation index of weather extremes (the example for Poland). *Meteorologische Zeitschrift, 22*(5), 551-559. *https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0464*

Vautard R., Colette A., van Meijgaard E., Meleux F., van Oldenborgh G. J., Otto F. i in. (2018). Attribution of Wintertime Anticyclonic Stagnation Contributing to Air Pollution in Western Europe. *Bulletin of the American Meteorological Society, 99*(1), S70-S75. *https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0113.1*

Vergeiner J. (2004). *South foehn studies and a new foehn classification scheme in the Wipp and Inn valley.* (Doctor of Natural Science). University of Innsbruck [dostęp 10 kwietnia 2021] https://www.uibk.ac.at/acinn/theses/dissertations/vergeiner_johannes_2004_diss.pdf

Vicente A. B., Juan P., Meseguer S., Diaz-Avalos C., Serra L. (2018). Variability of PM10 in industrialized-urban areas. New coefficients to establish significant differences between sampling points. *Environmental Pollution, 234*, 969-978. *https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.026*

Vu T. V., Shi Z. B., Cheng J., Zhang Q., He K. B., Wang S. X., Harrison R. M. (2019). Assessing the impact of clean air action on air quality trends in Beijing using a machine learning technique. *Atmospheric Chemistry and Physics, 19*(17), 11303-11314. *https://doi.org/10.5194/acp-19-11303-2019*

Vullers J., Mayr G. J., Corsmeier U., Kottmeier C. (2018). Characteristics and evolution of diurnal foehn events in the Dead Sea valley. *Atmospheric Chemistry and Physics, 18*(24), 18169-18186. *https://doi.org/10.5194/acp-18-18169-2018*

Walczewski J., Heryan A., Krokowski J. A. (1996). Monitoring powietrza i wody w Krakowie jako narzędzie ochrony zdrowia mieszkańców. *Folia Geogr., ser. Geogr.-Phys., 26−27 (1994/1995)*, 159−171.

Wang D. X., Stachlewska I. S. (2019). *Stratospheric Smoke Properties Based on Lidar Observations in Autumn 2017 Over Warsaw.* Paper presented at the 29th International Laser Radar Conference (ILRC), Hefei, PEOPLES R CHINA. *https://doi.org/10.1051/epjconf/202023702033*

Wang H., Sun Z. B., Li H. Y., Gao Y., Wu J., Cheng T. T. (2018). Vertical-distribution Characteristics of Atmospheric Aerosols under Different Thermodynamic Conditions in Beijing. *Aerosol and Air Quality Research, 18*(11), 2775-2787. *https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0078*

Wang P., Cao J. J., Tie X. X., Wang G. H., Li G. H., Hu T. F. i in. (2015). Impact of Meteorological Parameters and Gaseous Pollutants on PM2.5 and PM10 Mass Concentrations during 2010 in Xi'an, China. *Aerosol and Air Quality Research, 15*(5), 1844-1854. *https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0380*

Wang Y. Q., Zhang X. Y., Sun J. Y., Zhang X. C., Che H. Z., Li, Y. (2015). Spatial and temporal variations of the concentrations of PM10, PM2.5 and PM1 in China. *Atmospheric Chemistry and Physics, 15*(23), 13585-13598. *https://doi.org/10.5194/acp-15-13585-2015*

Werner M., Kryza M., Guzikowski J. (2019a). Can Data Assimilation of Surface PM2.5 and Satellite AOD Improve WRF-Chem Forecasting? A Case Study for Two Scenarios of Particulate Air Pollution Episodes in Poland. *Remote Sensing, 11*(20). *https://doi.org/10.3390/rs11202364*

Werner M., Kryza M., Pagowski M., Guzikowski J. (2019b). Assimilation of PM2.5 ground base observations to two chemical schemes in WRF-Chem - The results for the winter and summer period. *Atmospheric Environment, 200*, 178-189. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.016*

Wood C. R., Jarvi L., Kouznetsov R. D., Nordbo A., Joffre S., Drebs A. i in. (2013). An Overview of the Urban Boundary Layer Atmosphere Network in Helsinki. *Bulletin of the American Meteorological Society, 94*(11), 1675-1690. *https://doi.org/10.1175/bams-d-12-00146.1*

Xu Y. W., Zhu B., Shi S. S., Huang Y. (2019). Two Inversion Layers and Their Impacts on PM2.5 Concentration over the Yangtze River Delta, China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58*(11), 2349-2362. *https://doi.org/10.1175/jamc-d-19-0008.1*

Zangl G. (2003). Deep and shallow south foehn in the region of Innsbruck: Typical features and semi-idelized numerical simulations. *Meteorology and Atmospheric Physics, 83*(3-4), 237-261. *https://doi.org/10.1007/s00703-002-0565-7*

Zhang K., Wang D. F., Bian Q. G., Duan Y. S., Zhao M. F., Fei D. N. A. i in. (2017). Tethered balloon-based particle number concentration, and size distribution vertical profiles within the lower troposphere of Shanghai. *Atmospheric Environment, 154*, 141-150. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.025*

Zhang Y., Ding A. J., Mao H. T., Nie W., Zhou D. R., Liu L. X. i in. (2016). Impact of synoptic weather patterns and inter-decadal climate variability on air quality in the North China Plain during 1980-2013. *Atmospheric Environment, 124*, 119-128. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.063*

Zhao S. P., Yu Y., Yin D. Y., Qin D. H., Yu Z. S., Dong L. X. i in. (2019). PM1 carbonaceous aerosols during winter in a typical valley city of western China: Vertical profiles and the key influencing factors. *Atmospheric Environment, 202*, 75-92. *https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.030*

Zhou S. Z., Wu L. L., Guo J. C., Chen W. H., Wang X. M., Zhao J. i in. (2020). Measurement report: Vertical distribution of atmospheric particulate matter within the urban boundary layer in southern China - size-segregated chemical composition and secondary formation through cloud processing and heterogeneous reactions. *Atmospheric Chemistry and Physics, 20*(11), 6435-6453. *https://doi.org/10.5194/acp-20-6435-2020*

Zhou Y. F., Guan H. D., Huang C. Y., Fan L. L., Gharib S., Batelaan O., Simmons C. (2019). Sea breeze cooling capacity and its influencing factors in a coastal city. *Building and Environment, 166*. *https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106408*

Zimnoch M., Godlowska J., Necki J. M., Rozanski, K. (2010). Assessing surface fluxes of CO2 and CH4 in urban environment: a reconnaissance study in Krakow, Southern Poland. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 62*(5), 573-580. *https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00489.x*

Zimnoch M., Necki J., Chmura L., Jasek A., Jelen D., Galkowski M. i in. (2019). Quantification of carbon dioxide and methane emissions in urban areas: source apportionment based on atmospheric observations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 24*(6), 1051-1071. *https://doi.org/10.1007/s11027-018-9821-0*

Publikacja spoza rozprawy
(lista według oryginalnego zapisu w czasopiśmie naukowym)

Bochenek B., Jurasz J., Jaczewski A., Stachura G., **Sekula P**., Strzyzewski T., Wdowikowski M., Figurski M. (2021). Day-Ahead Wind Power Forecasting in Poland Based on Numerical Weather Prediction. *Energies*, 14(8).
https://doi.org/10.3390/en14082164

Granty oraz staże naukowe

1. Wykonawca w projekcie międzynarodowym „Prototype system for Copernicus CO2 service" o numerze 958927 realizowanego w ramach programu Horizon 2020 [dostęp 11 marca 2022] https://coco2-project.eu
2. Wykonawca w projekcie „Rolling Work Plan task PH6 on cloud/aerosol/radiation (CAR) interactions" realizowanego w ramach prac rozwojowych w konsorcjum ACCORD [dostęp 11 marca 2022] https://www.umr-cnrm.fr/accord/IMG/pdf/rwp2022-approved.pdf
3. Staż zagraniczny, Finnish Meteorological Institute pod opieką Laura Rontu, listopad 2021 – grudzień 2021 w ramach projektu „Rolling Work Plan task PH6 on cloud/aerosol/radiation (CAR) interactions".
4. Staż zagraniczny, Meteo France pod opieką Claude Fischer, luty 2020 – marzec 2020 w ramach prac rozwojowych w konsorcjum ACCORD.
5. Staż zagraniczny, Slovenian Environment Agency pod opieką Neva Pristov, sierpień 2019 – wrzesień 2019 w ramach prac rozwojowych w konsorcjum RC–LACE [dostęp 11 marca 2022] https://www.rclace.eu/media/files/Physics/2019/sekula_preciptype_LjubljanaSep2019.pdf
6. Staż zagraniczny, Meteo France pod opieką Claude Fischer, styczeń 2019 – luty 2019 w ramach prac rozwojowych w konsorcjum ACCORD.
7. Staż zagraniczny, Slovenian Environment Agency pod opieką Neva Pristov, sierpień 2018 – wrzesień 2018 w ramach prac rozwojowych w konsorcjum RC–LACE [dostęp 11 marca 2022] https://www.rclace.eu/media/files/Physics/2018/sekula_visibility_LjubljanaSep2018.pdf

Lista wystąpień konferencyjnych i seminaryjnych

1. **Sekuła P.**, Bochenek B., Kolonko M., Stachura G., Szczęch-Gajewska M. ACCORD in Poland. *2nd ACCORD All Staff Workshop*, Lublana, 4-8 kwiecień 2022 (poster) [dostęp 11 marca 2022] https://www.umr-cnrm.fr/accord/IMG/pdf/posteraccord-asw2022_poland.pdf
2. **Sekuła P.**, Bokwa A., Ustrnul Z., Zimnoch M., Bochenek B. The impact of a foehn wind on air pollution in Kraków. *III Konferencja Naukowa Jakość powietrza a zdrowie*, 12-14 maja 2021 (referat).
3. **Sekuła P.**, Bokwa A., Zimnoch M. Bartyzel J., Bochenek B., Chmura Ł., Gałkowski M. Wypływ ścinania wiatru na koncentrację PM_{10} w profilu pionowym wewnątrz planetarnej warstwy granicznej na przykładzie Krakowa. *III Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Nauki przyrodnicze na rzecz człowieka i środowiska*, Online, 12 lutego 2021 (referat).
4. **Sekuła P.**, Bochenek B., Jerczyński M., Kolonko M., Szczęch-Gajewska M., Woyciechowska J. ALADIN in Poland. *The 41th EWGLAM & 26th SRNWP Meeting,* Sofia, 30 września -3 października 2019 (poster).
5. **Sekuła P.**, Bochenek B., Jerczyński M., Kolonko M., Szczęch-Gajewska M., Woyciechowska J. ALARO experience in Poland. *ALARO-1 working days*, Bratysława, 11-13 marca 2019 (referat) [dostęp 11 marca 2022] https://www.rclace.eu/media/files/ALARO/alaro1_wd19br/alaro1wd_PS_pl_mar19.pdf
6. **Sekuła P.**, Zimnoch M., Bartyzel J., Kud M. Application of airborne measurement system for monitoring vertical profiles of meteorological parameters, black carbon and particulate matter

concentration for urban area of Kraków. *EGU 2019*, Wiedeń, 7-12 kwietnia 2019 (poster) [dostęp 11 marca 2022]
https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-9174.pdf

7. **Sekuła P.**, Zimnoch M., Bokwa A. Influence of land-use representation on atmospheric modeling over the urban areas: example of WRF simulations for Krakow region. *EGU 2018*, Wiedeń, 8-13 kwietnia 2018 (poster) [dostęp 11 marca 2022]
https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-6644.pdf

Deklaracja udziałów autorów

Tytuł: Prediction of Air Temperature in the Polish Western Carpathian Mountains with the ALADIN-HIRLAM Numerical Weather Prediction System

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmosphere 2019, 10, 186

DOI: 10.3390/atmos10040186

Zadeklarowane udziały:

Piotr Sekuła – 30% : Podpis: .....

Anita Bokwa – 25% : Podpis: .....

Bogdan Bochenek – 15% : Podpis: .....

Mirosław Zimnoch – 30% : Podpis: .....

Mgr inż. Piotr Sekuła
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: Piotr.Sekula@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Prediction of Air Temperature in the Polish Western Carpathian Mountains with the ALADIN-HIRLAM Numerical Weather Prediction System

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmosphere 2019, 10,186

DOI: 10.3390/atmos10040186

Imię i nazwisko współautora: Piotr Sekuła

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: piotr.sekula@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Zbieranie danych
- Budowa oprogramowania
- Walidacja danych
- Analiza danych
- Prezentacja wyników
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Kierowanie badaniami

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 30%.

9.08.2021 ..... Piotr Sekuła .....

data *podpis*

Dr hab. Anita Bokwa, prof. UJ
Dyrektor Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Wydział Geografii i Geologii, Uniwersytet Jagielloński
(e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Prediction of Air Temperature in the Polish Western Carpathian Mountains with the ALADIN-HIRLAM Numerical Weather Prediction System

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmosphere 2019, 10, 186

DOI: 10.3390/atmos10040186

Imię i nazwisko współautora: Anita Bokwa

Afiliacja: Wydział Geografii i Geologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska

e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Analiza danych
- Zbieranie danych
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Koordynacja badań

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 25%.

4.08.2021 ..... A Bokwa .....

data *podpis*

Mgr inż. Bogdan Bochenek
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
(e-mail: bogdan.bochenek@imgw.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Prediction of Air Temperature in the Polish Western Carpathian Mountains with the ALADIN-HIRLAM Numerical Weather Prediction System

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmosphere 2019, 10, 186

DOI: 10.3390/atmos10040186

Imię i nazwisko współautora: Bogdan Bochenek

Afiliacja: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Kraków, Polska

e-mail: bogdan.bochenek@imgw.pl.

Udział merytoryczny:

- Interpretacja i dyskusja wyników
- Budowa oprogramowania
- Metodologia
- Zbieranie danych
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Koordynacja badań

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 15%.

04.08.2021 ....

data *podpis*

Dr hab. inż. Mirosław Zimnoch, prof. AGH
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: zimnoch@agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Prediction of Air Temperature in the Polish Western Carpathian Mountains with the ALADIN-HIRLAM Numerical Weather Prediction System

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmosphere 2019, 10, 186

DOI: 10.3390/atmos10040186

Imię i nazwisko współautora: Mirosław Zimnoch

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: zimnoch@agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia
- Analiza danych
- Zbieranie danych
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Koordynacja badań

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 30%.

4.08.2021 ..... *data*

..... *podpis*

Deklaracja udziałów autorów

Tytuł: The impact of a foehn wind on PM10 concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Zbigniew Ustrnul, Mirosław Zimnoch, Bogdan Bochenek

Czasopismo: Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 73:1, 1-26

DOI: https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780

Zadeklarowane udziały:

Piotr Sekuła – 55% : Podpis: .....

Anita Bokwa – 25% : Podpis: .....

Zbigniew Ustrnul – 5% : Podpis: .....

Mirosław Zimnoch – 10% : Podpis: .....

Bogdan Bochenek – 5% : Podpis: .....

Mgr inż. Piotr Sekuła
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: Piotr.Sekula@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: The impact of a foehn wind on PM10 concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Zbigniew Ustrnul, Mirosław Zimnoch, Bogdan Bochenek

Czasopismo: Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 73:1, 1-26

DOI: https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780

Imię i nazwisko współautora: Piotr Sekuła

Afiliacja: Zespół Fizyki Środowiska, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: piotr.sekula@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Walidacja danych
- Analiza danych
- Prezentacja wyników
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 55%.

9.08.2021 ..... Piotr Sekuła .....

data *podpis*

Dr hab. Anita Bokwa, prof. UJ
Dyrektor Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Wydział Geografii i Geologii, Uniwersytet Jagielloński
(e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: The impact of a foehn wind on PM10 concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Zbigniew Ustrnul, Mirosław Zimnoch, Bogdan Bochenek

Czasopismo: Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 73:1, 1-26

DOI: https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780

Imię i nazwisko współautora: Anita Bokwa

Afiliacja: Wydział Geografii i Geologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska

e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Walidacja danych
- Analiza danych
- Prezentacja wyników
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Kierowanie badaniami

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 25%.

4.08.2021 .... A Bokwa .....

data *podpis*

Prof. dr hab. Zbigniew Ustrnul
Wydział Geografii i Geologii
Uniwersytet Jagielloński
(e-mail: zbigniew.ustrnul@uj.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: The impact of a foehn wind on PM10 concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Zbigniew Ustrnul, Mirosław Zimnoch, Bogdan Bochenek

Czasopismo: Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 73:1, 1-26

DOI: https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780

Imię i nazwisko współautora: Zbigniew Ustrnul

Afiliacja: Wydział Geografii i Geologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska

e-mail: zbigniew.ustrnul@uj.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Metodologia pracy
- Koncepcja publikacji
- Redakcja tekstu publikacji
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 5%.

4.08.2021 ..... Z. Ust .....

data *podpis*

Dr hab. inż. Mirosław Zimnoch, prof. AGH
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: zimnoch@agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: The impact of a foehn wind on PM10 concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Zbigniew Ustrnul, Mirosław Zimnoch, Bogdan Bochenek

Czasopismo: Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 73:1, 1-26

DOI: https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780

Imię i nazwisko współautora: Mirosław Zimnoch

Afiliacja: Zespół Fizyki Środowiska, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: zimnoch@agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 10%.

4.08.2021 ....

data *podpis*

Deklaracja udziałów autorów

Tytuł: Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics

Autorzy: Piotr Sekuła, Mirosław Zimnoch, Jakub Bartyzel, Anita Bokwa, Michał Kud, Jarosław Nęcki

Czasopismo: Sensors 2021, 21, 2920

DOI: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2920

Zadeklarowane udziały:

Piotr Sekuła – 30% : Podpis: .....

Mirosław Zimnoch – 30% : Podpis: .....

Jakub Bartyzel – 10% : Podpis: .....

Anita Bokwa – 20% : Podpis: .....

Michał Kud – 5% : Podpis: .....

Jarosław Nęcki – 5% : Podpis: .....

Mgr inż. Piotr Sekuła
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: Piotr.Sekula@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics

Autorzy: Piotr Sekuła, Mirosław Zimnoch, Jakub Bartyzel, Anita Bokwa, Michał Kud, Jarosław Nęcki

Czasopismo: Sensors 2021, 21, 2920

DOI: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2920

Imię i nazwisko współautora: Piotr Sekuła

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: piotr.sekula@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Walidacja danych
- Analiza danych
- Zbieranie danych
- Prezentacja wyników
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Kierowanie badaniami

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 30%.

4.08.2021 ..... Piotr Sekuła .....

data *podpis*

Dr hab. inż. Mirosław Zimnoch, prof. AGH
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: zimnoch@agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics

Autorzy: Piotr Sekuła, Mirosław Zimnoch, Jakub Bartyzel, Anita Bokwa, Michał Kud, Jarosław Nęcki

Czasopismo: Sensors 2021, 21, 2920

DOI: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2920

Imię i nazwisko współautora: Mirosław Zimnoch

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: zimnoch@agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Walidacja danych
- Analiza danych
- Zbieranie danych
- Prezentacja wyników
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Koordynacja badań

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 30%.

4.08.2021 .....

data

.....

podpis

Dr inż. Jakub Bartyzel
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: Jakub.Bartyzel@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics

Autorzy: Piotr Sekuła, Mirosław Zimnoch, Jakub Bartyzel, Anita Bokwa, Michał Kud, Jarosław Nęcki

Czasopismo: Sensors 2021, 21, 2920

DOI: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2920

Imię i nazwisko współautora: Jakub Bartyzel

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: Jakub.Bartyzel@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Odpowiedzi na recenzje
- Koordynacja badań

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 10%.

09.08.2021 ..... *data*

..... *podpis*

Dr hab. Anita Bokwa, prof. UJ
Dyrektor Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Wydział Geografii i Geologii, Uniwersytet Jagielloński
(e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics

Autorzy: Piotr Sekuła, Mirosław Zimnoch, Jakub Bartyzel, Anita Bokwa, Michał Kud, Jarosław Nęcki

Czasopismo: Sensors 2021, 21, 2920

DOI: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2920

Imię i nazwisko współautora: Anita Bokwa

Afiliacja: Wydział Geografii i Geologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska

e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Zbieranie danych
- Analiza danych
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Koordynacja badań

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 20%.

9.08.2021 ....

data *podpis*

Inż. Michał Kud
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: michal.kud@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics

Autorzy: Piotr Sekuła, Mirosław Zimnoch, Jakub Bartyzel, Anita Bokwa, Michał Kud, Jarosław Nęcki

Czasopismo: Sensors 2021, 21, 2920

DOI: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2920

Imię i nazwisko współautora: Michał Kud

Afiliacja: Zespół Obsługi Dydaktyki, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: michal.kud@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Konceptualizacja
- Metodologia
- Walidacja danych
- Zbieranie danych

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 5%.

4.08.2021 ..... Michał Kud .....

data *podpis*

Dr inż. Jarosław Nęcki
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: necki@agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics

Autorzy: Piotr Sekuła, Mirosław Zimnoch, Jakub Bartyzel, Anita Bokwa, Michał Kud, Jarosław Nęcki

Czasopismo: Sensors 2021, 21, 2920

DOI: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2920

Imię i nazwisko współautora: Jarosław Nęcki

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: necki@agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Zbieranie danych
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 5%.

9 VIII 2021

data

podpis

Deklaracja udziałów autorów

Tytuł: Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in urban boundary layer in a complex terrain

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Jakub Bartyzel, Bogdan Bochenek, Łukasz Chmura, Michał Gałkowski, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 12113-12139

DOI: https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021

Zadeklarowane udziały:

Piotr Sekuła – 55% : Podpis: .....

Anita Bokwa – 20% : Podpis: .....

Jakub Bartyzel – 5% : Podpis: .....

Bogdan Bochenek – 5% : Podpis: .....

Łukasz Chmura – 5% : Podpis: .....

Michał Gałkowski – 5% : Podpis: .....

Mirosław Zimnoch – 5% : Podpis: .....

Mgr inż. Piotr Sekuła
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: Piotr.Sekula@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in urban boundary layer in a complex terrain

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Jakub Bartyzel, Bogdan Bochenek, Łukasz Chmura, Michał Gałkowski, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 12113-12139

DOI: https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021

Imię i nazwisko współautora: Piotr Sekuła

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: piotr.sekula@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Walidacja danych
- Analiza danych
- Prezentacja wyników
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 55%.

16.09.2021 ..... Piotr Sekuła .....

data *podpis*

Dr hab. Anita Bokwa, prof. UJ
Dyrektor Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Wydział Geografii i Geologii, Uniwersytet Jagielloński
(e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in urban boundary layer in a complex terrain

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Jakub Bartyzel, Bogdan Bochenek, Łukasz Chmura, Michał Gałkowski, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 12113-12139

DOI: https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021

Imię i nazwisko współautora: Anita Bokwa

Afiliacja: Wydział Geografii i Geologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska

e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Analiza danych
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 20%.

22.09.2021 ..... *data*

..... *podpis*

Dr inż. Jakub Bartyzel

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: Jakub.Bartyzel@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in urban boundary layer in a complex terrain

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Jakub Bartyzel, Bogdan Bochenek, Łukasz Chmura, Michał Gałkowski, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 12113-12139

DOI: https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021

Imię i nazwisko współautora: Jakub Bartyzel

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: Jakub.Bartyzel@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 5%.

12.10.2021 ..... *data*

..... *podpis*

Mgr inż. Bogdan Bochenek
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
(e-mail: bogdan.bochenek@imgw.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in urban boundary layer in a complex terrain

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Jakub Bartyzel, Bogdan Bochenek, Łukasz Chmura, Michał Gałkowski, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 12113-12139

DOI: https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021

Imię i nazwisko współautora: Bogdan Bochenek

Afiliacja: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Kraków, Polska

e-mail: bogdan.bochenek@imgw.pl.

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Edycja tekstu publikacji

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 5%.

22.09.2021 .... Bogdan Bochenek .....

data *podpis*

Dr inż. Łukasz Chmura
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: lukasz.chmura@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in urban boundary layer in a complex terrain

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Jakub Bartyzel, Bogdan Bochenek, Łukasz Chmura, Michał Gałkowski, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 12113-12139

DOI: https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021

Imię i nazwisko współautora: Łukasz Chmura

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: lukasz.chmura@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Zbieranie danych
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 5%.

12.10.2021 .....

data

.....

podpis

Dr inż. Michał Gałkowski
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: michal.galkowski@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in urban boundary layer in a complex terrain

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Jakub Bartyzel, Bogdan Bochenek, Łukasz Chmura, Michał Gałkowski, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 12113-12139

DOI: https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021

Imię i nazwisko współautora: Michał Gałkowski

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Kraków, Polska

e-mail: michal.galkowski@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Zbieranie danych
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 5%.

12.10.2021 .....

data

.....

podpis

Dr hab. inż. Mirosław Zimnoch, prof. AGH
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: zimnoch@agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in urban boundary layer in a complex terrain

Autorzy: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Jakub Bartyzel, Bogdan Bochenek, Łukasz Chmura, Michał Gałkowski, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 12113-12139

DOI: https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021

Imię i nazwisko współautora: Mirosław Zimnoch

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Kraków, Polska

e-mail: zimnoch@agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 5%.

21_09_2021 ....

data *podpis*

Deklaracja udziałów autorów

Tytuł: Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography

Autorzy: Piotr Sekuła, Zbigniew Ustrnul, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Sustainability 2022, 14(6), 3388

DOI: https://doi.org/10.3390/su14063388

Zadeklarowane udziały:

Piotr Sekuła – 55% : Podpis: .....

Zbigniew Ustrnul – 10% : Podpis: .....

Anita Bokwa – 15% : Podpis: .....

Bogdan Bochenek – 10% : Podpis: .....

Mirosław Zimnoch – 10% : Podpis: .....

Mgr inż. Piotr Sekuła
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: Piotr.Sekula@fis.agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography

Autorzy: Piotr Sekuła, Zbigniew Ustrnul, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Sustainability 2022, 14(6), 3388

DOI: https://doi.org/10.3390/su14063388

Imię i nazwisko współautora: Piotr Sekuła

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: piotr.sekula@fis.agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Budowa modelu
- Metodologia pracy
- Zbieranie danych
- Walidacja i analiza danych
- Prezentacja wyników
- Interpretacja i dyskusja wyników
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Kierowanie badaniami

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 55%.

28.04.2022 ..... *data*

Sekuła ..... *podpis*

Prof. dr hab. Zbigniew Ustrnul
Wydział Geografii i Geologii
Uniwersytet Jagielloński
(e-mail: zbigniew.ustrnul@uj.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography

Autorzy: Piotr Sekuła, Zbigniew Ustrnul, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Sustainability 2022, 14(6), 3388

DOI: https://doi.org/10.3390/su14063388

Imię i nazwisko współautora: Zbigniew Ustrnul

Afiliacja: Wydział Geografii i Geologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska

e-mail: zbigniew.ustrnul@uj.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Zbieranie danych
- Odpowiedzi na recenzje
- Finansowanie badań

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 10%.

28.04.2022 ..... Zbigniew Ustrnul .....

data *podpis*

Dr hab. Anita Bokwa, prof. UJ
Dyrektor Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Wydział Geografii i Geologii, Uniwersytet Jagielloński
(e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography

Autorzy: Piotr Sekuła, Zbigniew Ustrnul, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Sustainability 2022, 14(6), 3388

DOI: https://doi.org/10.3390/su14063388

Imię i nazwisko współautora: Anita Bokwa

Afiliacja: Wydział Geografii i Geologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska

e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Metodologia pracy
- Zbieranie danych
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 15%.

28.04.2022 ..... *data*

..... *podpis*

Mgr inż. Bogdan Bochenek
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
(e-mail: bogdan.bochenek@imgw.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography

Autorzy: Piotr Sekuła, Zbigniew Ustrnul, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Sustainability 2022, 14(6), 3388

DOI: https://doi.org/10.3390/su14063388

Imię i nazwisko współautora: Bogdan Bochenek

Afiliacja: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Kraków, Polska

e-mail: bogdan.bochenek@imgw.pl.

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Budowa modelu
- Opracowanie danych
- Walidacja danych
- Prezentacja wyników
- Odpowiedzi na recenzje
- Finansowanie badań

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 10%.

6.05.2022 ..... Bogdan Bochenek .....

data *podpis*

Dr hab. inż. Mirosław Zimnoch, prof. AGH
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
(e-mail: zimnoch@agh.edu.pl)

Deklaracja wkładu własnego w opublikowanej pracy naukowej złożonej w ramach pracy doktorskiej Pana Piotra Sekuły.

Tytuł: Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography

Autorzy: Piotr Sekuła, Zbigniew Ustrnul, Anita Bokwa, Bogdan Bochenek, Mirosław Zimnoch

Czasopismo: Sustainability 2022, 14(6), 3388

DOI: https://doi.org/10.3390/su14063388

Imię i nazwisko współautora: Mirosław Zimnoch

Afiliacja: Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki I Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

e-mail: zimnoch@agh.edu.pl

Udział merytoryczny:

- Koncepcja publikacji
- Edycja tekstu publikacji
- Odpowiedzi na recenzje
- Finansowanie badań

Całkowity udział w opublikowanej pracy naukowej wyniósł 10%.

28.04.2022 ..... *data*

..... *podpis*

atmosphere

MDPI

Article

Prediction of Air Temperature in the Polish Western Carpathian Mountains with the ALADIN-HIRLAM Numerical Weather Prediction System

Piotr Sekula [1,2,*], Anita Bokwa [3], Bogdan Bochenek [2] and Miroslaw Zimnoch [1]

1 Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH-University of Science and Technology, 30-059 Krakow, Poland; zimnoch@agh.edu.pl
2 Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute, IMGW-PIB Branch of Krakow, 30-215 Krakow, Poland; bogdan.bochenek@imgw.pl
3 Institute of Geography and Spatial Management, Jagiellonian University, 30-387 Krakow, Poland; anita.bokwa@uj.edu.pl
* Correspondence: piotr.sekula@fis.agh.edu.pl

Received: 5 January 2019; Accepted: 2 April 2019; Published: 5 April 2019

Abstract: Prediction of spatial and temporal variability of air temperature in areas with complex topography is still a challenge for numerical weather prediction models. Simulation of atmosphere over complex terrain requires dense and accurate horizontal and vertical grids. In this study, verification results of three configurations of the Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International High-Resolution Limited Area Model (ALADIN-HIRLAM) numerical weather prediction (NWP) system, using two different horizontal and vertical resolutions and applied to the Polish Western Carpathian Mountains, are presented. One model of the ALADIN-HIRLAM NWP system is tested in two horizontal and vertical resolutions. Predicted air temperatures are compared with observations from stations located in different orographies. A comparison of model results with observations was conducted for three cold season intervals in 2017 and 2018. Statistical validation of model output demonstrates better model representativeness for stations located on hill and mountain tops compared to locations in valley bottoms. A comparison of results for two topography representations (2 × 2 km and 1 × 1 km) showed no statistically significant differences of root mean square error (RMSE) and bias between model results and observations.

Keywords: ALADIN-HIRLAM numerical weather prediction system; variability of air temperature; Polish Western Carpathian Mountains

1. Introduction

Increasing knowledge about physical atmospheric processes contributes to improvement of the numerical models used for weather forecasting. Tests of new model configurations show that weather prediction for regions with complex topography constitutes a challenging task for the development of numerical weather forecasting (NWF) systems. One internationally coordinated activity is the Transport and Exchange Processes in the Atmosphere over Mountains Experiment (TEAMx) [1]. Regions with highly complex relief are important, not only because of the impact on weather formation, but also the occurrence of processes like katabatic flows and strong temperature inversions caused by stable stratification of the air volume within the valleys. Those processes have a significant impact on air quality, as they stimulate an increased concentration of air pollutants and the formation of smog episodes.

The Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International (ALADIN) High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) system is a numerical weather prediction (NWP) system

developed by the international ALADIN and HIRLAM consortiums for operational weather forecasting and research purposes [2,3]. The ALADIN-HIRLAM NWP system is based on a code that is shared with the Integrated Forecast System (IFS) global model developed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle (ARPEGE) global numerical weather prediction model used for operational weather forecasting at Météo-France. The system provides a multitude of high-resolution limited-area model (LAM) configurations. Several configurations in the ALADIN consortium are precisely validated and prepared to be used for operational weather forecasting at the 16 partner institutes. These configurations are called the ALADIN canonical model configurations (CMCs). Currently there are three canonical model configurations: the ALADIN baseline CMC, the Application of Research to Operations at Mesoscale (AROME) CMC, and the ALADIN–AROME (ALARO) CMC. The HIRLAM consortium prepared its own model configuration of AROME, named the HIRLAM ALADIN Regional/Mesoscale Operational NWP in Europe AROME (HARMONIE–AROME), which is used for operational short-range weather forecasts in 10 countries in Europe.

Reliable weather forecasting for such regions may require models of subkilometer spatial resolution. Meteo France is running the AROME operational model with a resolution of 1.3 km [4]. The first results of the preoperational high-resolution AROME model (named AROME Airport) were presented by Hagelin et al. [5]. A rapidly updated forecast was run with 500 m resolution for nowcasting over Paris Charles de Gaulle Airport (CDG) to increase the safety of airport operations. The results of AROME Airport were compared with the operational configuration of the AROME model using the forecasts from AROME Airport starting every hour. The forecasts from AROME Airport delivered improved data compared to the operational version, in particular for wind speed for runs from all forecast hours. ALADIN and HIRLAM consortium members are testing new configurations of sub-km models. For example, the Danish Meteorological Institute, which belongs to the HIRLAM consortium, presented some promising results of the HARMONIE-AROME model with a resolution of 750 m [6]. Changing the resolution of the numerical weather forecast model to the regional scale (i.e., a few hundred meters) is necessary for its verification. Tests of verification of the high-resolution model were presented by Amodei et al. [7]. A regional Brier probability score was used to compare the results from the high-resolution model with those from the low-resolution model in terms of the forecast of rainfall and wind gusts, with application of the observations from surface stations. The method was based on a comparison of the frequency from the forecast with observed events in the neighborhood of each measurement point. High-resolution forecasts of small-scale events are usually correct, but forecasts of these events can be slightly shifted in space and time from observations. Forecasts of events shifted in space and time are penalized twice, because of false alarm and nondetection, which is called double penalty. The adopted strategy reduced the impact of the double penalty, greatly affecting the high-resolution model compared with models at lower resolution.

Poland is one of the European countries with relatively poor air quality, especially during the cold part of the year [8]. Most affected are areas with complex topography where the natural dispersion conditions are often very poor, due to the local weather phenomena mentioned above, especially thermal inversions. The Polish Western Carpathian Mountains represent such a region and were chosen as the study area. The aim of the paper was to evaluate the performance of the operational AROME model in the study region and to verify the hypothesis that in mountain areas, the increased resolution in the ALADIN-HIRLAM NWP system would significantly improve the accuracy of air temperature forecasts (at the level of 2 m above the ground). The AROME model is used by the Polish Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute (IMWM-NRI). Three configurations of the nonoperational ALADIN-HIRLAM NWP system (AROME 1 km $\times$ 1 km, ALARO nonhydrostatic (NH) 1 km $\times$ 1 km, and HARMONIE-AROME 2 km $\times$ 2 km) were used for verification of the above hypothesis. The verification of model forecast results was achieved by comparison with measurements from 19 meteorological stations located in the Western Carpathian Mountains.

The present study consists of four sections. The first section includes a presentation of the context of the issue and a formulation of the research aim. Section 2 contains a brief description of the analyzed region, data and methods used for forecast verification, descriptions of the ALADIN consortium and ALADIN-HIRLAM NWP system, and the representativeness of stations in the model domains. Section 3 shows the results obtained with the AROME CMC operational model and a comparison of the results from different configurations of ALADIN consortium models. Section 4 contains the conclusions.

2. Data and Methodology

2.1. Study Area

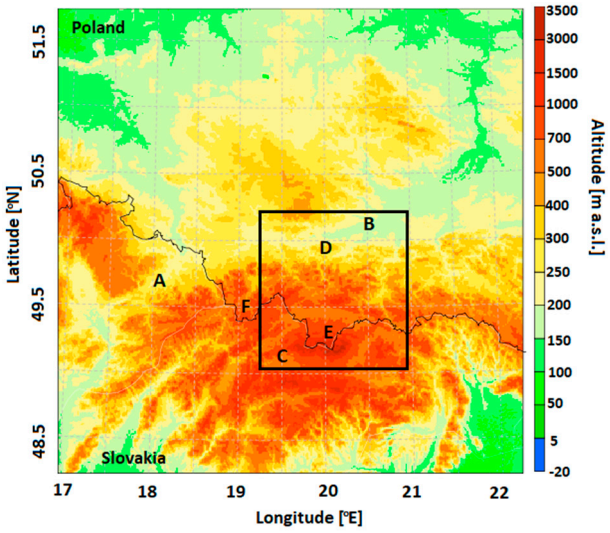
The Polish Western Carpathian Mts. are the northernmost and westernmost parts of the Carpathians, a mountain range located in eight European countries: Austria, the Czech Republic, Hungary, Poland, Romania, Serbia, Slovakia, and Ukraine. The Polish part covers about 6% of the area of the country (1.96 million hectares) and extends from the Moravian Gate (marked as A in Figure 1a) in the west to the Ukrainian Carpathians (beyond the range of Figure 1) in the east, and from the chain of basins in the north (located in the Carpathian Foredeep; B) to the Slovakian Carpathians in the south (C). The altitude varies from 200 to 300 m a.s.l. In the Carpathian Foothills (D) to over 2000 m a.s.l. In the highest range of the whole Carpathians, the Tatra Mts., (E) with the highest peak being Gerlach (2655 m a.s.l., located in Slovakia; the highest Polish peak of the Tatra Mts. is Rysy, 2499 m a.s.l.). The Tatra Mts. are the only part of the Carpathians with typical alpine, high mountain landscape. Farther to the north is the main part of the Polish Western Carpathians, the Beskidy Mts. (divided further into several ranges), with altitudes exceeding 1000 m a.s.l., and the highest peak, Babia Góra Mt., at 1725 m a.s.l., is located in the Beskid Żywiecki Mts. (F). A characteristic feature of the Beskidy Mts.' relief is the presence of deeply incised valleys, as relative heights reach 400–700 m. The mountain peaks are most often forested and not favorable for settlement. Therefore, human activity is concentrated in the valleys. It is the opposite in the Carpathian Foothills, which extend along the Beskidy Mts. from west to east. They consist of hills with relatively wide and flat hilltops where settlements and transportation infrastructure are located, while the valleys are left unused and often forested. The climatic conditions are very diverse due to the large differences in altitude and complex relief. Mean annual air temperature in the period 1951–2006 varied from 8.0 °C in Kraków (northern border of the foothills) to 5.3 °C in Zakopane (foot of the Tatra Mts.) and −0.6 °C at Kasprowy Wierch Mt. (a peak in the Tatra Mts. at 1987 m a.s.l.). Mean annual precipitation sums varied from 667 mm in Kraków to 1115 mm in Zakopane and 1754 mm at Kasprowy Wierch Mt. [9,10]. Vertical climatic zones are best developed in the Tatra Mts., from a forest zone at the foot of the mountain up to bare rock zone at the highest peaks, but the climatic zonality is also well seen in most of the Beskidy Mt. ranges [11]. Particular weather features of the Polish Western Carpathians include foehn winds [12], air temperature inversions, and the highest mean annual number of days with thunderstorms (up to 34 days in the Tatra Mts.) compared to other regions of Poland [13,14]. The Carpathian valleys show large spatial diversity of local climate, forming a sequence of temperature–humidity vertical zones [15].

Table 1. Meteorological stations/measurement points used in the study. JU, Jagiellonian University; IMWM-NRI, Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute.

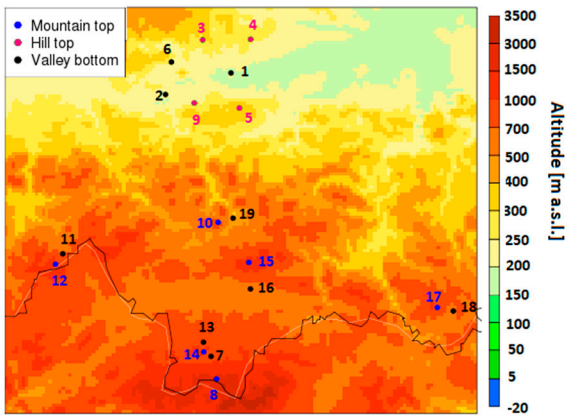
No.	Name	Latitude	Longitude	Altitude (m a.s.l.)	Manager of the Station	Land Form
1	Wandy Bridge	50.053	20.049	197	JU	Valley bottom
2	Jeziorzany	49.996	19.775	211	JU	Valley bottom
3	Garlica Murowana	50.142	19.931	270	JU	Hill top
4	Kocmyrzów	50.143	20.132	299	JU	Hill top
5	Chorągwica	49.959	20.083	436	JU	Hill top
6	Balice	50.083	19.8	237	IMWM-NRI	Valley bottom

Table 1. *Cont.*

No.	Name	Latitude	Longitude	Altitude (m a.s.l.)	Manager of the Station	Land Form
7	Zakopane	49.294	19.96	855	IMWM-NRI	Valley bottom
8	Kasprowy Wierch	49.233	19.982	1991	IMWM-NRI	Mountain top
9	Libertow	49.973	19.895	314	IMWM-NRI	Hill top
10	Luboń Wielki	49.653	19.992	1022	IMWM-NRI	Mountain top
11	Korbielów	49.569	19.348	650	IMWM-NRI	Valley bottom
12	Pilsko	49.541	19.318	1270	IMWM-NRI	Mountain top
13	Nowe Bystre	49.332	19.929	800	IMWM-NRI	Valley bottom
14	Gubałówka	49.306	19.93	1123	IMWM-NRI	Mountain top
15	Turbacz	49.545	20.118	1240	IMWM-NRI	Mountain top
16	opuszna	49.474	20.124	568	IMWM-NRI	Valley bottom
17	Jaworzyna Krynicka	49.418	20.895	1112	IMWM-NRI	Mountain top
18	Krynica	49.408	20.961	585	IMWM-NRI	Valley bottom
19	Mszana Dolna	49.664	20.054	440	IMWM-NRI	Valley bottom



(a)



(b)

Figure 1. (**a**) Altitude (m a.s.l.) within the domain of ALARO-NH and AROME CMC 1 km models with 1 km × 1 km resolution, and (**b**) locations of meteorological stations/measurement points on the background of orography map for 1 km × 1 km domain of AROME CMC 1 km and ALARO NH models. Analyzed area is marked with a black frame. Explanation of the letters in Fig. 1a can be found in the text of the Section 2.1. Numbers in fig. 1b as in Table 1.

2.2. Measurement Data

The study was focused on the cold part of the year (September to April), when heating season takes place. This is linked to the fact that the vertical lapse rate in that part of the year is often decisive for air pollution dispersion, due to the formation of air temperature inversions. Therefore, the study concentrated on the air temperature spatial distribution in the area with diversified relief, where air pollution problems are the greatest, and the application of data from the stations located in the valleys and at the hilltops. The air temperature data from the measurements were available for two uneven periods: 1 January to 3 April 2017 and 1 September 2017 to 30 April 2018. In order to eliminate the effects of various sample sizes, studies on the variability of air temperature (at 2 m above the ground) for the Polish Western Carpathian Mts. were carried out for three intervals: winter/spring, 1 January to 30 April 2017 and 1 January to 30 April 2018, and autumn/winter, 1 September to 31 December 2017. Additionally, the division of subperiods was linked to the fact that for each subperiod, the number of stations from which data were available was different, and merging the data into one sample would eliminate 6 stations from the 19 studied.

Air temperature measurements from 19 meteorological stations or measurement points were used to verify the model forecast. The stations/measurement points are located in both concave and convex land forms (i.e., in valleys and at the tops of hills or mountains) so as to represent the diversity of local climate generated by the complex relief, as described in Section 2. From 19 stations/measurement points mentioned, 13 were owned and maintained by the IMWM-NRI (10 automatic stations and 3 synoptic stations). Five measurement points were located in the vicinity of Kraków and belonged to Jagiellonian University (JU). Basic information about the stations/measurement points is presented in Table 1. Measurement points 1–4 and 6 were located outside the Carpathians but very close to their northern border and, therefore, they were included in the analysis. Figure 1b presents the locations of meteorological stations/measurement points used in the study.

Air temperature measurements at the IMWM-NRI stations were realized following the standards of the World Meteorological Organization (WMO). Measurements of air temperature at the points administered by JU were realized in accordance with WMO guidelines [16], and the technical details can be found in Bokwa et al. [17]. The stations/measurement points were divided into two groups: (1) representing valley bottoms (Nos. 1, 2, 6, 7, 11, 13, 16, 18, and 19), and (2) representing hill and mountain tops (Nos. 3, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 14, 15, and 17). Further analysis was conducted separately for those two groups in order to study the performance of the modeled air temperature forecast in relation to local environmental conditions. The stations/measurement points represented the main types of relief of the Polish Western Carpathians: high mountains (8); areas at the foot of high mountains (7, 14); mountain tops in the Beskidy Mts. (10, 12, 15, and 17); valley bottoms in the Beskidy Mts. (11, 13, 16, 18, and 19); hill tops in the Carpathian Foothills (5, 9); and valley bottoms in the basins along the northern border of the Carpathians (1, 2, and 6). Measurement points 3 and 4 represented convex landforms comparable to 5 and 9 but were located north of the Carpathian Foredeep and belonged to the area upland of Central Poland.

2.3. Model Configurations

The first model configuration of the ALADIN system was ALADIN, running from 1998 to 2013. After the 2013 model, ALADIN was replaced with ALARO and AROME configurations. Currently, AROME CMC and ALARO CMC are used operationally in IMWM-NRI, together with the CY40T1 ALARO CMC hydrostatic model, with a horizontal resolution of 4 $\times$ 4 km. The latter is run with a 16-point-wide coupling zone and a 3 h coupling with ARPEGE CY42. There are four operational forecasts per day starting at 00:00, 06:00, 12:00, and 18:00 UTC with respective forecast ranges of 66, 66, 66, and 60 h. The model has been validated by the ALADIN team at IMWM-NRI [18].

The ARPEGE global model has been used operationally at Meteo-France since 1992. The horizontal resolution ranges from 7.5 km over Europe to 36 km over other areas, and the model uses 105 vertical levels, the lowest level at a height of 10 m up to the highest, defined by pressure equal to 0.1 hPa.

The model uses an incremental 4D-Var data assimilation system, which runs every 6 h followed by 6 h forecasts. "The control variables are vorticity and unbalanced variables for divergence, temperature, surface pressure and humidity. The background error variances are derived from a data assimilation ensemble and are updated at every cycle" [19]. During the analyzed time a change was made in the ARPEGE configuration. The surface scheme was changed from Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA) to Surface externalisee (SURFEX) in December 2017, which could have an influence on forecasting.

Forecast results of ALARO CMC are used to prepare lateral boundary coupling for the nonhydrostatic model CY40T1 AROME CMC (AROME CMC 2 km) with a horizontal resolution of 2 × 2 km and 60 vertical levels. AROME CMC 2 km is run four times per day with 30 h forecast. The location of the lowest model level is at 10 m above ground level, and the model top is located at 65 km above ground level. Detailed information concerning the height of the lowest model levels up to 3 km altitude for two resolutions, 60 and 105, are included in Appendix A.

In the present study, three models were tested: AROME CMC with two horizontal and vertical resolutions, HARMONIE-AROME, and ALARO nonhydrostatic (ALARO NH), which together provided four options for further analysis (Table 2). In the case of the ALARO NH model, lateral/boundary conditions were taken from ARPEGE with a horizontal resolution of 15.2 × 15.2 km. For other configurations, lateral/boundary conditions were taken from ALARO 4 × 4 km.

Table 2. Configurations of models used in the study. AROME, Application of Research to Operations at Mesoscale; CMC, canonical model configuration; HARMONIE, Limitée Adaptation Dynamique Développement International (ALADIN) High-Resolution Limited Area Model (HIRLAM) Regional/Mesoscale Operational Numerical Weather Prediction (NWP) in Europe AROME; ALARO NH, ALADIN-AROME nonhydrostatic.

Model Name	Horizontal Resolution	Number of Vertical Levels	Lateral/Boundary Conditions	Dimension of Domain	Time Step (s)	Length of Forecast
AROME CMC 2 km (operational model)	2 km × 2 km	60	ALARO CMC 4 km × 4 km	810 × 810	51.42	30 h
HARMONIE-AROME	2 km × 2 km	60	ALARO CMC 4 km × 4 km	810 × 810	75	30 h
AROME CMC 1 km	1 km × 1 km	105	ALARO CMC 4 km × 4 km	389 × 389	30	18 h
ALARO NH	1 km × 1 km	105	ARPEGE 15.2 km × 15.2 km	389 × 389	30	18 h

Due to ongoing work on the assimilation of surface data in the ALARO model in the ALADIN Poland group, data assimilation was not used in this research, and models were run in dynamical adaptation mode. HARMONIE-AROME and AROME CMC 2 km had the same domain, with a horizontal resolution of 2 × 2 km and 60 vertical levels. The length of the forecast for the AROME CMC 2 km and HARMONIE-AROME models was 30 h. The size of the model domain for AROME CMC (AROME CMC 1 km) and ALARO NH with a resolution of 1 × 1 km was significantly smaller than the domain of AROME CMC 2 km. The definitions of horizontal and vertical grids for AROME CMC 2 km and HARMONIE-AROME were the same. The horizontal and vertical grids of AROME CMC 1 km and ALARO NH were determined by the same method. Due to the longer calculation time for the forecast for models with 1 × 1 km resolution and 105 vertical levels, the forecast length was 18 h. The two resolution domains tested in the present study are shown in Figure 1.

In the present study, initial/boundary data from 12:00 UTC for each forecast day were used. AROME CMC 2 km was run operationally in IMWM-NRI, and AROME CMC 1 km, ALARO NH, and HARMONIE-AROME were launched in the trial version. Verification of forecast results for the AROME CMC 2 km model was performed for forecasts between the 6th and 29th hour (i.e., from 18:00 to 17:00 UTC) each day from 1 January to 30 April 2017 and 1 September 2017 to 30 April 2018. Comparisons of observations with forecast results of HARMONIE-AROME, ALARO NH, and AROME CMC 1 km were made for the shorter period of 1 January to 16 February 2017. That period was chosen

for tests because of the occurrence of low air temperatures at 2 m a.g.l. measured at all mentioned stations (below −20 °C).

The length of forecast for HARMONIE-AROME was 30 h, including 6-h spin-up. Verification of forecast results was performed for 24-h periods (i.e., from 18:00 to 17:00 UTC) for the period 1 January to 16 February 2017. Due to problems with the availability of lateral/boundary archive files, it was not possible to obtain predictions for all days representing the above period. Comparisons of observations with two limited-area AROME CMC 2 km and HARMONIE-AROME models were made for 39 of the 47 days.

The range of forecasts for 2 km-scale AROME CMC 1 km and ALARO NH models was 18 h. Comparisons of observations with kilometer-scale models were made for the common time period (from the 6th to 18th forecast hour). The verification period for the three models was from 1 January to 16 February 2017 (data for AROME CMC 1 km and ALARO NH were available for 31 of the 47 days).

The first 6 h of model forecast represented model spin-up, therefore they were omitted from all analyses.

HARMONIE-AROME is a configuration of AROME prepared by the HIRLAM consortium. The main differences between the models concern the dynamics and turbulence. HARMONIE-AROME uses the same nonhydrostatic dynamical [20] core as AROME, based on the fully compressible Euler equations. The differences in the dynamics between AROME and HARMONIE-AROME are connected to the use of the Stable Extrapolation Two-Time-Level Scheme (SETTLS) used for numerical integration [21] and application of vertical nesting through Davies relaxation to assure stability of the integrations. Additionally, HARMONIE–AROME, contrary to AROME, uses the Stable Extrapolation Two-Time-Level Scheme (HARATU) turbulence scheme, while representation of the turbulence in AROME is based on prognostic turbulent kinetic energy (TKE) combined with a diagnostic mixing length [22,23]. The HARATU scheme also uses a prognostic equation for turbulent kinetic energy (TKE) and numerical implementation of TKE equations on "half" model levels ("full" model levels in AROME).

The diagnostic temperature at 2 m in AROME was calculated using a prognostic surface boundary layer scheme [24].

To describe the microphysics, AROME and HARMONIE-AROME models use the three-class ice parameterization (ICE3) package, and the difference between the parameterization of microphysics for the models is that HARMONIE, to improve model performance under cold conditions, uses the option "OCND2" [25] and the Kogan autoconversion scheme. The radiation schemes used in AROME and HARMONIE-AROME are almost the same; one difference is in shortwave radiation parameterization, where the cloud liquid optical properties scheme is used [26,27]. The shortwave radiation scheme (Morcrette radiation scheme from ECMWF) contains six spectral intervals (0.185–0.25, 0.25–0.44, 0.44–0.69, 0.69–1.1, 1.1–2.38, and 2.38–4.00 μm). The longwave Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) radiation scheme is divided by 16 spectral bands between 3.33 and 1000 μm.

ALARO NH uses the same nonhydrostatic dynamic core as AROME and HARMONIE-AROME; some differences between these models are in surface, turbulence, convection, microphysics, and radiation scheme. Parameterization of processes occurring in the surface in ALARO is through the ISBA surface scheme. Because ALARO is provided for use in mesoscale resolution for parameterization of moist deep convection, the Modular Multiscale Microphysics and Transport (3MT) scheme is used [28]. Parameterization of clouds is provided by the cloud system resolving model (CSRM). The CRSM scheme relies on convective drafts that are fully resolved by the model dynamics, and all the condensation is computed by the cloud scheme. The microphysics scheme in ALARO works with six species: dry air, water vapor, suspended liquid and ice cloud water, rain, and snow. A comparison of the models' assumptions and features is presented in Table 3.

Table 3. Physics schemes used in tests of ALADIN HIRLAM system.

Parameterization Scheme	Model Name		
	AROME CMC [2]	**HARMONIE-AROME CMC [3]**	**ALARO Nonhydrostatic (ALARO NH) [2]**
Dynamics	Nonhydrostatic ALADIN [20]	Non-hydrostatic ALADIN, Stable Extrapolation Two-Time-Level Scheme (SETTLS) [20,21]	Nonhydrostatic ALADIN [20]
Turbulence	Prognostic turbulent kinetic energy (TKE) combined with diagnostic nixing length [22,23]	HARMONIE with Regional Atmospheric Climate Model (RACMO) Turbulence (HARATU) [3]	Third Order moments Unified Condensation And N-dependent Solver (TOUCANS)
Radiation	Longwave Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) radiation scheme, Morcrette shortwave radiation scheme from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)	Longwave RRTM radiation scheme, Morcrette shortwave radiation scheme from ECMWF, liquid optical properties scheme [26]	Actif Calcul de RAyonnement et NÉBulosité (ACRANEB2)
Microphysics	Three-class parameterization (ICE3)	Three-class ice parameterization (ICE3) with option "OCND2" [25], and Kogan autoconversion scheme	Lopez [29]
Shallow convection	Pergaud, J., Masson, V., Malardel, S., and Couvreux, F., 2009 (PMMC09) [30]	PMMC09	TOUCANS
Deep convection	-	-	Modular Multiscale Microphysics and Transport (3MT) [28]
Clouds	Statistical cloud scheme	Statistical cloud scheme	Cloud system resolving model (CSRM)
Surface scheme	SURFEX [27]	SURFEX [27]	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA)

2.4. Representation of Meteorological Stations/Measurement Points in Model Domains

One of the main problems in weather forecasting for areas with variable topography is achieving the best possible reconstruction of analyzed landforms in the model. Therefore, the representation of meteorological stations/measurement points in model grids was thoroughly analyzed in order to determine for each station the model grid point that would be the closest to the real location of a station, in both horizontal and vertical coordinates.

2.4.1. Domain of AROME Canonical Model Configuration (CMC) 2 km and HARMONIE-AROME

Model grid points representing meteorological stations were determined in a few steps. First, for each station, the model grid point located closest to the station was assigned. However, good representation in the horizontal dimension was not always accompanied by good agreement in altitude. In particular, the altitude of more than half of the model grid points chosen was significantly different (by over 100 m) from the altitude of matching stations/points. Therefore, in the second step, for each such point, neighboring model grid points up to a distance of two nodes along the axis of the ordinate and the abscissa were found, and their altitudes were compared with the corresponding station/point altitude. The final choice of a grid point representing a particular station in the model was based on an analysis of surrounding landforms. The grid point had to represent the same landform as the station (i.e., a hill/mountain top or valley bottom). In the last step, it was verified whether the correction of grid points positively influenced the reliability of the forecast. Forecast results for AROME CMC 2 km were compared with measurements for the period February to March 2018, and the values of root mean square error (RMSE) and bias of air temperature at 2 m showed improvement in four cases (stations/points 8, 9, 12, and 15) out of seven tested. Therefore, only for those four stations/points were corrected grid points chosen. Table 4 shows the final grid points set for domains with two resolutions, 2 × 2 km and 1 × 1 km, and Figure 1b presents the locations of meteorological stations against the background of an orography map of AROME CMC 2 km. Table 4 also has information about the horizontal distance between selected grid points and stations. Mean values of horizontal distance between selected grid points and stations were comparable, 1.66 km for grids with 2 × 2 km resolution and 1.96 km for grids with 1 × 1 km resolution. Maximum horizontal distance was measured for synoptic station Kasprowy Wierch, and large differences were caused by a complex topography of high mountains in the analyzed region and maximum reduction of the vertical height difference between grid points and the station. The minimum horizontal distance was 0.17 km and 0.09 km for grids with 2 × 2 km and 1 × 1 km resolution, respectively.

Table 4. Comparison of altitudes of meteorological stations/measurement points used in the study and horizontal distances between grid points and stations for AROME CMC 2 km and HARMONIE-AROME (both with 2 km × 2 km resolution) and for AROME CMC 1 km and ALARO NH (with 1 km × 1 km resolution).

Station No.	Station/Point Altitude (m a.s.l.)	Grid with 2 km × 2 km Resolution			Grid with 1 km × 1 km Resolution		
		Grid Point Altitude (m a.s.l.)	Height Difference (Real– Model)	Horizontal Distance between Grid Point and Station (km)	Grid Point Altitude (m a.s.l.)	Height Difference (Real–Model)	Horizontal Distance between Grid Point and Station (km)
1	197	195	2	1.67	192	5	0.09
2	211	215	−4	1.62	221	−10	0.87
3	270	279	−9	0.85	**271**	**−1**	2.64
4	299	273	26	1.60	**296**	**3**	0.98
5	436	351	85	2.16	**384**	**52**	3.82
6	237	260	−23	1.32	243	−6	0.49
7	855	881	−26	0.71	**855**	**0**	1.83
8	**1991**	**1852**	**139**	6.288	**2005**	**−14**	3.91
9	**314**	**301**	**13**	2.22	**315**	**−1**	3.85
10	1022	716	306	1.42	**880**	**142**	0.64
11	650	730	−80	0.17	656	−6	0.24
12	**1270**	**1268**	**2**	3.05	**1277**	**−7**	2.89
13	800	945	−145	0.35	**802**	**−2**	3.62
14	1123	995	128	0.87	**1117**	**6**	2.95
15	**1240**	**1147**	**93**	3.32	**1235**	**5**	0.78
16	568	604	−36	0.57	**566**	**2**	1.92
17	1112	970	142	0.61	**1032**	**80**	3.25
18	585	658	−73	1.55	584	1	0.71
19	440	409	31	1.18	**446**	**−6**	1.76

Data in bold signifies stations/points with corrected locations of grid points.

The mean value of absolute height difference for the model domain with 2 × 2 km resolution was 72 ± 74 m. The maximum height difference was computed for station 10 (306 m). The lowest height difference was 2 m for stations 1 and 12.

2.4.2. Domain of AROME CMC 1 km and ALARO Nonhydrostatic (NH) Models

The same procedure as described for the model with 2 × 2 km resolution was repeated for the 1 × 1 km resolution domain, but the threshold of height difference above which the correction was performed was 10 m. First, grid points for altitude correction were checked at the horizontal distance of one node, then the grid points at the distance of two nodes, until the reduction of altitude difference was below the threshold. Table 4 presents altitudes of the meteorological stations/measurement points used in the study and corresponding model grid points for the 1 × 1 km domain. The range of absolute height difference for the model domain with 1 × 1 km resolution was significantly smaller; the maximum difference of height was 142 m for station 10 (the difference in height for the grid with 2 × 2 km resolution was 306 m). The minimum difference in height for points in the grid to real altitude was in the range of ±1 m (for station 7, the difference was close to 0 m). The mean value of absolute height difference for all stations for the model domain with 1 × 1 km resolution was 18 ± 35 m.

2.5. Forecast Evaluation

The analyzed period includes three shorter time intervals: winter/spring, 1 January to 30 April 2017 and 1 January to 30 April 2018; and autumn/winter, 1 September to 31 December 2017. Measurement data of air temperature at 2 m a.g.l. from all stations with a time resolution of 1 h were compared with model forecasts run periodically at 12:00 UTC. The observation database contained gaps for the analyzed periods, therefore the length of the analyzed data was shorter than the length of analyzed time intervals; stations with gaps of more than 50% of data were omitted from the analysis. Information about analyzed periods and number of stations used in the comparison are included in Table 5.

Table 5. Number of stations used in analyses for particular subperiods and data coverage.

Analyzed Period	Data Coverage (%)	Number of Stations
1 January to 30 April 2017	93.8	15
1 September to 31 December 2017	79.4	19
1 January to 30 April 2018	64.8	17

Due to the significant differences in daily temperature ranges between stations located in the valley bottoms and tops, stations were divided into two groups. The value of root mean square error (RMSE), difference (bias), and forecast accuracy were determined on the basis of differences between observation and forecast for each hour and separately for minimum and maximum daily air temperature. Forecast accuracy was calculated for three temperature difference ranges: ±1, ±2, and ±5 °C. The accuracy for a given range specified what percentage of forecast hours were different between forecast and observation below a specified range. In order to make a multifaceted assessment of the quality of the simulation, the results of model verification were graphically presented using a Taylor diagram [31]. This chart allowed us to show three measures commonly used for quality assessment: standard deviation, Pearson's correlation coefficient, and centered pattern RMS difference.

Additionally, for all tested models, predicted vertical temperature gradients were examined for all verified time periods. The value of the vertical temperature gradient determined the state of atmospheric stability, which in turn affected the possibility of smog episodes occurring. Ten pairs of neighboring stations were created to calculate vertical temperature gradients. Detailed information of station pairs for model grids with 1 × 1 km and 2 × 2 km horizontal resolution are presented in Table 6.

Table 6. Station pairs used for vertical temperature gradient analysis.

Pair No.	Number of Top Stations	Number of Valley Stations	Real Altitude Difference (m)	Altitude Difference in Model Domain with 2 km × 2 km Resolution (m)	Altitude Difference in Model Domain with 1 km × 1 km Resolution (m)
1	12	11	620	538	621
2	14	13	323	50	315
3	8	7	1136	971	1150
4	9	6	77	41	72
5	10	19	582	307	434
6	15	16	672	543	669
7	17	18	527	312	448
8	5	1	239	156	192
9	4	1	102	78	104
10	3	2	59	64	50

The representation of difference in altitude between station pairs in the model domain with 1 × 1 km horizontal resolution was significantly better than that for the model domain with 2 × 2 km resolution (RMSE value for both domains was 55 m for kilometric resolution and 160 m for higher resolution).

The model performance was also presented as air temperature courses, with 1 h time resolution, separately for the Kasprowy Wierch Mt. (representing hilltops) and Zakopane (representing valleys), for all three subperiods. Both stations were chosen to represent relief variability of the study area because of the large altitude difference between the stations, limited anthropogenic impact on the natural environment, and relatively small differences between actual and model station altitudes. Additionally, as shown in Tables 7–9, statistical parameters for both stations were close to the mean values for the whole study area.

Table 7. Verification of air temperature forecast for the period 1 January to 30 April 2017.

Station No.	RMSE Value (°C)	Bias Value (°C)	Accuracy of Forecast (%) ±1 °C	±2 °C	±5 °C	Max. Daily Temperature Bias (°C)	RMSE (°C)	Min. Daily Temperature Bias (°C)	RMSE (°C)
Hill and mountain tops									
3	**2.70**	**0.73**	**41.5**	**69.6**	**92.4**	−0.63	**2.33**	**2.42**	**3.72**
8	1.94	0.90	29.9	69.9	99.4	0.19	1.93	1.32	2.08
9	1.87	0.27	45.5	74.3	98.2	**−0.19**	2.04	0.80	1.86
12	**1.61**	**0.21**	**50.8**	**78.8**	**99.5**	−0.31	1.68	0.61	**1.52**
14	2.12	0.00	42.1	70.2	97.5	−0.41	1.98	**0.36**	1.78
15	1.86	1.13	35.9	73.5	98.7	0.55	**1.55**	1.58	2.07
17	1.93	1.14	33.0	70.5	99.3	**0.74**	1.70	1.40	1.86
Mean value	2.00 ± 0.31	0.63 ± 0.43	39.8 ± 6.7	72.4 ± 3.1	97.8 ± 2.3	−0.01 ± 0.48	1.89 ± 0.25	1.22 ± 0.64	2.13 ± 0.67
Valley bottoms									
2	2.66	0.57	38.7	65.9	93.1	−0.74	2.34	2.41	3.64
6	2.36	0.86	41.3	71.1	94.3	0.47	2.16	1.93	3.04
7	2.44	1.09	45.3	68.0	93.3	0.15	**1.75**	2.41	3.45
11	**2.08**	**0.08**	**41.2**	**73.4**	**97.4**	−0.85	1.99	**1.23**	**2.45**
13	2.23	0.58	41.7	67.4	96.2	−0.83	1.94	2.07	3.07
16	**4.08**	**1.67**	**36.1**	**60.0**	**86.0**	0.29	**2.63**	**3.77**	**5.92**
18	2.74	0.95	42.6	67.9	92.2	**0.01**	2.19	2.27	3.79
19	2.81	1.30	40.2	66.6	91.9	0.57	2.18	2.42	**3.80**
Mean value	2.68 ± 0.58	0.89 ± 0.46	40.9 ± 2.5	67.5 ± 3.7	93.0 ± 3.2	−0.12 ± 0.56	2.15 ± 0.25	2.31 ± 0.67	3.64 ± 0.96

Data in bold signifies stations/points with highest and lowest RMSE value in each group.

Table 8. Verification of air temperature forecast for period 1 September to 31 December 2017.

Station No.	RMSE Value (°C)	Bias Value (°C)	Accuracy of Forecast (%) ±1 °C	±2 °C	±5 °C	Max. Daily Temperature Bias (°C)	RMSE (°C)	Min. Daily Temperature Bias (°C)	RMSE (°C)
Hill and mountain tops									
3	1.67	−0.28	48.4	77.3	99.7	−1.26	2.05	0.87	1.97
4	1.59	−0.84	51.0	81.0	99.7	**−1.41**	2.08	−0.43	1.25
5	1.41	−0.22	64.0	87.9	99.2	−1.41	**2.43**	0.36	1.20
8	1.62	0.66	46.2	83.3	99.0	**−0.16**	2.27	1.32	1.88
9	1.36	−0.59	57.3	86.5	100.0	−1.10	1.86	**−0.08**	1.15
10	**2.14**	**1.54**	**22.2**	**57.3**	**99.4**	1.28	2.04	**1.70**	**2.08**
12	**1.30**	**−0.17**	**67.0**	**88.6**	**99.6**	−0.54	1.43	0.40	**1.11**
14	1.77	−0.20	57.2	81.8	97.7	−0.46	1.79	0.18	1.56
15	1.31	0.67	56.6	88.3	99.9	**0.29**	1.28	0.93	1.38
17	1.42	0.90	47.7	86.4	99.9	0.56	**1.28**	1.15	1.69
Mean value	1.55 ± 0.24	0.19 ± 0.68	52.1 ± 11.8	82.3 ± 8.8	99.4 ± 0.6	−0.42 ± 0.87	1.85 ± 0.38	0.64 ± 0.63	1.53 ± 0.34
Valley bottoms									
1	1.55	−0.65	52.2	80.8	99.7	−1.03	1.91	**−0.13**	1.46
2	1.69	−0.40	46.1	78.4	99.7	**−1.46**	**2.14**	0.56	1.69
6	**1.54**	**−0.22**	**52.0**	**81.4**	**99.7**	−0.38	1.45	0.42	1.76
7	2.00	0.66	50.6	74.9	97.7	**−0.22**	**1.38**	**2.04**	2.89
11	1.61	−0.69	42.7	77.7	99.9	−1.37	1.85	0.44	1.71
13	1.81	−0.14	41.3	76.4	98.8	−1.08	1.67	1.11	2.22
16	**2.17**	**0.40**	**45.4**	**72.6**	**96.3**	−0.66	1.67	1.63	2.91
18	1.56	−0.19	52.2	81.6	99.8	−0.77	1.68	0.88	1.95
19	2.08	0.22	53.4	82.1	98.4	−0.44	1.62	1.45	**3.36**
Mean value	1.78 ± 0.23	−0.11 ± 0.43	48.4 ± 4.3	78.4 ± 3.2	98.9 ± 1.2	−0.82 ± 0.41	1.71 ± 0.22	0.93 ± 0.65	2.22 ± 0.63

Data in bold signifies stations/points with highest and lowest RMSE value in each group.

Table 9. Verification of air temperature forecast for the period 1 January to 30 April 2018.

Station No.	RMSE Value (°C)	Bias Value (°C)	Accuracy of Forecast (%) ±1 °C	±2 °C	±5 °C	Max. Daily Temperature Bias (°C)	RMSE (°C)	Min. Daily Temperature Bias (°C)	RMSE (°C)
Hill and mountain tops									
4	1.62	−0.03	46.8	79.4	99.5	−0.88	2.05	**0.65**	**1.52**
5	1.84	0.66	45.3	73.2	99.1	−0.22	2.26	1.29	1.86
8	1.91	1.23	33.5	70.1	99.4	0.36	1.70	1.99	2.44
9	1.58	0.14	47.0	80.9	99.8	−0.42	**1.69**	0.75	1.64
10	**2.85**	**2.30**	**15.4**	**39.6**	**94.1**	**1.68**	**2.45**	**2.44**	**2.83**
12	**1.56**	**0.49**	**52.2**	**81.3**	**99.6**	**−0.02**	1.78	0.85	1.61
14	1.99	0.98	39.3	68.6	98.9	0.62	2.14	1.34	1.93
15	2.01	1.34	35.4	68.2	99.1	0.54	1.75	1.91	2.30
17	2.05	1.50	35.4	64.8	99.0	0.86	1.89	1.80	2.21
Mean value	1.93 ± 0.37	0.96 ± 0.69	38.9 ± 10.3	69.6 ± 12	98.7 ± 1.7	0.28 ± 0.72	1.97 ± 0.26	1.45 ± 0.59	2.04 ± 0.41

Table 9. *Cont.*

Station No.	RMSE Value (°C)	Bias Value (°C)	Accuracy of Forecast (%)			Max. Daily Temperature		Min. Daily Temperature	
			±1 °C	±2 °C	±5 °C	Bias (°C)	RMSE (°C)	Bias (°C)	RMSE (°C)
					Valley bottoms				
1	**1.69**	**0.28**	**46.0**	**78.2**	**99.3**	**0.00**	**1.57**	**0.79**	**1.89**
2	1.97	0.45	42.4	74.7	98.1	**−0.68**	1.89	2.04	2.96
6	1.69	0.49	45.6	76.4	99.4	0.35	1.66	1.24	2.06
7	2.44	1.39	36.0	63.3	95.0	0.40	1.91	2.73	3.51
11	1.93	0.09	40.4	71.0	98.4	−0.41	1.85	1.09	2.40
13	2.22	0.94	37.7	66.3	96.3	−0.24	1.86	2.36	3.20
16	**3.05**	**1.42**	**32.8**	**63.3**	**91.5**	0.29	1.85	**3.29**	**4.90**
19	2.58	1.24	37.7	61.8	94.0	0.67	**2.01**	2.57	3.83
Mean value	2.20±0.44	0.79±0.49	39.8±4.4	69.4±6.1	96.5±2.6	0.05±0.43	1.83±0.13	2.01±0.83	3.09±0.94

Data in bold signifies stations/points with highest and lowest RSME value in each group.

3. Results

Our comparison of air temperature forecasts with observations consisted of (i) results of verification of AROME CMC 2 km for three time intervals: winter/spring, 1 January to 30 April 2017 and 1 January to 30 April 2018; and autumn/winter, 1 September to 31 December 2017 (Section 3.1); (ii) a comparison of observations with two limited-area models: AROME CMC 2 km and HARMONIE-AROME, both with resolution of 2 × 2 km, for verification period 1 January to 16 February 2017 (data for 39 days were available) (Section 3.2); and (iii) a comparison of observations with two kilometric scale models, AROME CMC 1 km and ALARO NH, and operational model AROME CMC 2 km. As models differed with length of forecast, only common time periods (6th to 18th forecast hour) were used for verification. The verification period for the two kilometric scale models was 1 January to 16 February 2017, and data for 31 days were available.

3.1. Evaluation of AROME 2 km

During all three subperiods, following the classification of Niedźwiedź [32], atmospheric circulation conditions can be considered as close to the average pattern. That pattern can be characterized with conditions that are controlled mainly by the atmospheric circulation. As shown by Ustrnul [33], in the study area during the cold part of the year, the differences between standard autumn (September to November) and winter (December to February) were negligible, on average. Advection of air masses from the west prevailed, linked to the activity of both cyclonic and anticyclonic centers of atmospheric pressure. During the standard spring (March to May), no synoptic situation type was prevalent (i.e., all types had similar frequency). However, a typical feature for Central Europe is high variability of the circulation patterns from year to year.

3.1.1. Winter/Spring Period, 1 January to 30 April 2017

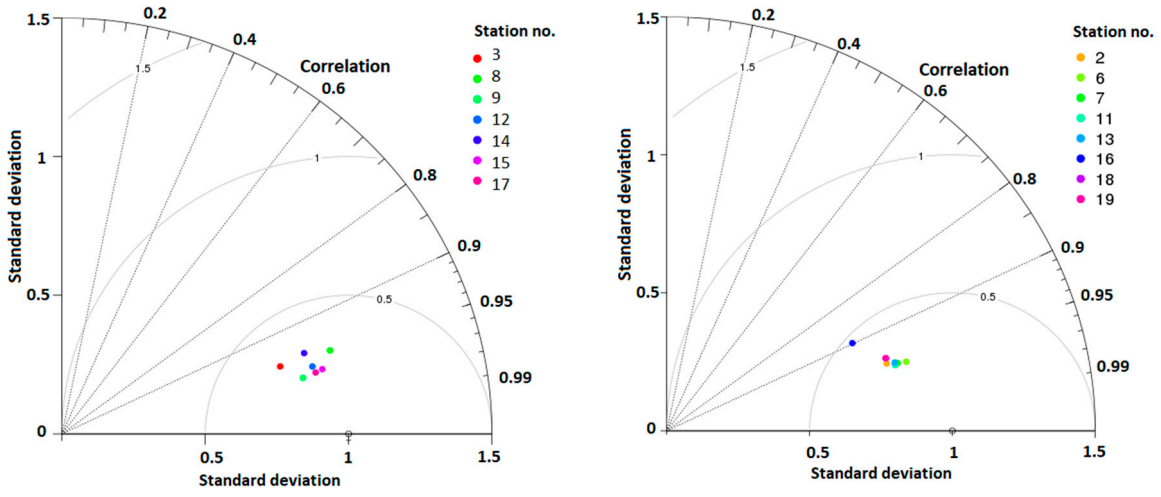
For the first analyzed period, stations 1 (Wandy Bridge), 4 (Kocmyrzów), 5 (Chorągwica), and 10 (Luboń Wielki) were not included in the analysis because of their significant data gaps.

Results of the comparison representing the first winter/spring period are presented in Table 7. Values of RMSE and bias for the analyzed period, daily values of air temperature extremes, and forecasting accuracy for three ranges of temperature differences were presented separately for stations located in valley bottoms and tops. Mean values of most statistical indicators showed that the forecast of air temperature was better for mountain/hill tops than for valley bottoms. One exception was accuracy with a difference range of ±1 °C, for which the parameters for both groups were comparable (tops, 39.8 ± 6.7 %; valleys, 40.9 ± 2.5 %). Forecast accuracy for ranges ±2 °C and ±5 °C was higher for mountain/hill tops.

Lower forecast accuracy for valley stations (ranges ±2 °C and ±5 °C) was probably caused by underestimation of minimal temperatures in the valleys predicted by the model compared to the mountain/hill tops.

This study points out that RMSE value in some cases is not a sufficient indicator to assess forecast quality. The station with the highest RMSE value (No. 3) had better accuracy in the range ±1 °C compared to selected stations with lower RMSE. Compatibility of diurnal temperature range from the model and from the measurements for stations located at the tops was better than that for stations in the valleys, which was caused by better compatibility of forecast minimum air temperature. Mean values of RMSE minimum daily temperature for stations located at the tops were significantly lower than those for stations in valleys. The difference between RMSE values for minimum and maximum daily air temperature for six out of eight analyzed stations (2, 7, 13, 16, 18, and 19) was greater than one. The maximum difference between RMSE values for minimum and maximum daily temperatures was measured for station 16 (difference of 3.29 °C). The minimum difference between RMSE values for minimum and maximum daily observations was 0.16 °C for mountain station 17. Differences in mean RMSE and bias values for maximum daily air temperature between stations located at tops and in valleys were small. Contrary to top stations, the RMSE values for minimum daily air temperature for all valley stations were higher than the values for maximum daily air temperature. The RMSE values for minimum daily air temperature for three mountain stations were lower than the values for maximum daily air temperature.

Additional information is provided by the Taylor diagram presented in Figure 2. Points representing forecast compliance for valley stations were less spread out than points corresponding to forecast errors for stations located at the tops. This indicated that the forecasts for valley stations for all measurement points were similar, with the exception of station 16, for which the forecast error was much larger. The large spread of points corresponding to stations located at the tops indicated their large diversity.



(a) (b)

Figure 2. Taylor diagram for forecast air temperature for (**a**) mountain and hill peaks and (**b**) valley bottoms for the period 1 January to 30 April 2017.

Time series of air temperature for the valley station at Zakopane and the station at the top of Kasprowy Wierch are presented in Figures 3 and 4.

Based on surface pressure charts prepared by IMWM-NRI, two high-pressure system periods on 7–9 and 27–31 January 2017 over the analyzed area were separated. An analysis of those periods indicated higher error of numerical weather prediction for valley stations compared to hill/mountain top stations. The minimum temperature values for those periods were overestimated by as much as 10 °C, which affected the RMSE value representing the whole analyzed period.

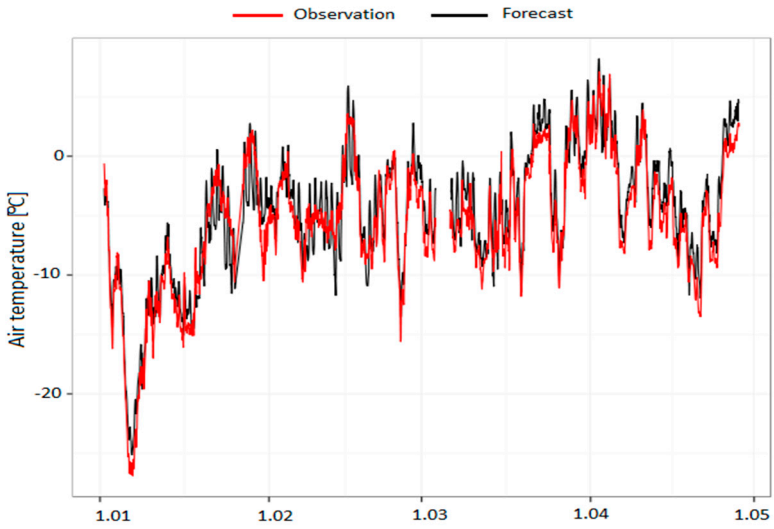


Figure 3. Measured and modeled values of air temperature (2 m above the ground) at Kasprowy Wierch station for the period 1 January to 30 April 2017 for AROME CMC 2 km.

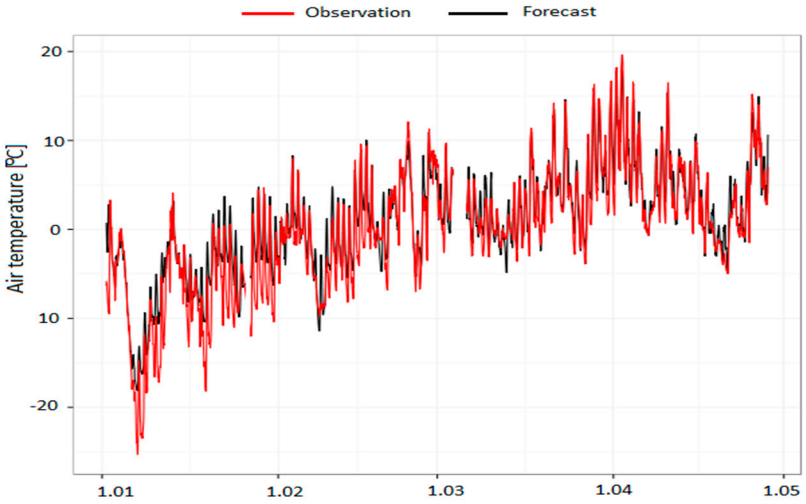
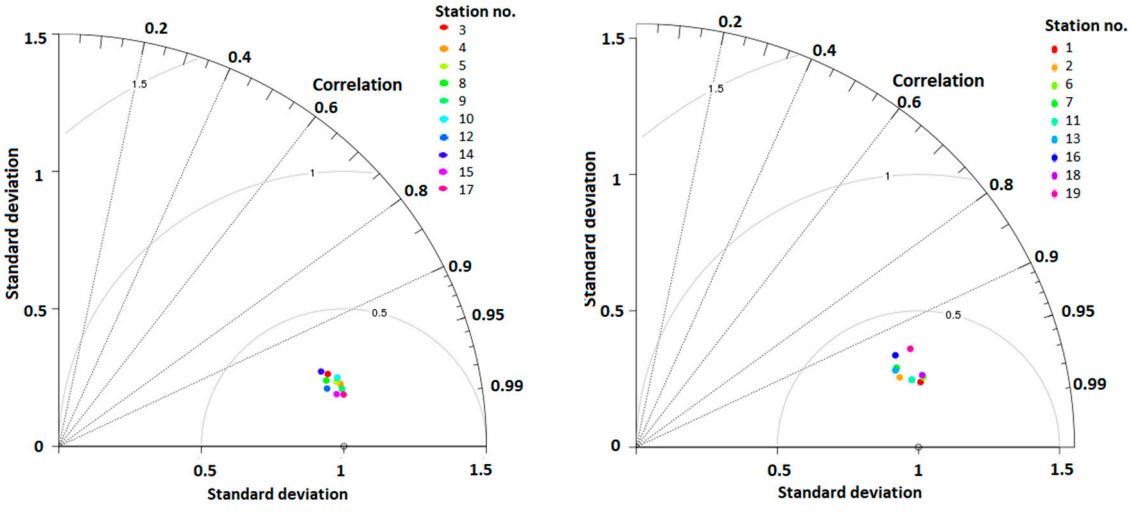


Figure 4. Measured and modeled values of air temperature (2 m above the ground) at Zakopane station for the period 1 January to 30 April 2017 for AROME CMC 2 km.

3.1.2. Autumn/Winter Period, 1 September to 31 December 2017

In the second analyzed period, observation data from all stations were used for verification. Results of the comparison representing the autumn/winter period are presented in Table 8. The analyzed period differed significantly from the first winter/spring period. Mean values of all statistical indicators pointed out better compatibility of the forecast for autumn/winter. Mean values of forecast accuracy for three ranges between a group of valleys and tops were comparable. Analyzing values of RMSE and bias separately for hill/mountain tops and valley bottoms, we can conclude that there was no statistically significant difference between the above parameters characterizing both groups. Mean values of RMSE and bias for extreme daily air temperature for stations located at valleys and tops showed that forecast compliance for the maximum temperature was comparable for both groups. More significant differences were seen for daily minimum air temperature: the average RMSE value for stations located at the tops was lower than the value for stations in valleys. The difference between RMSE values for minimum and maximum daily air temperature for three valley stations (7, 16, and 19) was greater than 1 °C. During the previous analyzed period, the difference in RMSE value for extreme daily temperatures was also higher for the stations mentioned above.

Taylor diagrams in Figure 5 for two groups of stations also showed that the quality of air temperature forecast was comparable for all stations. Points representing forecast compliance for stations located at tops were less spread out than points corresponding to forecast error for stations located in valley bottoms. The highest RMSE value for points at top stations was measured for station 10 (Luboń Wielki). The forecast for station 10 also had the lowest accuracy in the range ±1 °C compared to all stations.



(**a**) (**b**)

Figure 5. Taylor diagram for forecast air temperature for (**a**) mountain and hill peaks and (**b**) valley bottoms for the period 1 September to 31 December 2017.

Figures 6 and 7 present time series of air temperature for valley station Zakopane and the station at the top of Kasprowy Wierch.

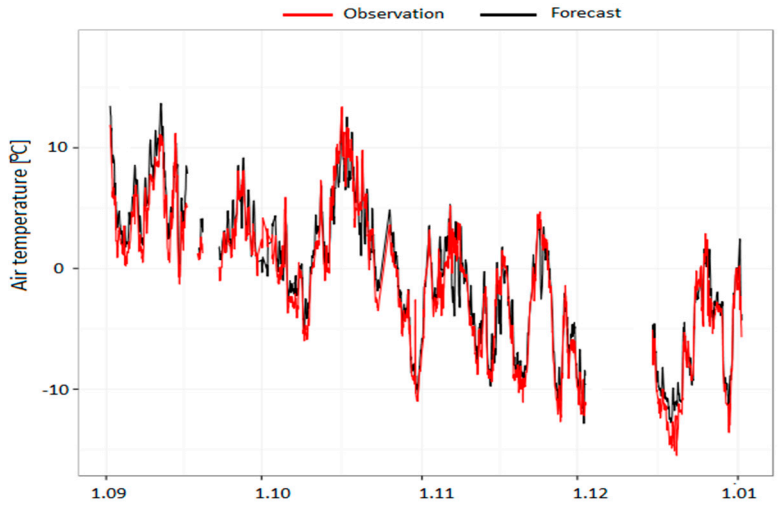


Figure 6. Measured and modeled values of air temperature (2 m above the ground) at Kasprowy Wierch station for the period 01 September to 31 December 2017 for AROME CMC 2 km.

While the diurnal amplitude and synoptic variability of temperature calculated for mountain top stations followed the observations, at the valley station in Zakopane, for two periods (middle of October and second part of November) corresponding to high-pressure system situations, the minimum diurnal temperatures forecast was overestimated compared to the observations.

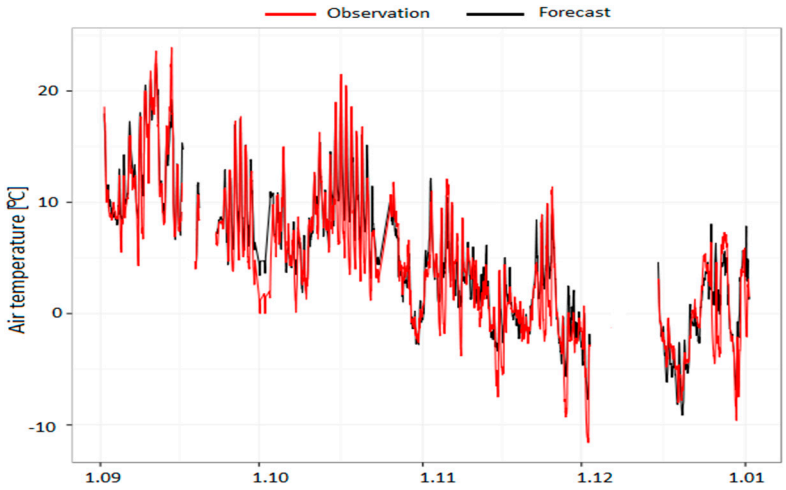


Figure 7. Measured and modeled values of air temperature (2 m above the ground) at Zakopane station for the period 01 September to 31 December 2017 for AROME CMC 2 km.

3.1.3. Winter/Spring Period, 1 January to 30 April 2018

For the last analyzed period, stations 2 and 18 were not included in the analysis because they had significant data gaps. Results of the comparison for stations located in various landforms representing the second winter/spring period are presented in Table 9. Mean RMSE values for all periods and extreme daily values and forecast accuracy for stations located in valleys and at tops were comparable with the values for the first analyzed winter/spring period. The forecast error for the autumn/winter period was significantly lower than for both winter/spring periods. The difference in RMSE values for minimum and maximum daily temperature for five of eight valley stations was greater than 1 °C (stations 2, 7, 13, 16, and 19). Stations mentioned above in the first analyzed period also had a difference in RMSE values greater than 1 °C. The maximum difference of RMSE values for daily extreme temperatures was measured for station 16 (difference of 3.04 °C). Lower RMSE values for minimum daily temperature than for maximum daily temperature for five mountain stations pointed out better compatibility of forecasted minimum than maximum daily temperature for these stations (4, 5, 9, 12, and 14).

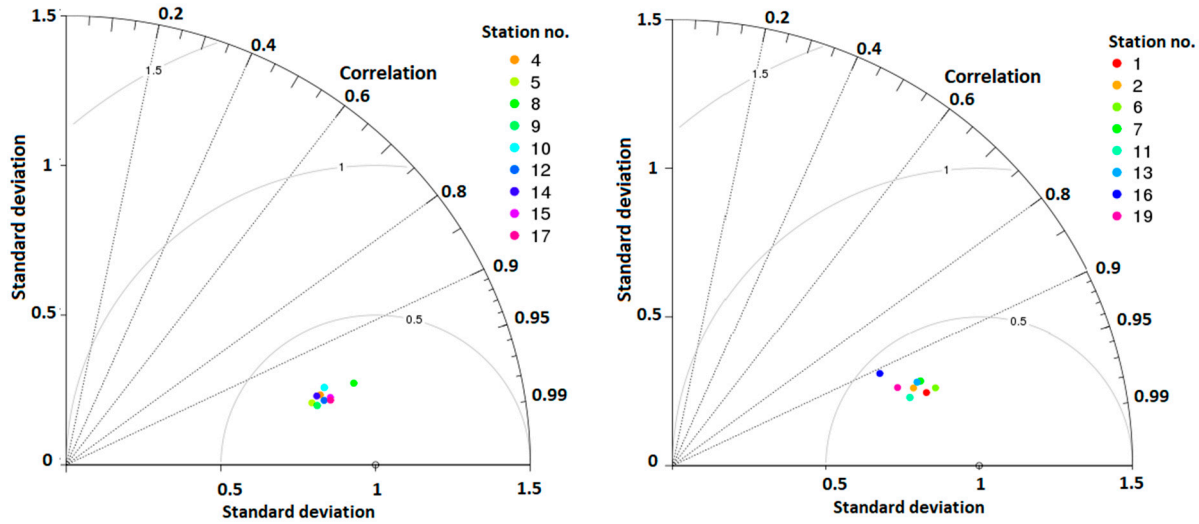
Taylor diagrams presented in Figure 8 point out that the forecast results are better for mountain/hill top than valley stations.

Figures 9 and 10 present time series of modeled and measured values of air temperature at 2 m a.g.l. for the stations in Zakopane and at Kasprowy Wierch Mt. As in the previous winter/spring season, the minimum temperatures for valley stations were often overestimated, which was noticeable in the temperature course for the Zakopane station.

In the period between the end of February and the beginning of March 2018, the southern part of Poland was under the influence of Arctic air. The air mass was transformed into a continental one. In parallel, there was an inflow of Arctic air from the east of the continent. At most of the analyzed stations, very low minimum temperatures were measured. The difference between forecast and measured minimum air temperatures for valley stations was as high as 10 °C. Differences between observed and forecast minimum temperatures for stations located at the tops were smaller than for stations in valley bottoms. The analysis of the forecast cloudiness observed for the synoptic stations at Kraków and Zakopane did not show major differences that would significantly affect the reduction of outgoing longwave radiation.

The comparison of all three subperiods presented above showed relatively good agreement between the model data and measurements and a general similarity between the periods distinguished. However, there were some differences in the statistical parameters for stations representing different landforms. For hilltop stations, mean RMSE values for all periods and for minimum daily air

temperature showed better agreement between forecast and observations than valley stations. As those features can be found for all three periods, it can be assumed that they were typical for the study area. The largest problem with air temperature prediction in the valleys was related to the influence of high-pressure systems, which was shown using cases of synoptic conditions; a more thorough statistical analysis was not possible because the available sample was too small.



(a) (b)

Figure 8. Taylor diagram for forecast air temperature for (**a**) mountain and hill peaks and (**b**) valley bottoms for the period 1 January to 30 April 2018.

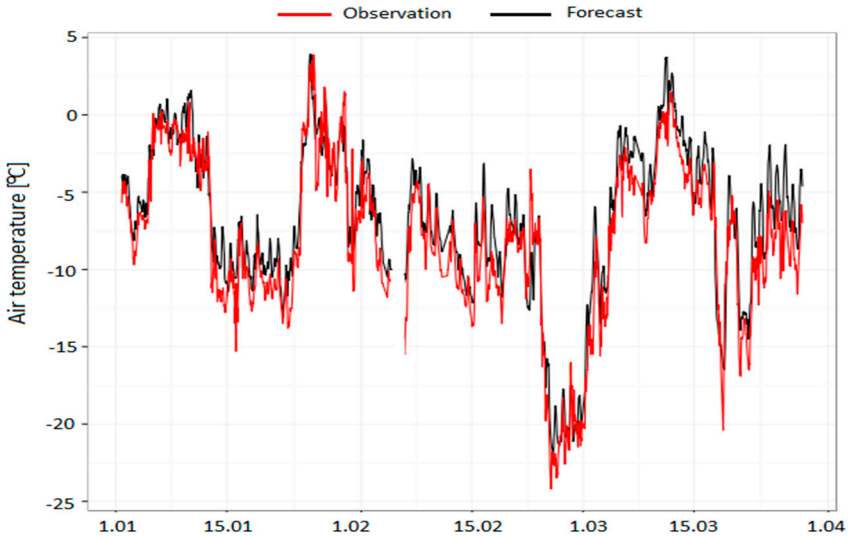


Figure 9. Measured and modeled values of air temperature (2 m above the ground) at Kasprowy Wierch station for the period 1 January to 30 April 2018 for AROME CMC 2 km.

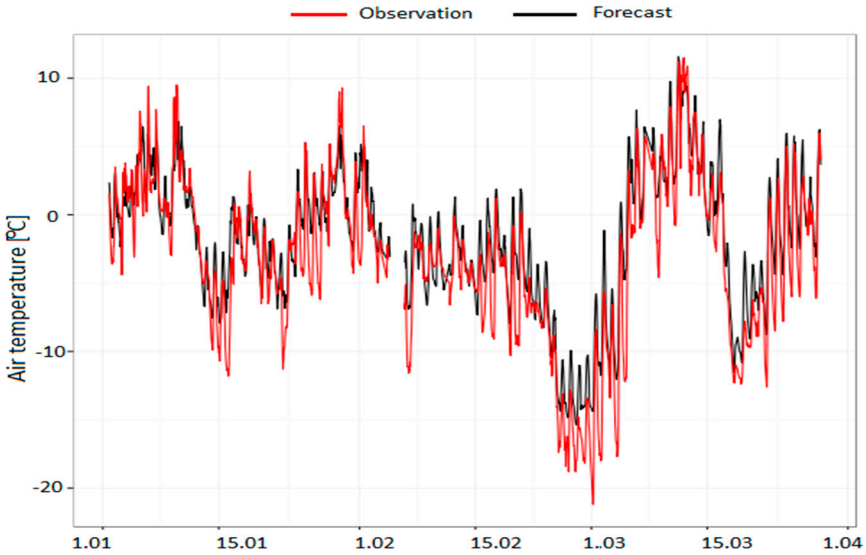


Figure 10. Measured and modeled values of air temperature (2 m above the ground) at Zakopane station for the period 1 January to 30 April 2018 for AROME CMC 2 km.

3.1.4. Temperature Gradient Analysis for AROME 2 km

The RMSE values of temperature gradient calculated based on differences between pairs of neighboring stations were analyzed. Since some stations were not included in the analysis for individual time periods (lack of data), some station pairs were also excluded. For the period 1 January to 30 April 2017, stations pairs 5, 8, and 9 were excluded, and for 1 January to 30 April 2018, stations 7 and 10 were excluded. RMSE values for predicted temperature gradients are presented in Figure 11. Figures 11 and 12 show the numbers of station pairs used for temperature gradient analysis.

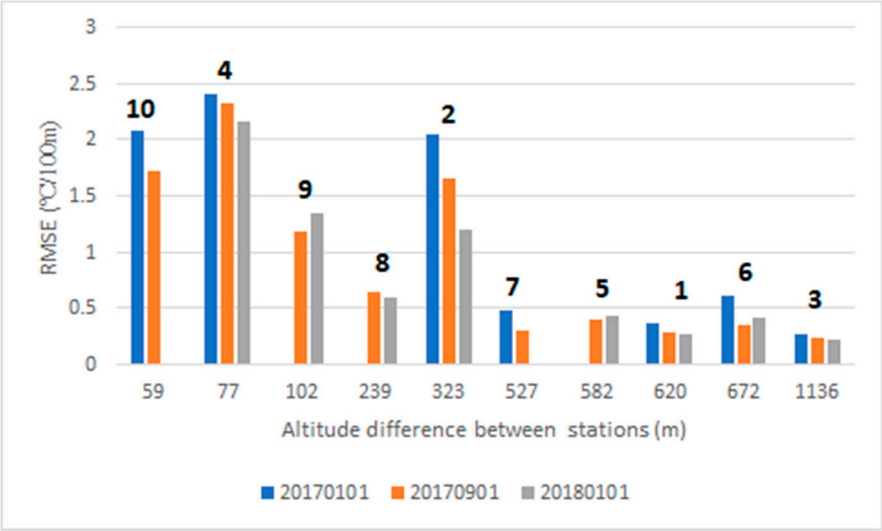


Figure 11. RMSE values for predicted temperature gradients for three analyzed periods.

Obtained RMSE values of temperature gradients were in the range between 0.3 and 2.5 °C/100 m. The highest RMSE values were observed for pairs with the least altitude difference (Figure 11). The bias between observed and predicted gradients by the model had a similar pattern (Figure 12).

It was also noticeable that the temperature gradient predicted by the model was underestimated for most of the station pairs (negative bias values). A possible explanation for such an effect can be uncertainty of station altitude reproduced in the model domain. We can conclude that the prediction of temperature gradient based on station pairs having altitude differences greater than 500 m was

fairly accurate (RMSE < 0.5 °C/100 m, bias < 0.1 °C/100 m), thus the possibility of a smog episode can be reliably predicted by the model using such station pairs.

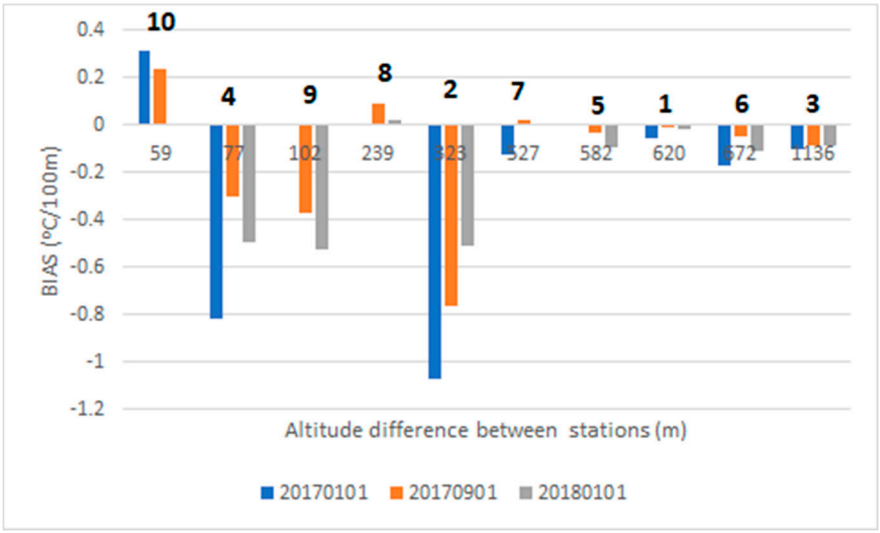


Figure 12. Bias values for predicted temperature gradients for three analyzed periods.

3.2. Comparison of Observations with AROME CMC 2 km and HARMONIE-AROME

In order to improve the quality of numerical prediction for areas with a large diversity of relief, HARMONIE-AROME model tests were performed.

A comparison of observations with two models was performed for the period 1 January to 16 February 2017, which can be evaluated as representative for winter time. According to the calendar of T. Niedźwiedź [33], on 15 days (32% of the days in that period) there were synoptic situations with advection from the west, but no longer periods with the same situation. The advection direction changed every few days. There was a period of a few days with anticyclonic-type atmospheric circulation and no advection, and a smog episode occurred at that time (26–29 January 2017). On 18 days of the period, polar maritime air masses came into the study area, while on 22 days there were polar continental air masses. The period 1 January to 16 February 2017 presented typical conditions of the transitional climate of Central Europe, with large variability of the synoptic situation and frequent changes in advection conditions, which was the reason for frequent changes in weather conditions.

Both models had the same size domain and resolution (2 × 2 km). The verified period was relatively short, therefore only bias and RMSE values were calculated for stations. Data for stations 1, 4, and 5 had many gaps and, therefore, were not included in the analysis. A comparison of observations with models is presented in Table 10. The analysis of RMSE and bias values for the remaining stations, assuming a significance level of 5%, indicated that the differences between the models was statistically insignificant. Stations with the highest and lowest RMSE in both groups (valley bottoms and hill and mountain tops) were the same for both models. The test for the winter period for HARMONIE-AROME pointed out that differences in dynamics and turbulence scheme had no significant impact on improvement of the forecast air temperature at a height of 2 m above ground level compared to the results of AROME CMC 2 km.

Air temperatures from selected stations were used to compare air temperature gradients between pairs of ground stations. For the period 1 January to 16 February 2017, station pairs 8 and 9 were excluded because they had a small amount of data. A comparison of RMSE values for predicted temperature gradients between two models (HARMONIE-AROME and AROME CMC 2 km) presented in Figure 13 pointed out that forecast accuracy for both models was similar.

Table 10. Comparison of observations with HARMONIE-AROME model and AROME CMC 2 km operational model.

Station No.	AROME CMC 2 km		HARMONIE-AROME	
	RMSE (°C)	Bias (°C)	RMSE (°C)	Bias (°C)
Hill and mountain tops				
3	**3.65**	**2.10**	**3.78**	**2.41**
8	3.39	2.19	3.41	2.30
9	2.22	1.31	2.33	1.58
10	2.94	1.62	3.02	1.77
12	**1.96**	**0.16**	**1.88**	**−0.06**
14	2.53	−0.22	2.47	−0.15
15	2.08	1.07	2.02	0.98
17	2.11	1.14	2.20	1.20
Mean value	2.61±0.60	1.17±0.80	2.64±0.64	1.25±0.91
Valley bottoms				
2	3.52	1.90	3.63	2.24
6	**2.17**	**0.40**	**2.11**	**0.14**
7	3.15	1.87	3.27	2.18
11	2.66	1.13	2.64	1.23
13	2.97	1.82	2.97	1.90
16	**5.92**	**3.82**	**6.07**	**4.10**
18	3.79	2.36	3.98	2.62
19	4.06	2.84	4.26	3.15
Mean value	3.53 ± 1.07	2.02 ± 0.97	3.62 ± 1.13	2.20 ± 1.12

Data in bold signifies stations/points with highest and lowest RMSE value in each group.

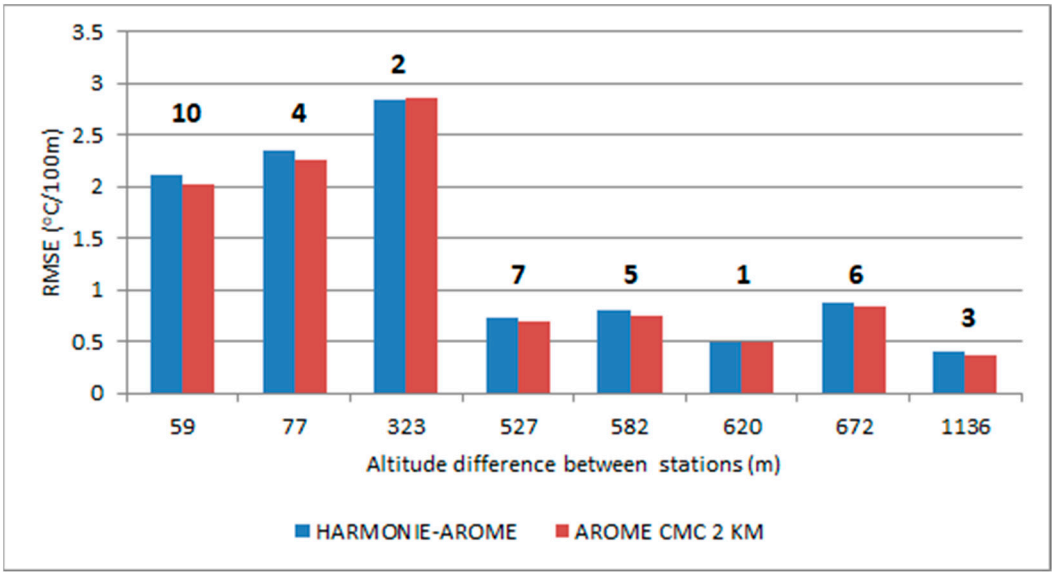


Figure 13. RMSE values for predicted temperature gradients for HARMONIE-AROME and AROME CMC 2 km.

Bias values for predicted temperature gradients shown in Figure 14 were also comparable between HARMONIE-AROME and AROME CMC 2 km. A significantly higher value for station pair no. 2 was caused by high underestimation of altitude difference between stations (difference in model domain was 50 m, while real altitude difference was 323 m).

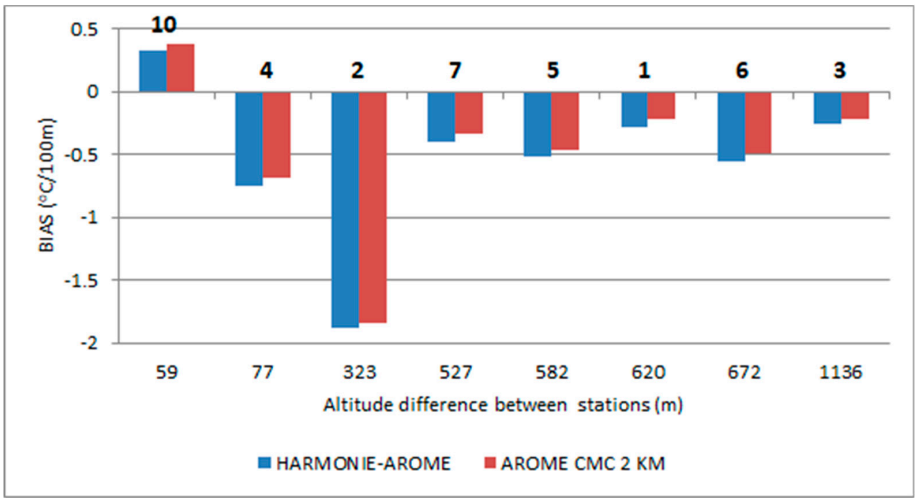


Figure 14. Bias values for predicted temperature gradients for HARMONIE-AROME and AROME CMC 2 km.

3.3. Comparison of Observation with Kilometric Scale Models AROME CMC 1 km, ALARO NH, and AROME CMC 2 km

The previously described test compared the performance of two kilometric scale models to the operational AROME CMC 2 km model used by the Polish group of ALADIN for routine forecast calculation for the analyzed area. If we increase the model resolution and number of vertical levels, we can expect that local dynamic processes like katabatic flow and temperature inversion in the valleys will be better reproduced by the model because of better topography representation, and the denser computational grid can better reproduce small-scale phenomena. For the short winter period, tests of AROME CMC 1 km and ALARO NH (both with 105 vertical levels) were run.

Below are presented the results of the comparison of the AROME CMC 2 km operational model and the two kilometric scale models, AROME CMC and ALARO NH for the period 1 January to 16 February 2017. Data for stations 1, 4, and 5 were not included in the analysis because of many gaps. Table 11 presents the RMSE values and bias error of forecast. RMSE values for all stations were very similar. Despite the fact that AROME CMC 1 km had more vertical levels and better horizontal resolution, differences between the AROME CMC 2 km operational model and the new version were insignificant. Analyzing RMSE values and bias error separately for hill/mountain tops and valley bottoms, we can conclude that differences between models were within the limits of single standard deviation of mean value. The lowest RMSE value for hill/mountain stations was obtained in AROME CMC 1 km, while better forecasting for stations in valley bottoms was obtained by ALARO NH.

Table 11. Comparison of ALARO NH and AROME CMC 1 km kilometric scale models and AROME CMC 2 km operational model.

Station No.	ALARO NH		AROME CMC 1 km		AROME CMC 2 km	
	RMSE (°C)	Bias (°C)	RMSE (°C)	Bias (°C)	RMSE (°C)	Bias (°C)
Hill and mountain tops						
3	3.31	1.81	**3.89**	**2.24**	**3.92**	**2.31**
8	2.94	1.52	3.71	2.63	3.53	2.28
9	**1.91**	**0.05**	1.87	0.86	1.97	1.02
10	2.57	−0.41	1.92	0.46	2.41	0.89
12	2.46	−0.99	**1.55**	**0.07**	1.85	−0.35
14	**3.55**	**−1.95**	2.65	−1.33	2.53	−0.84
15	1.99	−0.34	1.74	0.22	1.72	0.65
17	2.02	0.01	1.57	0.49	**1.68**	**0.72**
Mean value	2.60 ± 0.58	−0.04 ± 1.16	2.36 ± 0.89	0.70 ± 1.17	2.45 ± 0.80	0.83 ± 1.03

Table 11. *Cont.*

Station No.	ALARO NH		AROME CMC 1 km		AROME CMC 2 km	
	RMSE (°C)	Bias (°C)	RMSE (°C)	Bias (°C)	RMSE (°C)	Bias (°C)
Valley bottoms						
2	3.19	1.60	3.82	2.05	3.84	2.13
6	2.73	−1.21	**2.09**	**−1.00**	**2.03**	**−0.25**
7	2.59	1.32	2.66	1.11	2.97	1.50
11	**2.48**	**0.54**	3.04	1.76	2.61	1.09
13	2.67	1.40	3.40	2.61	2.97	1.93
16	**4.71**	**2.38**	**5.71**	**3.37**	**5.95**	**3.58**
18	3.34	1.66	3.40	1.71	3.48	1.78
19	3.38	1.54	4.28	2.62	4.19	2.73
Mean value	3.14 ± 0.68	1.15 ± 1.01	3.55 ± 1.03	1.78 ± 1.24	3.50 ± 1.13	1.81 ± 1.06

Data in bold signifies stations/points with highest and lowest RMSE value in each group.

Observations of air temperature from selected stations were used for verification of temperature gradients; stations pairs 8 and 9 were excluded because they had a small amount of data. Figure 15, containing plots of RMSE values for predicted temperature gradients, pointed out that for altitude difference greater than 500 m, the differences between kilometric scale models and the model with a bigger resolution were small. There was significantly better forecast compliance for kilometric scale models compared with AROME CMC 2 km for station pair No. 2, which was caused by better representation of altitude difference in the model domain. Predicted air temperature gradients for pairs with altitude differences less than 100 m were similar for AROME CMC 2 km and AROME CMC 1 km.

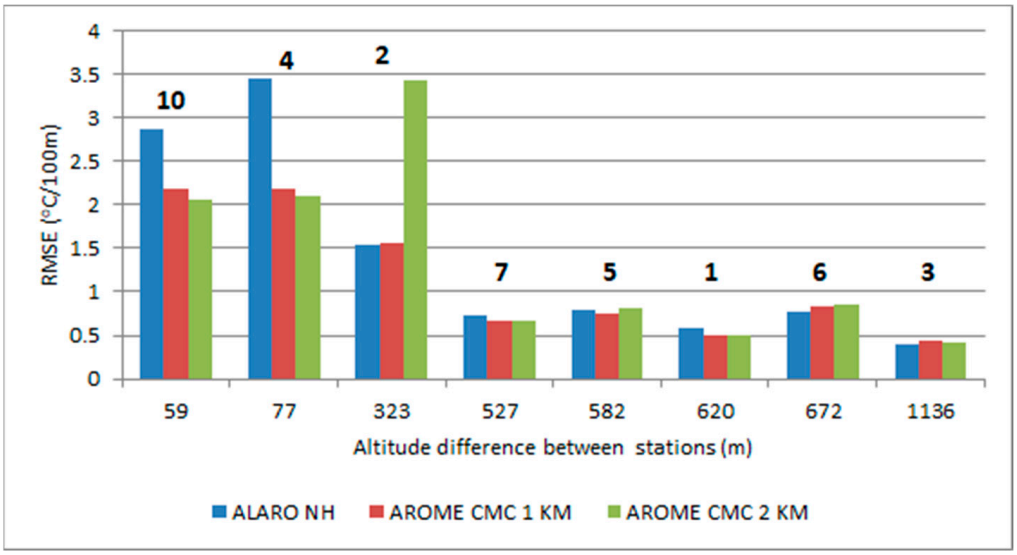


Figure 15. RMSE values for predicted temperature gradients for two kilometric scale resolution models (AROME CMC 1 km and ALARO NH) and operational AROME CMC 2 km as reference.

Figure 16 presents bias values for predicted temperature gradients for three model configurations. Bias for pairs with altitude difference greater than 500 m were comparable, and were slightly underestimated up to −0.6 °C/100 m.

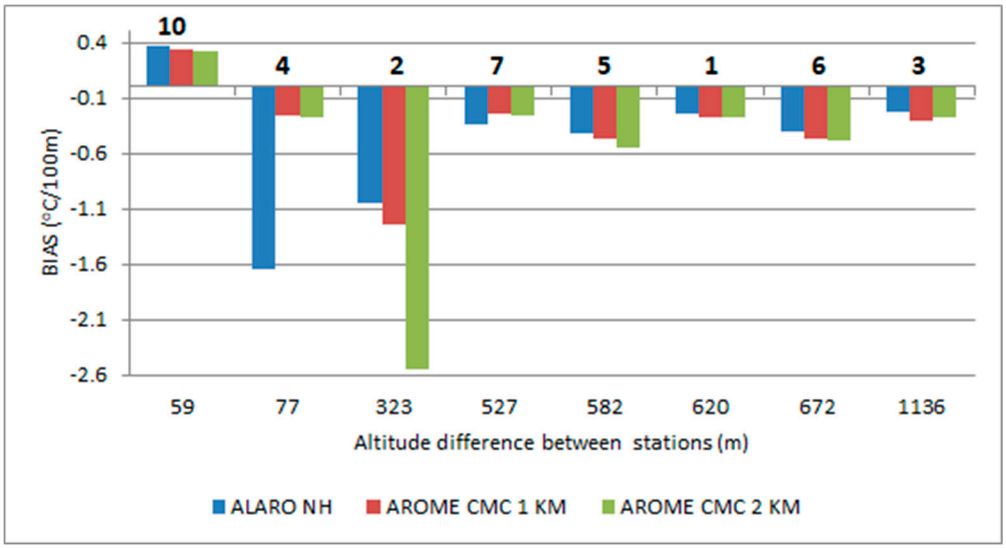


Figure 16. Bias values for predicted temperature gradients for two kilometric scale resolution models (AROME CMC 1 km and ALARO NH) and operational AROME CMC 2 km as reference.

4. Conclusions

One of the aims of this paper was to evaluate the performance of the operational AROME CMC 2 km model, used by IMWM-NRI in the region of the Polish Western Carpathian Mts. The analysis of the results for three time periods (two winter/spring and one autumn/winter) indicates much better compatibility of forecasts for AROME CMC 2 km for hilltop stations than for valley ones. Bigger forecast error is caused by overestimation of the minimum temperatures, particularly visible for stations located in the valley bottoms. The largest differences between forecast and observed minimum temperatures for stations in valleys occurred when the analyzed area was under the influence of strong high-pressure systems. During such synoptic situations, cold air pools often form in the valley bottoms as a result of atmospheric calm or very weak winds and katabatic flows. Therefore, air temperature reaches much lower values than in areas located at a similar altitude but in an open, flat environment. Significant overestimation of the minimum temperature for stations in the valleys indicates errors in the prediction of thermal stratification of atmosphere inside the valleys. The air temperature forecast of AROME CMC 2 km for stations at the tops is better than the forecasts for stations in the valleys. Particularly large differences in forecast error between stations in the valleys and those at the tops occur in the winter season. Despite the problems with forecasting minimum temperatures in the valleys, it has been demonstrated that based on temperature gradients calculated on the basis of station pairs having an altitude difference greater than 500 m, it is possible to reliably predict thermal inversions leading to the formation of smog episodes in the valleys.

The second aim of the paper was to verify the hypothesis that in mountain areas, the increased resolution of the ALADIN-HIRLAM NWP system would significantly improve the accuracy of the air temperature forecast at 2 m above the ground. A comparison of the results of the AROME CMC 2 km operational model with the HARMONIE-AROME model, which uses other turbulence and dynamics, showed no significant improvement in forecast air temperature for stations at the tops and in the valleys. A comparison of the results of the AROME CMC 2 km operating model with a resolution of 1 $\times$ 1 km and more vertical levels (105) did not show significant improvement in forecast temperature as well. One possible reason could be that there were still not enough vertical levels representing air masses in the valleys. It can be improved by redistributing the lowest model levels in future studies. Accurate representation of the vertical profiles of atmosphere is strongly dependent on the amount and location of vertical levels. However, previous studies pointed out that a more important factor for properly forecasting the spatial variability of air temperature in areas with variable topography is horizontal resolution rather than vertical [34,35]

Further works should be aimed at comparing other meteorological parameters affecting thermal stratification in valleys and conducting a deeper analysis of modelling systems to identify the parameters and physical processes affecting the quality of thermal stratification forecasts for areas with complex topography. Analysis of forecasted temperature gradients calculated using pairs of hilltop/valley stations points out that for pairs with an altitude difference greater than 500 m, the temperature gradient prediction is significantly better (RMSE < 0.5 °C/100 m, bias < 0.1 °C/100 m) compared to pairs with a smaller altitude difference.

Author Contributions: The experiment was conceptualized by P.S., A.B., B.B., and M.Z.; Methodology, A.B., B.B., and M.Z.; software, P.S., B.B.; validation, P.S.; formal analysis, P.S., A.B., and M.Z.; investigation, P.S., B.B., and M.Z.; resources, all coauthors; data curation, P.S., A.B., and B.B.; writing—original draft preparation, all coauthors; writing—review and editing, all coauthors; visualization, P.S.; supervision, A.B., B.B., and M.Z.; project administration, P.S.

Funding: This research was partly funded by the EU Project POWR.03.02.00-00-I004/16 (PS) and Ministry of Science and Higher Education subsidy, project no. 16.16.220.842-B02. This research has been partly supported by IMWM-NRI, grant number DS.-M10/2018.

Acknowledgments: We are grateful to both anonymous reviewers for their detailed and constructive comments on the content of the manuscript. The comments allowed us to improve significantly the overall quality of the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Appendix A

Table A1. Height of lowest model levels up to 3 km altitude for 60 and 105 vertical levels used in forecast.

105 Vertical Levels		60 Vertical Levels	
Number of Vertical Level	**Height of Vertical Level (km a.g.l.)**	**Number of Vertical Level**	**Height of Vertical Level (km a.g.l.)**
1	0.009	1	0.01
2	0.029	2	0.035
3	0.051	3	0.072
4	0.075	4	0.124
5	0.1	5	0.196
6	0.129	6	0.289
7	0.16	7	0.405
8	0.194	8	0.546
9	0.232	9	0.714
10	0.273	10	0.91
11	0.318	11	1.134
12	0.367	12	1.387
13	0.42	13	1.67
14	0.479	14	1.983
15	0.542	15	2.327
16	0.611	16	2.701
17	0.686	17	3.105
18	0.767		
19	0.855		
20	0.951		
21	1.054		
22	1.166		
23	1.285		
24	1.414		
25	1.552		
26	1.7		
27	1.857		

Table A1. *Cont.*

105 Vertical Levels		60 Vertical Levels	
Number of Vertical Level	**Height of Vertical Level (km a.g.l.)**	**Number of Vertical Level**	**Height of Vertical Level (km a.g.l.)**
28	2.025		
29	2.202		
30	2.39		
31	2.588		
32	2.796		
33	3.014		

References

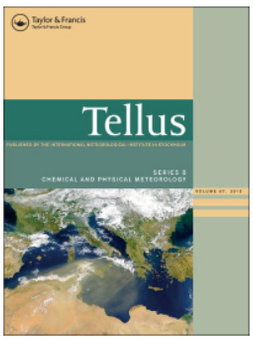
1. Serafin, S.; Adler, B.; Cuxart, J.; Wekker, S.; Gohm, A.; Grisogono, B.; Kalthoff, N.; Kirshbaum, D.; Rotach, M.; Schmidli, J.; et al. Exchange Processes in the Atmospheric Boundary Layer Over Mountainous Terrain. *Atmosphere* **2018**, *9*, 102. Available online: https://www.mdpi.com/2073-4433/9/3/102 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
2. Termonia, P.; Fischer, C.; Bazile, E.; Bouyssel, F.; Brožková, R.; Bénard, P.; Bochenek, B.; Degrauwe, D.; Derková, M.; Khatib, R.; et al. The ALADIN System and its Canonical Model Configurations of cycles CY40T1 and CY41T1. *Geosci. Model Dev.* **2018**, *11*, 257–281. Available online: https://www.geosci-model-dev.net/11/257/2018/gmd-11-257-2018.pdf (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
3. Bengtsson, L.; Andrae, U.; Aspelien, T.; Batrak, Y.; Calvo, J.; Rooy, W.; Gleeson, E.; Hansen-Sass, B.; Homleid, M.; Hortal, M.; et al. The HARMONIE–AROME Model Configuration in the ALADIN–HIRLAM NWP System. *AMS* **2017**, *145*, 1919. Available online: https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/MWR-D-16-0417.1 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
4. Brousseau, P.; Seity, Y.; Ricard, D.; Leger, J. Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2016**, *142*, 2231–2243. Available online: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.2822 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
5. Hagelin, S.; Auger, L.; Brovelli, P.; Dupont, O. Nowcasting with the AROME Model: First Results from the High-Resolution AROME Airport. *AMS* **2014**, *29*, 773–787. Available online: https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/WAF-D-13-00083.1 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
6. Yang, X. Configuration of sub-km Harmonie-nowcasting ensemble, Geophysical Research Abstracts. In Proceedings of the EGU General Assembly, EGU 2018, Vienna, Austria, 4–13 April 2018; EGU2018-16337. Available online: https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-16337.pdf (accessed on 15 March 2019).
7. Amodei, M.; Sanchez, I.; Stein, J. Verification of the French operational high-resolution model AROME with the regional Brier probability score. *Meteorol. Appl.* **2015**, *22*, 731–745. Available online: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.1510 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
8. Czarnecka, M.; Nidzgorska-Lencewicz, J. Impact of weather conditions on winter and summer air quality. *Int. Agrophys.* **2011**, *25*, 7–12. Available online: http://www.old.international-agrophysics.org/en/issues.html?stan=detail&vol=25&numer=1&paper=900&i=2 (accessed on 15 March 2019).
9. Bokwa, A.; Wypych, A.; Ustrnul, Z. Climate Changes in the Vertical Zones of the Polish Carpathians in the Last 50 Years. In *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability, Environmental Science and Engineering*; Kozak, J., Ed.; Springer-Verlag: Heidelberg/Berlin, Germany, 2013; pp. 89–110. Available online: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12725-0_8 (accessed on 15 March 2019).
10. Wypych, A.; Ustrnul, Z.; Schmatz, D.R. Long-term variability of air temperature and precipitation conditions in the Polish Carpathians. *J. Mt. Sci.* **2018**, *15*, 237–253. Available online: https://link.springer.com/article/10.1007/s11629-017-4374-3 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
11. Hess, M. Piętra klimatyczne w polskich Karpatach Zachodnich. *Zesz. Nauk. UJ Pr. Geogr.* **1965**, *105*, 11.
12. Ustrnul, Z. Influence of foehn winds on air-temperature and humidity in the Polish Carpathians. *Theor. Appl. Climatol.* **1992**, *45*, 43–47. Available online: https://link.springer.com/article/10.1007/BF00865992 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]

13. Dąbrowska, K.; Guzik, M. *Atlas of the Tatra Mountains—Abiotic Nature*; Tatrzański Park Narodowy: Zakopane, Poland, 2015.
14. Ustrnul, Z.; Wypych, A.; Henek, E.; Czekierda, D.; Walawender, J.; Kubacka, D.; Pyrc, R.; Czernecki, B. *Meteorlogical Hazard Atlas of Poland*; Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej & Wydawnictwo Attyka: Kraków, Poland, 2014.
15. Niedźwiedź, T. Temperatura i wilgotność powietrza w warunkach rzeźby pogórskiej Karpat (na przykładzie doliny Raby koło Gaika-Brzezowej). *Zesz. Nauk. UJ Pr. Geogr.* **1973**, *32*, 7–88.
16. Oke, T.R. *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*; WMO Report No. 81, WMO/TD No. 1250; WMO: Geneva, Switzerland, 2004; Available online: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1250.pdf (accessed on 15 March 2019).
17. Bokwa, A.; Hajto, M.J.; Walawender, J.P.; Szymanowski, M. Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland. *Theor. Appl. Climatol.* **2015**, *122*, 365–382. Available online: https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-015-1577-9 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
18. Szczęch-Gajewska, M.; Bochenek, B.; Kolonko, M.; Jerczyński, M.; Woyciechowska, J.; Sekula, P. ALADIN in Poland. In Proceedings of the 39th EWGLAM and 24rd SRNWP Meeting, Reading, UK, 2–5 October 2017; Available online: http://srnwp.met.hu/Annual_Meetings/2017/download/monday/posters/poster-EWGLAM2017.pdf (accessed on 15 March 2019).
19. Chambon, P.; Meunier, L.; Guillaume, F.; Piriou, J.; Roca, R.; Mahfouf, J. Investigating the impact of the water-vapour sounding observations from SAPHIR on board Megha-Tropiques for the ARPEGE global model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2015**, *141*, 1769–1779. Available online: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/qj.2478 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
20. Bénard, P.; Vivoda, J.; Mašek, J.; Smolíková, P.; Yessad, K.; Smith, C.; Brožková, R.; Geleyn, J.-F. Dynamical kernel of the Aladin-NH spectral limited-area model: Revised formulation and sensitivity experiments. *Q. J. R. Meteor. Soc.* **2010**, *136*, 155–169. Available online: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.522 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
21. Hortal, M. The development and testing of a new two-timelevel semi-Lagrangian scheme (SETTLS) in the ECMWF forecast model. *Q. J. R. Meteor. Soc.* **2002**, *128*, 1671–1687. Available online: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.200212858314 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
22. Cuxart, J.; Bougeault, P.; Redelsberger, J.-L. A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Q. J. R. Meteor. Soc.* **2000**, *126*, 1–30. Available online: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.49712656202 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
23. Bougeault, P.; Lacarrere, P. Parameterization of orography induced turbulence in a meso-beta-scale model. *Mon. Weather Rev.* 1989, 117, pp. 1870–1888. Available online: https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281989%29117%3C1872%3APOOITI%3E2.0.CO%3B2 (accessed on 15 March 2019).
24. Masson, V.; Seity, Y. Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **2009**, *48*, 1377–1397. Available online: https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2009JAMC1866.1 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
25. Müller, M.; Homleid, M.; Ivarsson, K.I.; Køltzow, M.A.; Lindskog, M.; Midtbø, K.H.; Andrae, U.; Aspelien, T.; Berggren, L.; Bjørge, D. AROME-MetCoOp: A Nordic convective-scale operational weather prediction model. *Weather Forecast.* **2017**, *32*, 609–627. Available online: https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/WAF-D-16-0099.1 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
26. Nielsen, K.P.; Gleeson, E.; Rontu, L. Radiation sensitivity tests of the HARMONIE 37h1 NWP model. *Geosci. Model Dev.* **2014**, *7*, 1433–1449. Available online: https://www.geosci-model-dev.net/7/1433/2014/gmd-7-1433-2014.html (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
27. Masson, V.; Le Moigne, P.; Martin, E.; Faroux, S.; Alias, A.; Alkama, R.; Belamari, S.; Barbu, A.; Boone, A.; Bouyssel, F.; et al. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.* **2013**, *6*, 929–960. Available online: https://www.geosci-model-dev.net/6/929/2013/ (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
28. Gerard, L.; Piriou, J.-M.; Brožková, R.; Geleyn, J.-F.; Banciu, D. Cloud and precipitation parameterization in a meso-gammascale operational weather prediction model. *Mon. Weather Rev.* **2009**, *137*, 3960–3977. Available online: https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/2009MWR2750.1 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
29. Lopez, P. Implementation and validation of a new prognostic large-scale cloud and precipitation scheme for climate and data assimilation purposes. *Q. J. R. Meteor. Soc.* **2002**, *128*, 229–257. Available online:

https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1256/00359000260498879 (accessed on 25 March 2019). [CrossRef]

30. Pergaud, J.; Masson, V.; Malardel, S.; Couvreux, F. A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Bound.-Lay. Meteorol.* **2009**, *132*, 83–106. Available online: https://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/pergaud_etal_2009.pdf (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
31. Taylor, K.E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.* **2001**, *106*, 7183–7192. Available online: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000JD900719 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
32. Niedźwiedź, T. *Kalendarz Typów Cyrkulacji Atmosfery Dla Polski południowej [Calendar of Atmospheric Circulation Types for Southern Poland]*; Silesia University, Chair of Climatology: Sosnowiec, Poland, 2018; a computer file; Available online: http://www.kk.wnoz.us.edu.pl/nauka/kalendarz-typow-cyrkulacji/ (accessed on 15 March 2019).
33. Ustrnul, Z. Warunki Cyrkulacyjne [Atmospheric Circulation Conditions]. In *Klimat Krakowa w XX w. [Climate of Kraków in the 20th Century]*; Matuszko, D., Ed.; Institute of Geography and Spatial Management, Jagiellonian University: Kraków, Poland, 2007; pp. 21–40, (in Polish with English summary); ISBN 978-83-88424-28-1. Available online: https://denali.geo.uj.edu.pl/publikacje.php?id=000112 (accessed on 25 March 2019).
34. Billings, B.; Grubišic', V.; Borys, R. Maintenance of a Mountain Valley Cold Pool: A Numerical Study. *AMS* **2006**, *134*, 2266–2278. Available online: https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/MWR3180.1 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]
35. Chen, Y.; Ludwig, F.; Street, R. Stably Stratified Flows near a Notched Transverse Ridge across the Salt Lake Valley. *AMS* **2004**, *43*, 1308–1328. Available online: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%282004%29043%3C1308%3ASSFNAN%3E2.0.CO%3B2 (accessed on 15 March 2019). [CrossRef]

© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Tellus B: Chemical and Physical Meteorology

ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: https://www.tandfonline.com/loi/zelb20

The impact of a foehn wind on PM_{10} concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland

Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Zbigniew Ustrnul, Mirosław Zimnoch & Bogdan Bochenek

To cite this article: Piotr Sekuła, Anita Bokwa, Zbigniew Ustrnul, Mirosław Zimnoch & Bogdan Bochenek (2021) The impact of a foehn wind on PM_{10} concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland, Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 73:1, 1-26, DOI: 10.1080/16000889.2021.1933780

To link to this article: https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780

Tellus B: 2021. © 2021 The Author(s).
Published by Informa UK Limited, trading as
Taylor & Francis Group

Published online: 22 Jun 2021.

Submit your article to this journal

Article views: 1222

View related articles

View Crossmark data

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=zelb20

Tellus SERIES B CHEMICAL AND PHYSICAL METEOROLOGY
PUBLISHED BY THE INTERNATIONAL METEOROLOGICAL INSTITUTE IN STOCKHOLM

OPEN ACCESS Check for updates

The impact of a foehn wind on PM_{10} concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland

By PIOTR SEKUŁA[1,2], ANITA BOKWA*[3], ZBIGNIEW USTRNUL[2,3], MIROSŁAW ZIMNOCH[1], and BOGDAN BOCHENEK[2], [1]*Department of Applied Nuclear Physics, Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland;* [2]*Institute of Meteorology and Water, Management, National Research Institute, Kraków, Poland;* [3]*Institute of Geography and Spatial Management, Faculty of Geography and Geology, Jagiellonian University, Kraków, Poland*

(Manuscript Received 21 October 2020; in final form 19 May 2021)

ABSTRACT

Kraków, Poland, is a city with poor air quality, located in the large Wisła (Vistula) valley, and affected by a foehn wind from the Tatra Mountains. We analyzed 14 long episodes of the foehn from the periods Sep 2017 - Apr 2018 and Sep 2018 - Apr 2019. Data used included measurements of PM_{10} (i.e. particulate matter with an aerodynamic diameter up to 10 μm) concentrations) concentrations, air temperature and relative humidity, wind speed and direction from ground stations and mast measurements up to 100 m a.g.l., along with model analysis results. A non-operational configuration of the AROME CMC (the Application of Research to Operations at Mesoscale canonical model configuration) 1 km x 1 km was applied. A conceptual model concerning the impact of a foehn on urban air pollution was developed. The occurrence of a particular effect of a foehn on the PM_{10} spatial-temporal pattern depends on its mode of transfer through the city: a. a foehn flows above the valley where a strong cold air pool and a return flow can be found; b. a foehn enters the valley from the eastern, wider part or from the valley top and destroys the cold air pool; c. gravity waves generated by a foehn are strong enough to enter the western narrower part of the valley and cause large spatial differences in turbulence parameters within the city. The first transfer mode worsens air pollution dispersion conditions throughout the city and leads to large increases in PM_{10} levels (from below 50 to 150-200 $\mu g \cdot m^{-3}$), the second mode improves dispersion and leads to large decreases in PM_{10} levels (from 150-200 to below 50 $\mu g \cdot m^{-3}$) throughout the city, and the third generates large spatial differences in PM_{10} levels (50-70 $\mu g \cdot m^{-3}$) within the city. There is no single effect of a foehn on air pollution dispersion conditions.

Keywords: foehn wind, UBL dynamics, PM10, cold air pool, AROME model

1. Introduction

Abundant air pollution with particulate matter (PM) is still a serious environmental and social problem in many cities all over the world, for instance Santiago (Muñoz and Corral 2017), Beijing (Liu et al. 2019), Grenoble (Largeron and Staquet 2016) and Los Angeles (Wang et al. 2017), and PM is currently considered the best indicator for the health effects of ambient air pollution (Burnett et al. 2014; WHO 2016). High PM concentrations are caused by emissions from various stationary and mobile sources, and from chemical reactions between primary and secondary pollutants, but atmospheric conditions are equally important and can significantly modify air pollution dispersion and/or removal (e.g. Seinfeld and Pandis 1998; Prtenjak et al. 2009; Toro A et al. 2019). For example, precipitation has a great impact on concentrations of particulate matter, but it mainly washes out coarse particles while having little effect on fine particles (Li Y. et al., 2015). Foehns are among weather phenomena with great potential for modifying the urban boundary layer (UBL) and thus the atmospheric conditions for air pollution dispersion.

*Corresponding author. e-mail: anita.bokwa@uj.edu.pl

Tellus B: 2021. © 2021 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Citation: Tellus B: 2021, **73**, 1933780, https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780

The impact of foehns on concentrations of air pollution has been studied mainly at a regional scale (e.g. Mira-Salama et al. 2008; Turton et al. 2018; Álvarez and Noel Carbajal 2019); studies at a city scale are rather rare (e.g. Corsmeier et al. 2006; Li X. et al., 2015). However, Vicente et al. (2018) point out that urban air quality is characterized by high spatial and temporal variability, as the factors controlling it (e.g. chemical and physical processes that deliver PM, traffic intensity and the location of buildings and other obstacles) usually vary spatially, too. Therefore, studies on intra-city spatial variations of air pollution levels become crucial from the point of view of habitability and health risk. The present paper has focussed on concentrations of PM_{10}, i.e. particulate matter with an aerodynamic diameter up to 10 µm.

The aim of the paper is to evaluate the importance of a foehn on spatial and temporal changes to PM_{10} concentration in Kraków, southern Poland. Kraków is a large city located in a valley (but outside a mountainous area), with very diversified environmental conditions (described in detail in Section 2), and has very poor natural ventilation. In spite of a significant improvement in aerosanitary conditions after 1989 (e.g. Bokwa 2008), Kraków is still one of the most polluted cities in Europe concerning PM_{10} as it is in the 6% of all European measurement sites where the mean annual limit value of PM_{10} (i.e. $40\,\mu g \cdot m^{-3}$) was exceeded in 2016 (European Environment Agency 2018). The city is located in the Wisła (Vistula) valley, which is parallel to the Carpathian Mountains to the south, and the Wyżyny Polskie (Polish Uplands) to the north (Fig. 1). About 100 km south of Kraków, is the highest ridge of the Carpathians, the Tatra. In a certain synoptic situation, a foehn known as '*halny*' occurs there and brings significant weather changes to the region (Ustrnul 1992b). Ambient air pollution in Kraków has been the subject of numerous studies (e.g. Niedźwiedź and Olecki 1995; Walczewski et al. 1996; Bokwa 2007) and a strong dependence of high PM concentrations on weather conditions has been shown (e.g. Niedźwiedź and Olecki 1994; Tomaszewska 1994; Bokwa 2011). However, little is known about the impact of a foehn on spatial and temporal patterns of PM_{10} pollution in the city. Interactions between foehns and air pollution determined for other world regions or cities show a large variety of effects due to the different atmospheric processes generated, and the strong primary dependence of those effects on local topography. The atmospheric processes linked to foehns which have a significant impact on air quality in urbanized areas include:

1. Intensification of an air temperature inversion in the valley in which a city is located; it can be linked to the occurrence of a so-called 'sandwich' foehn (Vergeiner 2004), or to the formation of an effective lid that traps pollutants in the cold air pool (CAP) below, by reducing the available mixing volume (Drechsel and Mayr 2008); these processes are linked to a high increase in air pollution
2. Removal of the CAP and the penetration of the foehn flow to the valley floor, due to the diurnal heating of the cold pool by solar radiation which may diminish stability and allow vertical mixing, turbulent erosion at the top of the cold pool, or interaction with orographic gravity waves (Drobinski et al. 2007; Flamant et al. 2006); these processes improve air pollution dispersion conditions and decrease its concentration.

Foehn/CAP interaction still poses a major challenge to understanding and predicting local weather and air pollution dispersion conditions, and in Kraków the CAP forms often in areas of the Wisła valley surrounding the city (see Section 2). Therefore, the present study on the role of the foehn on PM_{10} concentrations contributes to general research on the mechanisms of interaction between foehns and local-scale meteorological phenomena, including air pollution dispersion conditions.

2. Study area

Kraków is the second largest city in Poland, located in the Małopolska (Lesser Poland) region, with an area of 326.8 km^2 and 771 000 inhabitants (data from Dec 2018; Statistical Yearbook of Kraków 2019). Kraków agglomeration consists of the city itself and the highly populated towns and villages which surround it; the total number of inhabitants is estimated to exceed one million. The city's area belongs to three different geographical regions and geological structures, i.e. the Polish Uplands, the Western Carpathians, with the basin of the Carpathian Foredeep in between. The central part of the city is located in the Wisła valley at an altitude of about 200 m a.s.l. In the western part of Kraków, the valley is as narrow as one km wide. However, in the eastern part of the city, the valley broadens to about 10 km and there is a system of river terraces. East of the city's borders, the Raba enters the Wisła via a valley cutting through the Carpathian Foothills from south to north. The hilltops bordering the city to the north and south reach about 100 m above the valley floor, similar to the hilltops in the western part of the valley which means that the city is located in a semi-concave basin open to the east, and sheltered from the prevailing westerly winds (Fig. 1). The local-scale processes linked to the impact of relief include katabatic flows, CAP formation, frequent air temperature inversions and a much lower wind speed in the valley floor

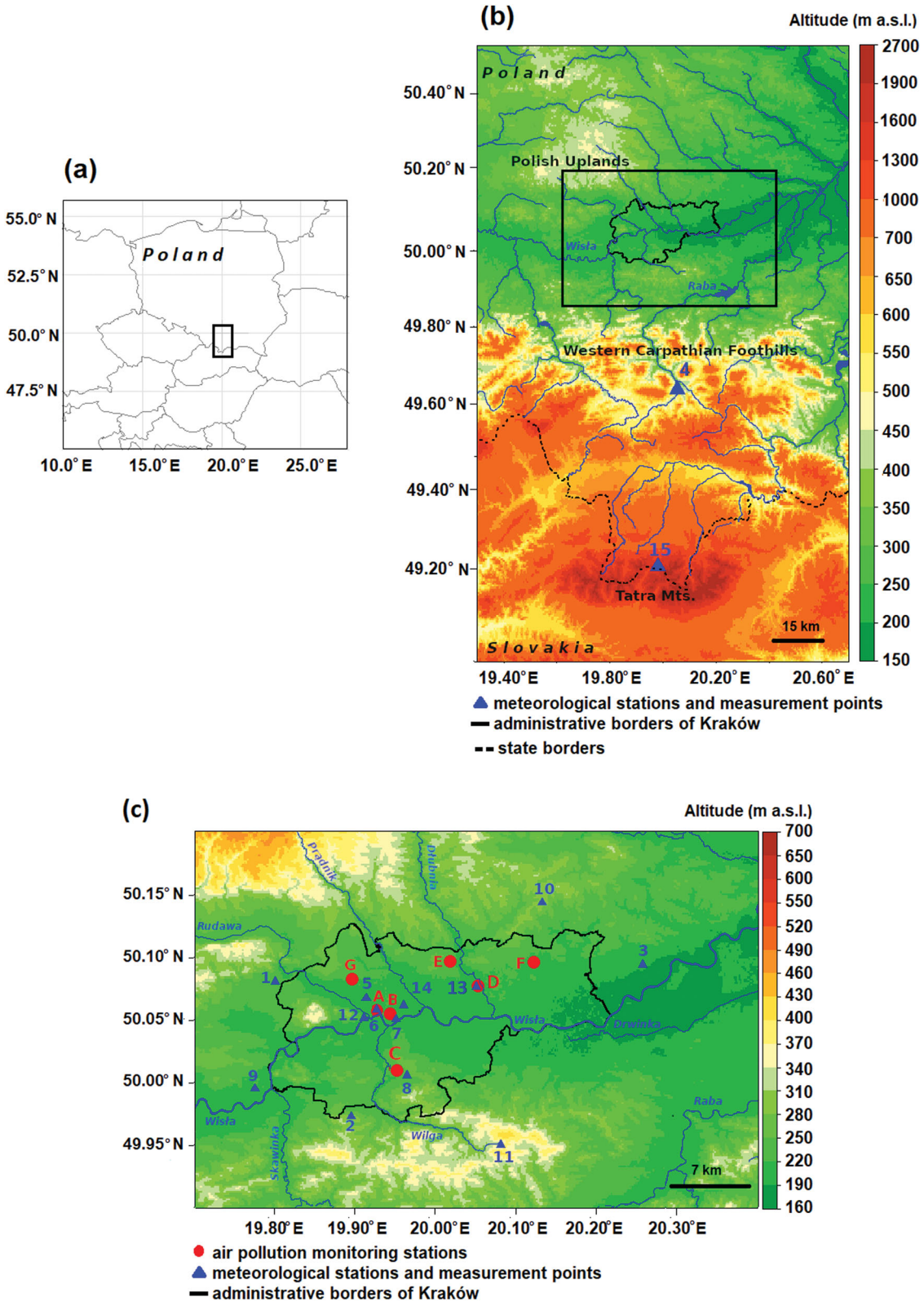


Fig. 1. Location of the region studied: a. in Central Europe, b. in southern Poland, c. at the junction of the Wisła valley, Polish Uplands and the Western Carpathian Foothills.

Key: numbers and letters as in Tables 1 and 2. Topographic data used in Fig. 1 comes from the Shuttle Radar Topography Mission database provided by National Aeronautics and Space Administration (https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/).

Table 1. Location of meteorological stations in Kraków and nearby, Kasprowy Wierch and the meteorological elements used in the research.

No.	Station	Lat N	Lon E	Altitude (m a.s.l.)	Manager of the station	Land form	Elements used
1	Balice	50.08	19.80	237	IMWM-NRI	Valley bottom	V, D, T, RH
2	Libertów	49.97	19.90	314	IMWM-NRI	Hill top	V, D, T, RH
3	Igołomia	50.09	20.26	202	IMWM-NRI	Valley bottom	V, D, T, RH
4	Mszana Dolna	49.66	20.05	440	IMWM-NRI	Valley slope	V, D, T, RH
5	Reymonta St.	50.07	19.91	220	AGH UST	Valley bottom	V, D, T, RH
6	Krasińskiego St.	50.06	19.93	204	JU	Valley bottom	T
7	Słowackiego Theatre	50.05	19.95	215	JU	Valley bottom	T, RH
8	Bojki St.	50.01	19.96	252	JU	50 m above valley bottom	T
9	Jeziorzany	49.99	19.77	211	JU	Valley bottom	T, RH
10	Kocmyrzów	50.14	20.13	299	JU	Hill top	T
11	Chorągwica	49.95	20.08	436	JU	Hill top	T
12	Telecommunication mast (Tower): 2 m a.g.l. 50 m a.g.l. 100 m a.g.l.	50.05	19.91	222 272 322	JU	Valley bottom	T, RH
13	Szkolne district	50.08	20.05	205	JU	Valley bottom	T
14	Botanical Garden	50.05	19.95	206	JU	Valley bottom	V, D, T, RH, cloudiness
15	Kasprowy Wierch	49.23	19.98	1998	IMWM-NRI	Mountain peak	V, D, T, RH

Explanations: AGH UST – AGH University of Science and Technology, JU – Jagiellonian University. More information about the measurement points administered by JU can be found in Bokwa (2010). V – wind speed, D – wind direction, T – air temperature, RH – relative humidity.

than on the hilltops (e.g. Hess 1974). According to Hajto and Rozwoda (2010), who studied sodar data from Kraków at an hourly resolution in the months from October to March, the mean monthly frequency of stable atmospheric conditions varies from 58.1% in March to 74.0% in December. All the factors mentioned contribute to the poor natural ventilation of the city and the occurrence of high PM_{10} levels, especially in the heating season. Analysis of the data on wind speed and direction from three meteorological stations in the Wisła valley (Balice, Reymonta St, Igołomia) and one station on a nearby hilltop (Libertów) for the two cold seasons (Sep 2017 to Apr 2018 and from Sep 2018 to Apr 2019) indicated significant spatial variability due to the complexity of the landforms and the presence of urban structures (Table 1, Appendix 1). In terms of spatial variability, the average frequency of weak winds (up to $2\,m{\cdot}s^{-1}$) varied from 36% in Balice to 59% in Reymonta St; in Libertów and Igołomia the values reached 50%. For a wind speed $\geq 5\,m{\cdot}s^{-1}$, the highest average frequency was measured in Igołomia (12%) and Balice (20%), while in Libertów and Reymonta St it did not exceed 3%. A wind speed $\geq 10\,m{\cdot}s^{-1}$ was noted in Igołomia (26 hourly cases) and Balice (122 hourly cases) – 1% for both analyzed periods only. Dominant wind directions are strongly linked to the impact of relief. In Balice they are SW and NE, in Igołomia and Reymonta St, W and E, while in Libertów, SSW to WNW.

3. Data and methods

The research is based on various data from two sub-periods: Sep 2017 - Apr 2018 and Sep 2018 - Apr 2019. Such sub-periods were chosen because 1. They include the heating season when PM_{10} concentration in Kraków is highest; 2. They include the cold half of the year when foehns occur most often; 3. At the end of 2016, the number of PM_{10} measurement points in Kraków, administered by the National Inspectorate for Environmental Protection, was increased from 3 to 8 which allowed data sufficient for the present research to be obtained.

The delimitation of foehn episodes was carried out using criteria from Ustrnul (1992a). Periods of ***potential foehn*** were determined based on an analysis of measurement data from the meteorological mountain observatory of the Institute of Meteorology and Water Management - National Research Institute (Pol: IMGW-PIB) on Kasprowy Wierch in the Tatra Mountains (1991 m a.s.l.) (Fig. 1b); a potential foehn event was defined as a period

Table 2. Location of air pollution stations in Kraków.

Symbol	Station	Lat N	Lon E	Altitude (m a.s.l.)	Land form
A	Krasińskiego St	50.06	19.93	207	Valley bottom
B	Dietla St.	50.05	19.94	209	Valley bottom
C	Kurdwanów district	50.01	19.95	223	50 m above valley bottom
D	Bulwarowa St.	50.08	20.05	195	Valley bottom
E	Piastów district	50.10	20.02	239	Valley slope
F	Wadów district	50.10	20.12	218	Valley bottom
G	Złoty Róg St.	50.08	19.90	218	Valley slope

when wind speed was $\geq 10\,m{\cdot}s^{-1}$ and wind direction was in a range from SE to SW (i.e. 140–220°).

The next step was the verification of ***foehn occurrence*** in the area of Kraków and nearby. The foehn episodes included in the present study are classical cases according to Hann's theory (1901), however, foehns are complex atmospheric phenomena in both genesis and occurrence (e.g. Brinkmann 1971, Hoinka 2007, Seibert 1990, Gohm and Mayr 2004, Drobinski et al. 2007, Cetti et. al. 2015). In particular, this complexity concerns the assessment of foehn occurrence at weather station level and at particular points or areas. The research area used in the present study has diversified relief and land use/land cover which has a significant impact on climatic conditions at a local scale. In Kraków for periods of potential foehn occurrence they were confirmed if at least one of the following criteria sets was fulfilled (according to measurements in Balice, and/or Libertów and/or Igołomia):

- wind direction: 90–270°, wind speed: $\geq 5\ m{\cdot}s^{-1}$, presence of altocumulus lenticularis clouds;
- wind direction: 90–270°, wind speed: $\geq 5\ m{\cdot}s^{-1}$, relative humidity $\leq 70\%$;
- relative humidity $\leq 70\%$ and the presence of altocumulus lenticularis clouds.

The criteria were established by Ustrnul (1992a,b) for the area of southern Poland from an analysis of synoptic maps and measurement data from the period 1966–1985. Such an approach allowed situations when a foehn occurred somewhere in the whole area from the Tatra Mts to Kraków to be identified. However, it should be mentioned that most probably a foehn impact was not observed at all measurement points of that area as for instance valley floors quite often experience air temperature inversions, and that prevents the entrance of a foehn to such areas.

The duration of a foehn in the Kraków area was defined as the number of consecutive hours when these criteria were fulfilled. The conditions were checked by analysis of measurement data from meteorological stations and measurement points located around Kraków and within the city, as presented in Table 1. Observations of altocumulus lenticularis clouds were obtained from the climatological station of the Jagiellonian University in the Botanical Garden in Kraków. Fig. 1 shows the location of the meteorological stations and measurement points.

Potential foehn episodes were divided into long (>24 h) and short (≤24 h), and only the long ones were included in further analyses.

There were 14 long episodes which all together lasted for 591 hours and occurred on 40 days (Appendix 2). Altocumulus lenticularis clouds were found during 13 out of 14 long foehn episodes and provided a visible proof of foehn occurrence in the study area even if at the station level the foehn impact was not detectable for example due to the impact of the relief. The episodes studied can be considered 'deep' foehn cases, following the criteria of Zängl (2003) and Gohm and Mayr (2004) from an analysis of synoptic maps for long foehn episodes.

Data on PM_{10} concentrations come from the data bases of the National Inspectorate of Environmental Protection (https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives). Mean hourly and daily concentrations for the sub-periods Sep 2017 - Apr 2018 and Sep 2018 - Apr 2019 from seven measurement points located in Kraków were used (Fig. 1, Table 2). The measurement points represent several parts of the city, located on various types of landform and land use/land cover (see Fig. 1 for the location of the measurement points):

A. Krasińskiego St: street canyon in the city center on the floor of the Wisła valley, with a very busy municipal transportation route and intensive traffic;
B. Dietla St: a busy inner ring road in the city center on the floor of the Wisła valley, with intensive tram, bus and vehicular traffic;
C. Kurdwanów district: suburban area in a large district of blocks of flats in the southern part of the city, about 50m above the valley floor;
D. Bulwarowa St: suburban area in a large district of blocks of flats, located close to the steelworks in the eastern part of the city, on a terrace of the Wisła;

E. Piastów district: suburban area in a large district of blocks of flats in the eastern part of the city, on the slopes of the Wyżyny Polskie (Polish Uplands), about 50m above the valley floor;
F. Wadów district: suburban area with agriculture activity and scattered residential buildings located close to the steelworks, on a river terrace in the eastern part of the Wisła valley;
G. Złoty Róg St: suburban area in a large district of blocks of flats and residential buildings, on the slope of the Wyżyny Polskie (Polish Uplands) in the western part of the city.

The other measurement point operated by the National Inspectorate of Environmental Protection, i.e. in Swoszowice district, was not taken into consideration due to large gaps in its data base. The general features of the spatial variability of PM_{10} concentrations, shown below with daily data, give the background for an analysis of hourly data in the context of foehn impact. The PM_{10} levels in the study periods were not only relatively high but they also showed significant spatial variability within the area of Kraków. The number of days with a mean daily PM_{10} level $\geq 50\,\mu g{\cdot}m^{-3}$ (i.e. exceeding the allowed value), was highest in Krasińskiego St at 275 days, which is 57% of all days in the periods analyzed (i.e. Sep 2017 - Apr 2018 and Sep 2018 - Apr 2019). For other measurement points, the percentage of such days varied from 38% in Dietla St to 24% in the Wadów district (Appendix 2). Additionally, the only case of a mean daily concentration above $200\,\mu g{\cdot}m^{-3}$ was noted in Krasińskiego St at $224\,\mu g{\cdot}m^{-3}$ on 5th Mar 2018.

Spatial variability of PM_{10} concentrations can also be shown as the difference between the lowest and the highest concentrations noted at measurement points at specific times. On 47 days in total (i.e. 10% of the study period), differences of mean daily PM_{10} concentration exceeded $50\,\mu g{\cdot}m^{-3}$, and the greatest difference was $136\,\mu g{\cdot}m^{-3}$ on 5th Mar 2018 between Krasińskiego St ($224\,\mu g{\cdot}m^{-3}$) and Wadów district ($88\,\mu g{\cdot}m^{-3}$). On 181 days (37%) differences in mean daily PM_{10} concentration were from 25 to $49\,\mu g{\cdot}m^{-3}$. These data additionally demonstrate a high spatial variability of PM_{10} levels within the city. The comparison of data on foehn occurrence and PM_{10} indices shows that differences of mean daily PM_{10} concentrations in the ranges of 25-50 $\mu g{\cdot}m^{-3}$ and 51-75 $\mu g{\cdot}m^{-3}$ are much more frequent during foehn episodes (43% and 16%) than for non-foehn periods (35% and 5%). During the study period, there were 56 days with potential conditions for a foehn based on data from Kasprowy Wierch. For 67% of them, the mean daily PM_{10} concentration allowed (i.e. $50\,\mu g{\cdot}m^{-3}$) was exceeded at one measurement point at least in Kraków; and for 14% of days, the maximum difference in PM_{10} mean daily concentrations between measurement points exceeded $50\,\mu g{\cdot}m^{-3}$. The figures for the whole period (i.e. both foehn conditions and non-foehn) were 57% and 10% respectively. During foehn periods, the share of the mean daily concentration above $50\,\mu g{\cdot}m^{-3}$ is larger at stations in the western part of the city than during non-foehn periods: in Krasińskiego St by +8%, in Dietla St by +18%, and in Złoty Róg St by +3%; while at other stations the share is smaller than during non-foehn periods. Therefore, a foehn can be considered as one of the factors which determine elevated PM levels in the western part of Kraków. On the other hand, mean daily concentrations of PM_{10} for days with foehn conditions and for all other days of the study period do not differ very much; the values for days with a foehn vary from $64\,\mu g{\cdot}m^{-3}$ in Krasińskiego St to $35\,\mu g{\cdot}m^{-3}$ in the Wadów district, while for the whole study period from $61\,\mu g{\cdot}m^{-3}$ in Krasińskiego St to $38\,\mu g{\cdot}m^{-3}$ in the Wadów district.

In order to analyze the impact of the foehn on the UBL and PM_{10} dispersion conditions in Kraków during long foehn episodes, model analysis outcomes were used, in addition to the measurement data described above, so as to obtain three-dimensional information for the area of the whole city and surrounding areas. *Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International* (ALADIN) is a numerical weather prediction (NWP) system developed by the international ALADIN consortium for operational weather forecasting and research purposes (Termonia et al. 2018). Part of the consortium's development work is to provide several configurations of a limited-area model (LAM), precisely validated to be used for operational weather forecasting at the 16 partner institutes. These are called the ALADIN canonical model configurations (CMCs).

Currently there are three canonical model configurations: 1. ALADIN baseline CMC, 2. Application of Research to Operations at Mesoscale (AROME) CMC, and 3. ALADIN–AROME (ALARO) CMC. AROME 2 km x 2 km grid spacing and ALARO 4 km x 4 km grid spacing, both with 60 vertical levels, are operationally used in IMGW-PIB. Non-operational configuration of AROME with 1 km x 1 km grid spacing and 87 vertical levels (AROME CMC 1 km) was applied in the present study as a better solution for the determination of the foehn effect on the UBL in Kraków, using lateral boundary data from ALARO 4 km x 4 km grid spacing. The size of the AROME CMC km domain was 810×810 points centered on 20°E 50°N. The location of the lowest model level is 9 m a.g.l., and the highest is at 50 km a.g.l. Details concerning the height of the lowest model levels up to 3 km altitude, information about the parametrization schemes used in the AROME model and a

topographic map of the model domain are included in Appendices 4, 5 and 6. Due to ongoing work on the assimilation of surface data in the ALARO model in the ALADIN Poland group, data assimilation was not used in this research, and models were run in dynamical adaptation mode. The data obtained with the model were used to provide vertical profiles of wind speed and direction, air temperature and relative humidity, with a one-hour temporal resolution, in points representative for the western, central and eastern parts of the city, corresponding to measurements in Balice, Krasińskiego St and Bulwarowa St, respectively (see Fig. 1 and Tables 1 and 2 for their location). Additionally, N-S cross-sections through the valley at those points were obtained for the same elements. For selected cases, wind and air temperature fields at selected levels were obtained for Kraków and surrounding areas.

Verification of forecast results was performed for 24-h periods (beginning from the 7th hour of the forecast) for 40 selected days in the period during which the 14 long foehn episodes occurred. Data obtained from four meteorological stations (Balice, Libertów, Igołomia and Reymonta St) were used to verify the model forecast for air temperature, relative humidity and wind components on the valley floor and at the hill top nearby. The value of root mean square error (RMSE), difference (bias), and forecast accuracy were determined on the basis of differences between observation and forecast for each hour. Forecast accuracy was calculated for three difference ranges for all meteorological components (air temperature – 826 cases of one-hour observations; relative humidity – 826 cases; and wind components – 772 cases). For air temperature and wind speed the ranges were set to ±1, ±2, and ±5 °C or m·s^{-1}, and for relative humidity and wind direction they were set to ±10, ±20, ±30% and ±20, ±50, ±90°, respectively. The accuracy for a given range specified the percentage of forecast hours when the difference between forecast and observation was below a specified range. Detailed information of model verification with meteorological stations measurements are included in Appendices 7 and 8. Appendix 8 presents wind roses based on forecast and measurements for two stations: one in the Wisła valley and one on a hill top.

Air temperature and relative humidity measurements (747 cases of one-hour observations) at 50 and 100 m a.g.l. from a telecommunication mast were used to verify the model forecast of atmosphere stratification in the western part of the Wisła valley. Values of RMSE and bias for air temperature and relative humidity for both altitudes (i.e. 50 and 100 m a.g.l.) are similar. Accuracy of air temperature in the range ±2 °C was equal to 87%, and for relative humidity accuracy in the range ±10% was higher than 80%. Differences between the forecast and observed air temperature gradients between 50 and 100 m a.g.l. were in the range ±1 °C/100m for 65% of cases. Differences between forecast and measured relative humidity gradients were in the range ±5%/100 m for 69% of cases. The verification procedure confirmed the convergence of model forecast results with observations, i.e. the AROME model properly presented spatial and vertical variations of meteorological conditions in the Wisła valley.

The first step of data analysis in a particular foehn episode was to distinguish the phases of PM_{10} concentration changes. Four spatial-temporal patterns of PM_{10} concentration, found in various episodes, were defined (Fig. 2): 1. a sudden large increase of PM_{10} concentrations at all measurement points; 2. a sudden large decrease of PM_{10} concentrations at all measurement points; 3. short-term peaks or long-term periods of high PM_{10} concentrations in the western part of the city only; 4. long-term periods of high PM_{10} concentrations at all measurement points.

For each phase of each episode, all measurement and model data were analyzed in order to define the mechanisms responsible for a certain type of PM_{10} pattern. All available data on air temperature and relative humidity, from both measurements and the model, were used above all to determine whether a CAP was formed in the valley or not, and what its vertical extent was. Then the data were used to observe changes of UBL properties in the valley. To study the dynamics of turbulence, vertical Turbulent Kinetic Energy (TKE) fields from the AROME model were used (Termonia et al. 2018), as this type provides information about mechanical turbulence and convection potential. All available data on wind speed and direction were used to trace the occurrence of a foehn in the study area, its impact on the CAP, the parallel occurrence of katabatic flows and local winds modified by the relief. The next section presents the characteristics of each PM_{10} pattern, together with the mechanisms which modified the UBL and PM_{10} dispersion conditions.

4. Foehn-linked mechanisms generating spatial-temporal patterns of PM_{10} concentrations in Kraków

Within the 14 foehn episodes, for PM_{10} spatial-temporal Pattern no. 1 there were 8 cases; for Pattern no. 2 – 11 cases; for Pattern no. 3 – 15 cases; and for Pattern no. 4 – 3 cases. Usually, there were different patterns and cases of each pattern during each episode. The processes decisive for PM_{10} level changes were different in each pattern, and that is why no single index could be used to characterize all situations.

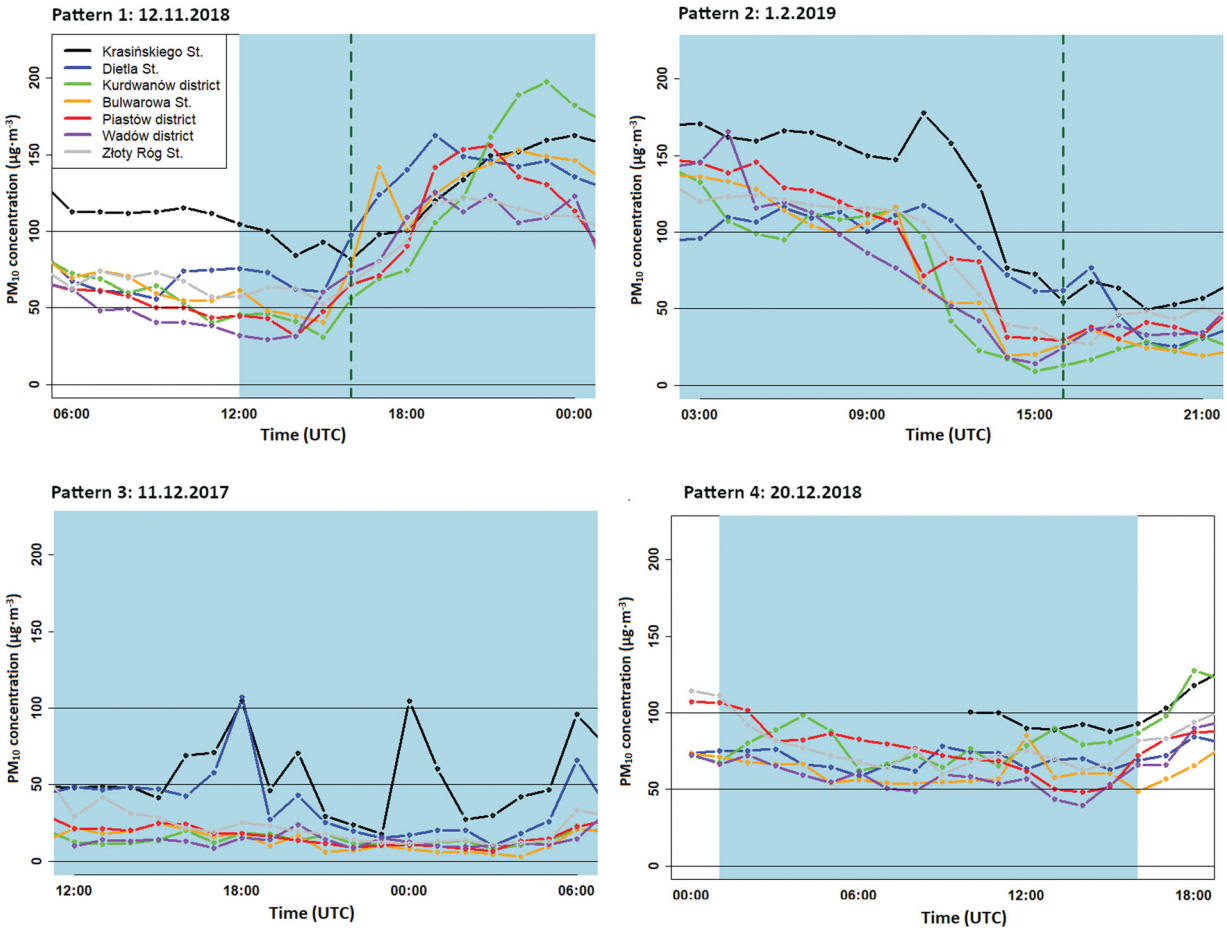


Fig. 2. Examples of the four spatial-temporal patterns of PM10 concentration.
Key: blue background: foehn period; green dashed line: occurrence of altocumulus lenticularis cloud.

4.1. Pattern 1: a sudden large increase of PM_{10} concentration at all measurement points

A PM_{10} increase case was considered a sudden and a large one if the concentration changed from allowed levels (i.e. below 50 $\mu g \cdot m^{-3}$) to about 150-200 $\mu g \cdot m^{-3}$ within 3-5 hours (see example on 12/13.11.2018 - Fig. 3e). In all cases, PM_{10} increase was linked to the development of an air temperature inversion in the Wisła valley. The air temperature difference between a level of 2 m a.g.l. and 100 m a.g.l. in the western part of the valley (at the telecommunication mast) reached from about 4 °C to as much as over 10 °C. At the same time, relative humidity reached 80-90% on the valley floor in rural areas which indicates fog occurrence, as the values were decreasing quickly with height. Wind speed inside the valley was below 3 $m \cdot s^{-1}$ while at about 100 m higher (i.e. above the valley) it increased to 6-8 $m \cdot s^{-1}$ (situation for the city centre - Fig. 3c). Warm and dry air streams, generated by the foehn, did not enter the valley but went above it to the north which contributed to the increase of the air temperature inversion (Fig. 3a-b - situation for the city centre). Additionally, in the western part of the valley, a weak northerly wind was observed but at station level only. The data indicate that there was a CAP on the valley floor which formed a stable air layer. The stability was further strengthened by katabatic flows from the slope of the Uplands presented in Fig. 4. Winds from the southern sector were forecast only on hill tops and selected parts of the valley, while in many lower parts of the valleys located on north-facing slopes, NW-NE light winds were predicted. They did not exceed 2 $m \cdot s^{-1}$ and they resulted from the orographic reflection of air streams coming from the south. This is an example of a phenomenon described for instance by Sheridan (2019), i.e. a dense current-like return flow of air within and beneath an inversion (katabatic flows from the slope of the Uplands). It is worth mentioning that such a change of wind direction due to reflection can be seen in many parts of the Western Carpathians during foehn episodes and also that areas north of Kraków, are highly

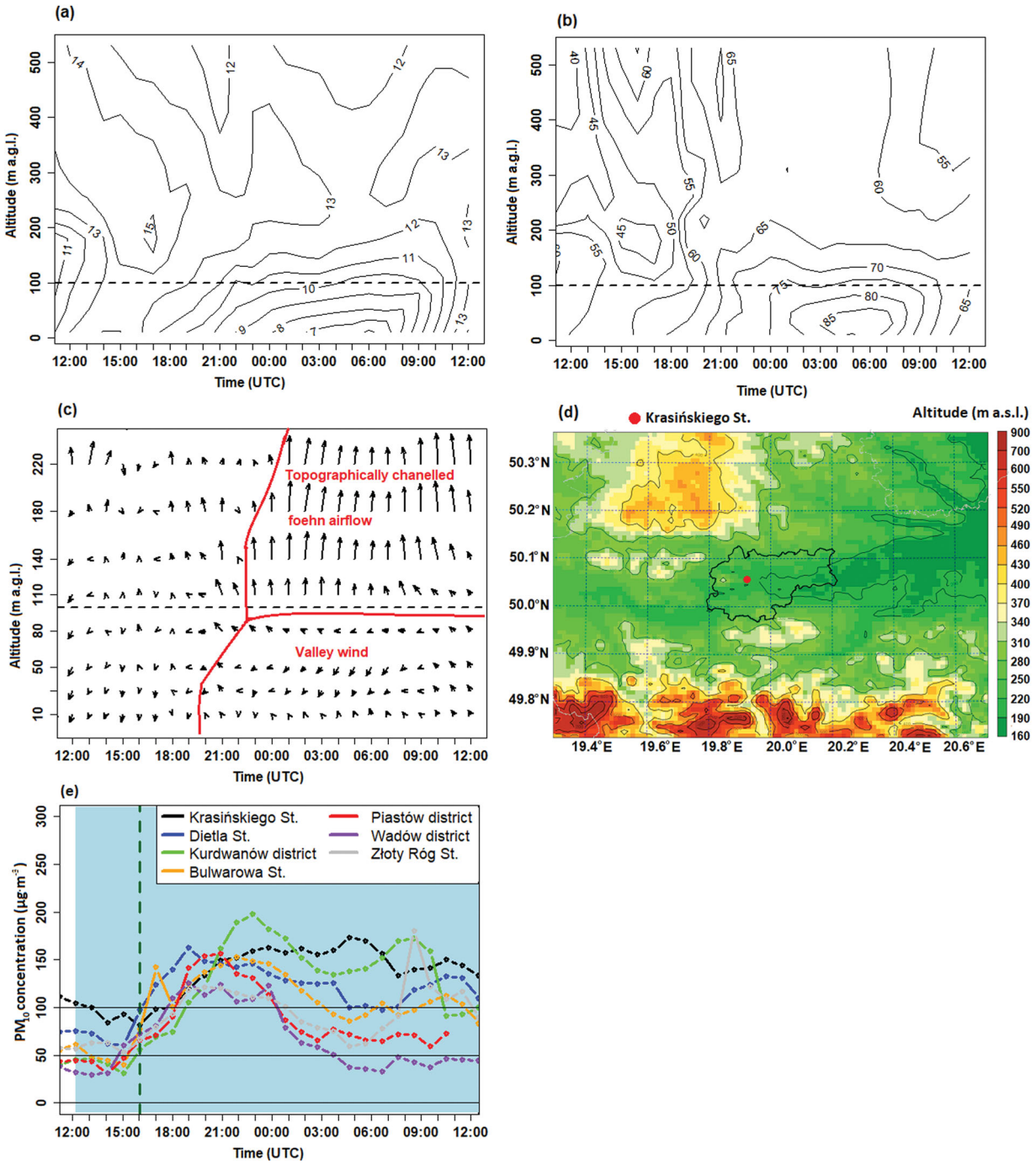


Fig. 3. Vertical profiles of a. air temperature (°C); b. relative humidity (%); c. wind components for the location of PM_{10} monitoring station in Krasińskiego St; d. location of station in Krasińskiego St on a topographic map from the AROME model; e. spatial-temporal patterns of PM_{10} concentration on 12/13.11.2018.

Key: horizontal dashed black line for Fig. 3a-c: the Wisła valley height; blue background for Fig. 3e: foehn period; green dashed line for Fig. 3e: occurrence of altocumulus lenticularis cloud.

populated and deliver a lot of air pollution. Therefore, katabatic flows which enter the city from the north, contain a lot of PM_{10} and significantly worsen aero-sanitary conditions of Kraków. The foehn reduced available mixing volume and trapped the pollutants emitted inside the valley within a CAP, a mechanism described for instance

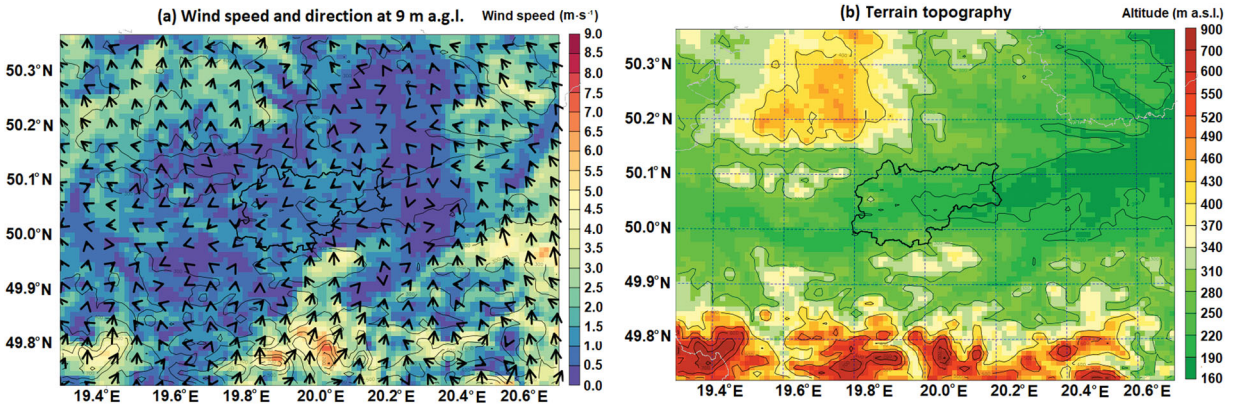


Fig. 4. Predicted wind speed and wind direction at 9 m a.g.l. from the AROME model at 19 UTC (a) (12.11.2018), and topographic map of terrain (b).
Key: thin lines: elevation; thick line: administrative borders of Kraków.

by Drechsel and Mayr (2008) or Kishcha et al. (2017). Sheridan (2019) summarized research showing that a CAP inhibits the penetration of a cross-mountain flow which is also the case in the present study.

4.2. Pattern 2: a sudden large decrease of PM10 concentration at all measurement points

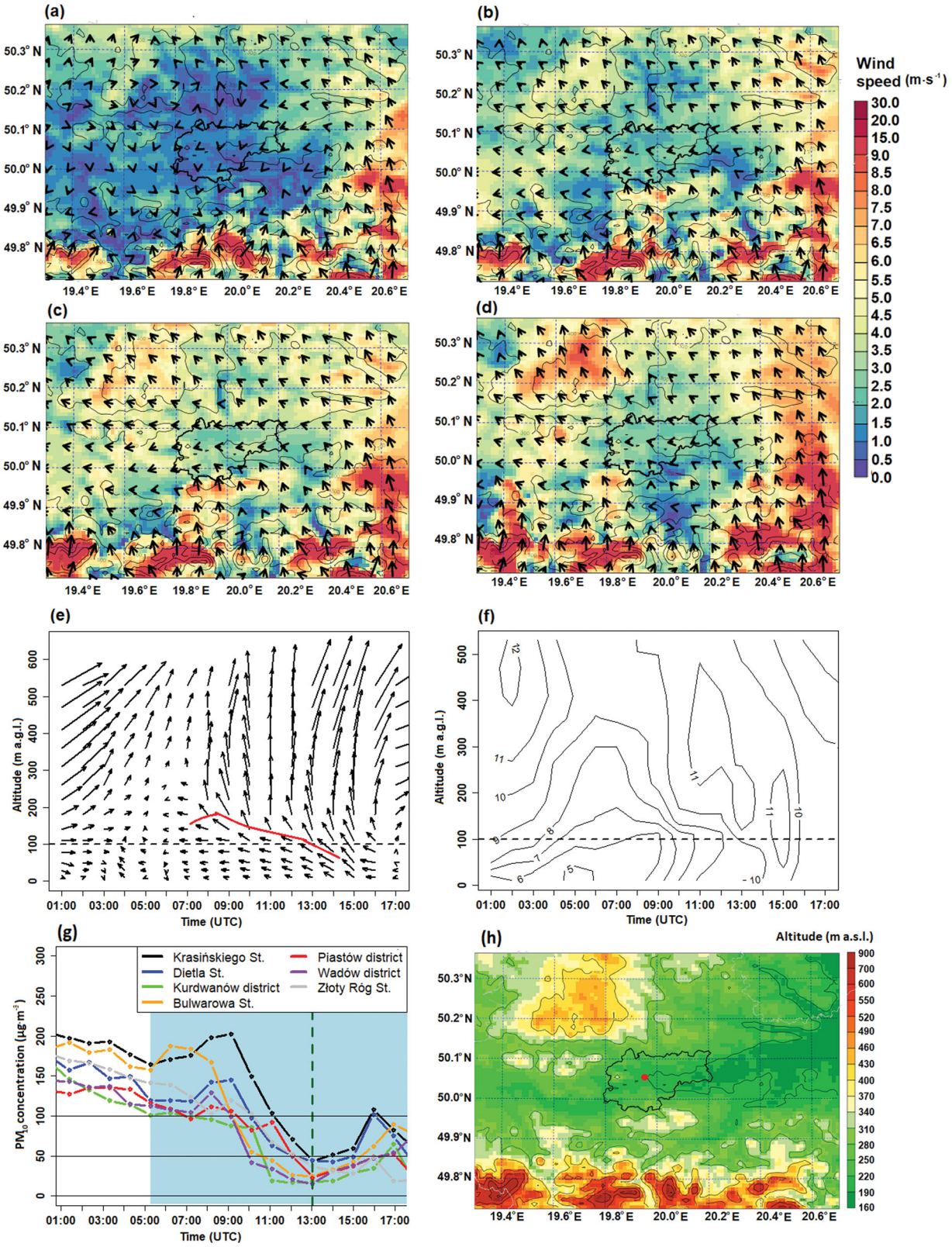
A PM_{10} decrease was considered a sudden and a large one if the concentration changed from about 150-200 $\mu g \cdot m^{-3}$ to values below allowed levels within 3-5 hours (see example on 25.11.2017 - Fig. 5g). PM_{10} decreases were linked to the intrusion of a foehn into the valley, destruction of the CAP and an increase in wind speed. However, two different modes of that process were observed. In the first, the foehn, moving from the south, entered the Raba valley first (a right tributary of the Wisła) east of Kraków and then moved into the area of Kraków from the east where the Wisła valley is much wider than in the western part of the city (Fig. 5a-e). Therefore, the wind speed within the valley increased gradually from east to west, the air temperature inversion and CAP were destroyed (Fig. 5f), and dispersion conditions improved significantly which led to a quick and large decrease in PM_{10} concentration.

The second is based on the intrusion of a foehn into the Wisła valley from the top of the CAP, an example of such situation was observed on 6/7.03.2019, see Fig. 6. In that case, first the wind speed increases gradually from the top of the CAP downward, while air temperature does too. Usually, the air temperature inversion in the 2-100 m a.g.l. stratum is still present and becoming more intense (due to warming of the upper strata - see air temperature measurements from the telecommunication mast- Fig. 6d) while PM_{10} concentrations are already decreasing, as there is the exchange of air between the CAP and the strata above. Additionally, as the CAP is decreasing, tall chimneys begin to deliver their emissions of PM_{10} into a well-mixed stratum above the CAP which contributes to a PM_{10} concentration decrease. Later in the day, the delivery of solar radiation triggers surface warming and the destruction of the CAP from the bottom (not shown). The CAP forming within the valley, and the topographically channelled foehn flow from the east, were predicted in the Wisła valley during that period.

The mechanisms described above correspond well to those defined for the removal of the cold pool in the Rhine valley during a foehn event (Flamant et al. 2006). Convection within the cold pool seems to have the least significance due to low incoming solar radiation in the cold half year and shade from the valley. Turbulent erosion at the top of the cold pool, linked to a strong wind shear between the foehn air and the cold pool leading to the mixing necessary to deplete it, seems to be decisive in the second case described above. In the case of the Rhine valley, dynamic displacement of the cold pool by foehn air was attributed to an orographic wave effect while in case of the Wisła valley it should rather be linked to the channelling of the foehn flow first into the Raba valley and then to the Wisła.

4.3. Pattern 3: Short-term peaks or long-term periods of high PM10 concentration in the Western part of the city only

The differences in relief between the western and eastern part of the Wisła valley in Kraków contribute to the occurrence of Pattern 3, see example on 11/12.12.2017 (Fig. 7). The western part is much narrower and more closed than the eastern one, and as shown by Sheridan (2019), valley width is an important parameter affecting


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
Wind speed (m·s⁻¹)
30.0
20.0
15.0
9.0
8.5
8.0
7.5
7.0
6.5
6.0
5.5
5.0
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
50.3° N
50.2° N
50.1° N
50.0° N
49.9° N
49.8° N
19.4° E
19.6° E
19.8° E
20.0° E
20.2° E
20.4° E
20.6° E
Altitude (m a.g.l.)
Time (UTC)
01:00
03:00
05:00
07:00
09:00
11:00
13:00
15:00
17:00
Krasińskiego St.
Dietla St.
Kurdwanów district
Bulwarowa St.
Piastów district
Wadów district
Złoty Róg St.
PM10 concentration (µg·m⁻³)
Altitude (m a.s.l.)

interactions between the CAP and air flow above the valley. In all cases of Pattern 3, much larger PM_{10} concentrations were observed in the western than in the eastern part of the valley and were either long-lasting or occurred as concentration peaks. The wind speed in the eastern part was much higher than in the western, likewise the relative stability of the air layer within the valley. Such conditions show a significant impact of the relief on the foehn effect at a local scale which included closed eddies which in turn lead to the accumulation of air pollution locally. Fig. 7 shows air temperature, relative humidity, wind speed and direction, and vertical velocity in an SW-NE cross section, with Krasińskiego St as a central, reference point. The fluctuations of air temperature and vertical velocity presented in the SW-NE cross section (Fig. 7) correspond well to the spatial pattern of wind and TKE at a regional scale shown in Fig. 8.

Drobinski et al. (2007) studied orographic waves linked to foehns in the Rhine Valley. They have shown that occasional intensification of an orographic wave at higher levels may force the foehn down to ground level and flush the cold pool downstream, for instance in the case of a breaking wave above. However, they also concluded that the sensitivity of amplitude, phase and temporal evolution of orographic gravity waves to ambient flow are still poorly understood. The study for Kraków shows that the gravity waves contributing to vertically trapped lee waves can cause a local and significant increase of PM_{10}.

Another case that shows the impact of gravity waves on the CAP is presented with data from 9/10.2.2019 (Fig. 9). Very strong vertical movements can be seen in mountain areas south of Kraków while in the Wisła valley the phenomenon is much weaker (Fig. 9f). This is shown by the measurements at the tower in the 50-100 m stratum in the western part of the valley, where there were isothermal conditions from 18 UTC on 9.02.2019 to 8 UTC on 10.02.2019. Gravity waves increased turbulence in the southern part of the city while in the northern part TKE was close to zero. The southern part of the city was warmer by about 2-3 K than the northern. According to additional measurements from other stations, in the 2-50 m stratum after 00 UTC, a strong temperature decrease occurred (Fig. 9d.). The temperature in the western part of valley floor was similar (e.g. in Jeziorzany, Krasińskiego St tower station at 2 m a.g.l.) and dropped below zero, while in the eastern part of valley floor (Igołomia) and in locations at 50 and 100 m above the valley floor (Libertów, Bojki St telecommunication mast at 50 and 100 m a.g.l.), the temperature remained constant and was about 5 °C.

Later, from 9 to 11 UTC, the western part of the valley was sheltered by the upland areas to the north, as shown in Fig. 10, for 30 m and 110 m a.g.l. levels. A large wind speed difference can be seen between the western and eastern parts of the valley, accompanied by similar differences in TKE. Towards the south and south-west of Balice meteorological station (red point on Fig. 11e-f), strong ridge-parallel up-draughts downstream of the relief can be observed with S-N and SW-NE cross sections of vertical velocity (25-30km from reference point) which were identified as hydraulic jumps (marked by HJ on Fig. 11c-d). Spatial patterns of air temperature, relative humidity and wind components on the S-N and SW-NE cross sections (Fig. 11a-b) indicate significant fluctuations in the region of the hydraulic jump. Its occurrence resulted in the weakening of the wind in the valley and strong wind shear above the valley marked by a horizontal red line (Fig. 11a-b). The spatial map of vertical velocity at 800 m a.g.l (Fig. 11e), with arrows presenting horizontal wind at this altitude, shows the location of strong up-draughts with blue circles marking places of hydraulic jumps visible in S-N and SW-NE cross sections. The results of a numerical simulation of a real case study (Elvidge et al. 2016) and under idealized conditions (Sheridan and Vosper 2005) coincided with these observations.

4.4. Pattern 4: long-term periods of high PM10 concentration at all measurement points

In the case of Pattern 4, the mechanisms responsible for long-lasting high PM_{10} concentrations are similar to Pattern 1, but their duration is longer. An example of such a situation was presented by data from 20.12.2018 (Fig. 12). The decisive factor is the sheltering effect, i.e. warm air streams generated by the foehn flow above the valley which runs W-E, and that shelters a much cooler and stable air layer, often with fog, and increases the air temperature inversion (Fig. 12e). The situation can persist

Fig. 5. Spatial patterns of wind speed and direction at 50 m a.g.l. at 6 UTC (a), 8 UTC (b) 9UTC (c), and 11 UTC (d) in Kraków and nearby, and changes of wind components (e) and air temperature (°C) (f) in vertical profiles for the location of PM_{10} monitoring station in Krasińskiego St, from the AROME model on 25.11.2017, spatial-temporal patterns of PM_{10} concentrations on 25.11.2017 (g), and the location of the station in Krasińskiego St on a topographic map from the AROME model (h).
Key: black dashed line in Fig. 5e-f: Wisła valley height; red line in Fig. 5e: topographically channeled foehn flow in the valley; blue background in Fig. 5g: foehn period; green dashed line in Fig. 5g: occurrence of altocumulus lenticularis cloud.

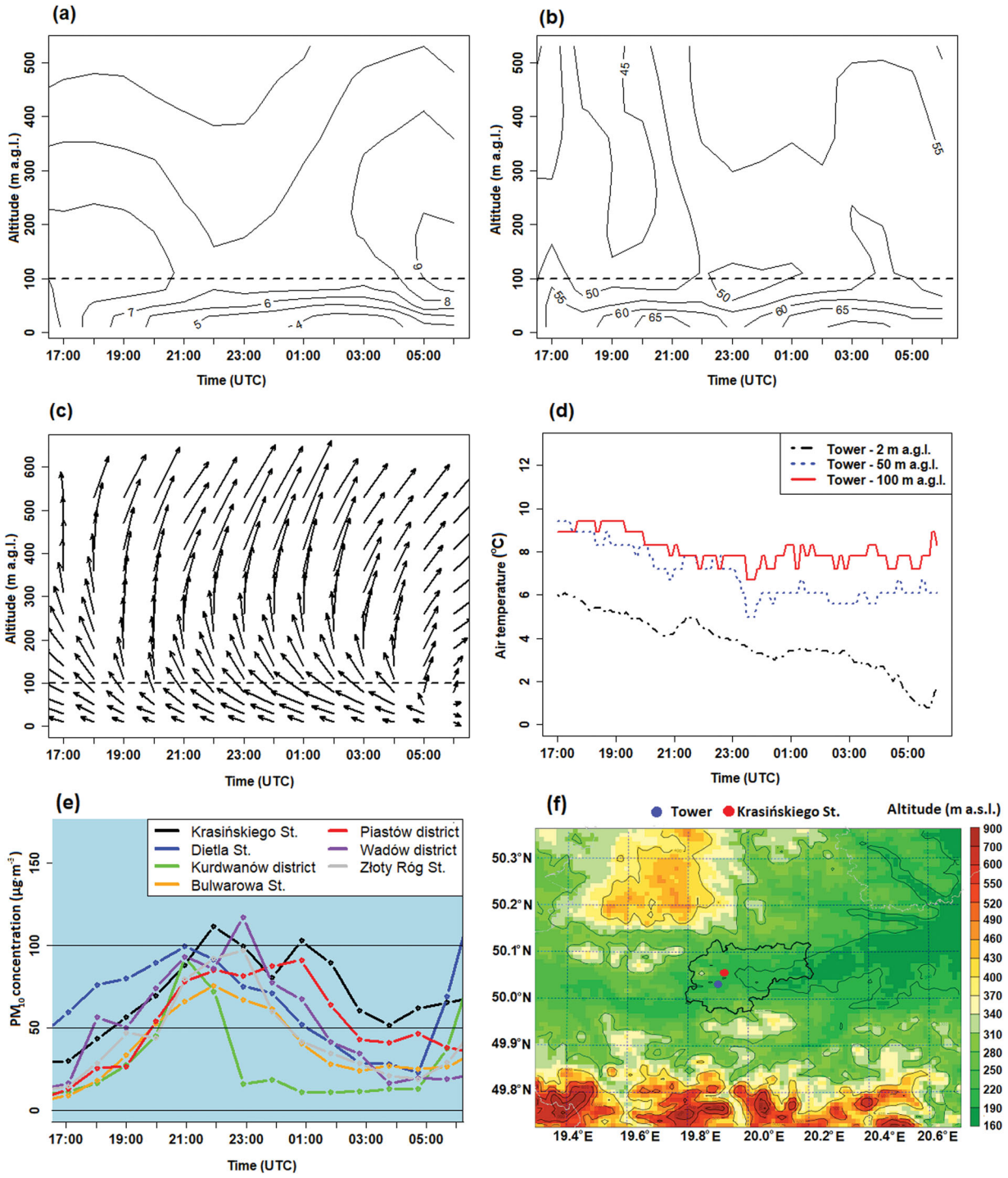


Fig. 6. Vertical profiles of a. air temperature (°C), b. relative humidity (%), and c. wind components for the PM_{10} monitoring station in Krasińskiego St, from the AROME model on 6/7.3.2019, and d. air temperature measurements from the telecommunication mast at three altitudes. Spatial-temporal patterns of PM_{10} concentration on 6/7.3.2019 (e). Location of the station in Krasińskiego St and the telecommunication mast (marked Tower) on a topographic map, from the AROME model (f).

Key: dashed line in Fig 6a-c: Wisła valley height; blue background in Fig. 6e: foehn period.

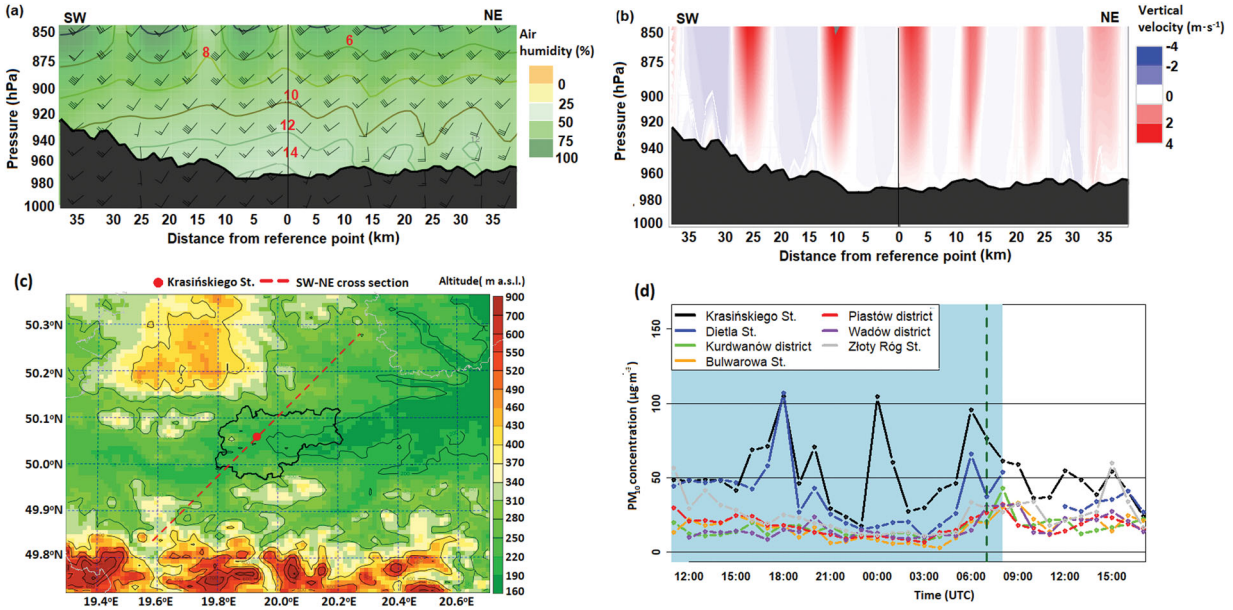


Fig. 7. Spatial pattern of a. air temperature (contour lines), relative humidity (background) and wind speed (in knots) and direction (graphical symbols) in the SW-NE cross section through Kraków and nearby, and b. vertical velocity at 7 UTC on 12.12.2017. Location of the station in Krasińskiego St (reference point at Fig. 7a-b) and the extent of the cross section presented on Fig. 7a-b on a topographic map, from the AROME model (c). Spatial-temporal patterns of PM_{10} concentrations on 11/12.12.2017 (d).
Key: reference point with distance 0: Krasińskiego St; the red and blue colour scales at cross section of vertical velocity in Fig. 7b indicates upward and downward movements, respectively; blue background in Fig. 7d: foehn period; green dashed line in Fig. 7d: occurrence of altocumulus lenticularis cloud.

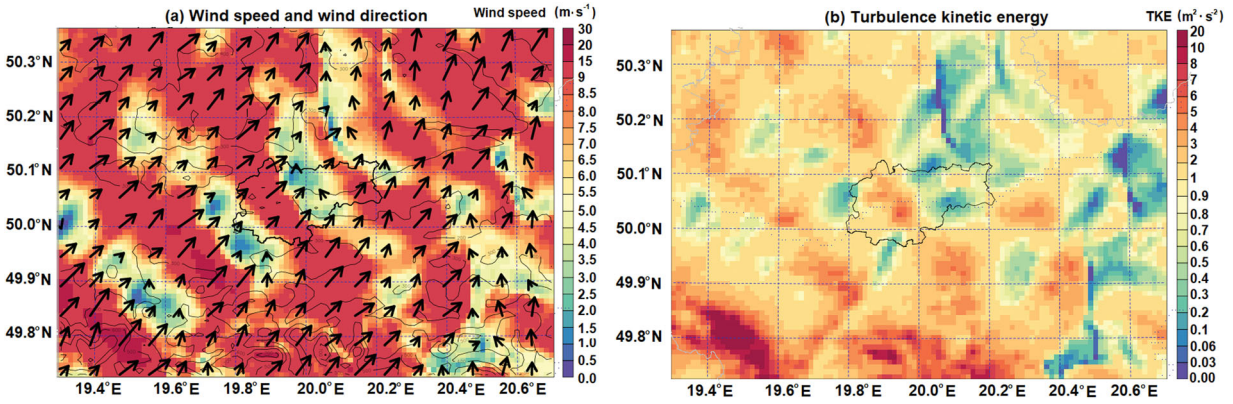


Fig. 8. Spatial patterns of a. wind components, and b. turbulent kinetic energy (TKE) at 30 m a.g.l. at 7 UTC on 12.12.2017.

even during daytime. Within the valley, wind speed is close to zero and so is turbulence which reduces available mixing volume and traps emitted pollutants, while in the areas located above the values are much higher (Pattern 1, Fig. 3; Fig. 12a-c).

This situation can also be observed in other mountainous areas, and the determination of the factors influencing foehn intrusion into a valley is not simple. For example, studies on foehns in the Dead Sea valley using a high resolution WRF model (Kunin et al. 2019) point out that foehn intrusion depends on synoptic and mesoscale conditions which affect the vertical structure of the lower troposphere generating different heights of stable layers. During a high stable layer over the Dead Sea Valley, the foehn reached the valley floor, while during a low stable layer, it did not. On the other hand, studies of valley CAPs presented by Sheridan (2019) point out that for valleys whose depth exceeds that of the nocturnal stable boundary layer, processes related to daytime insolation may be not strong enough to break the CAP. Persistent

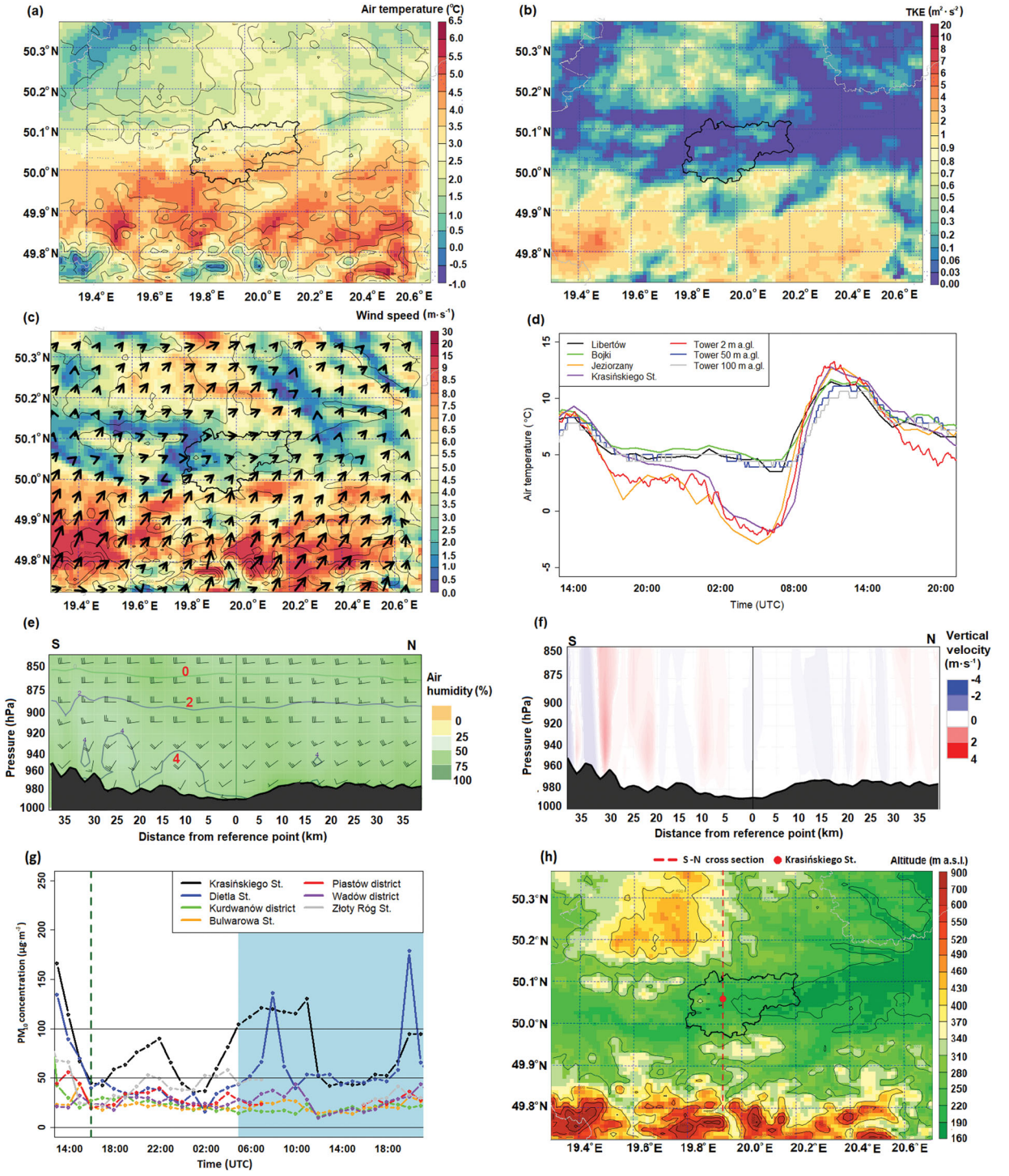


Fig. 9. Spatial pattern of a. air temperature; b. turbulent kinetic energy parameter (TKE), and c. wind components at altitude 30 m a.g.l. at 4 UTC (10.02.2019), in Kraków and nearby; d. air temperature measurements from ground stations on 9-10.02.2019; S-N cross sections of e. air temperature (contour lines), relative humidity (background), and wind speed (in knots) and direction (graphical symbols), and f. vertical velocity, at 4 UTC (10.02.2019). Spatial-temporal patterns of PM_{10} concentrations on 9/10.02.2019 (g). Location of station in Krasińskiego St (reference point at Fig. 9e-f) and cross section S-N presented at Fig. 9e-f on a topographic map, from the AROME model (h).

Key: reference point with distance 0 in Fig. 9e and f: Krasińskiego St; the red and blue colour scales at cross section of vertical velocity at Fig. 9f indicates upward and downward movements, respectively; blue background in Fig. 9g: foehn period; green dashed line in Fig. 9g: occurrence of altocumulus lenticularis cloud.

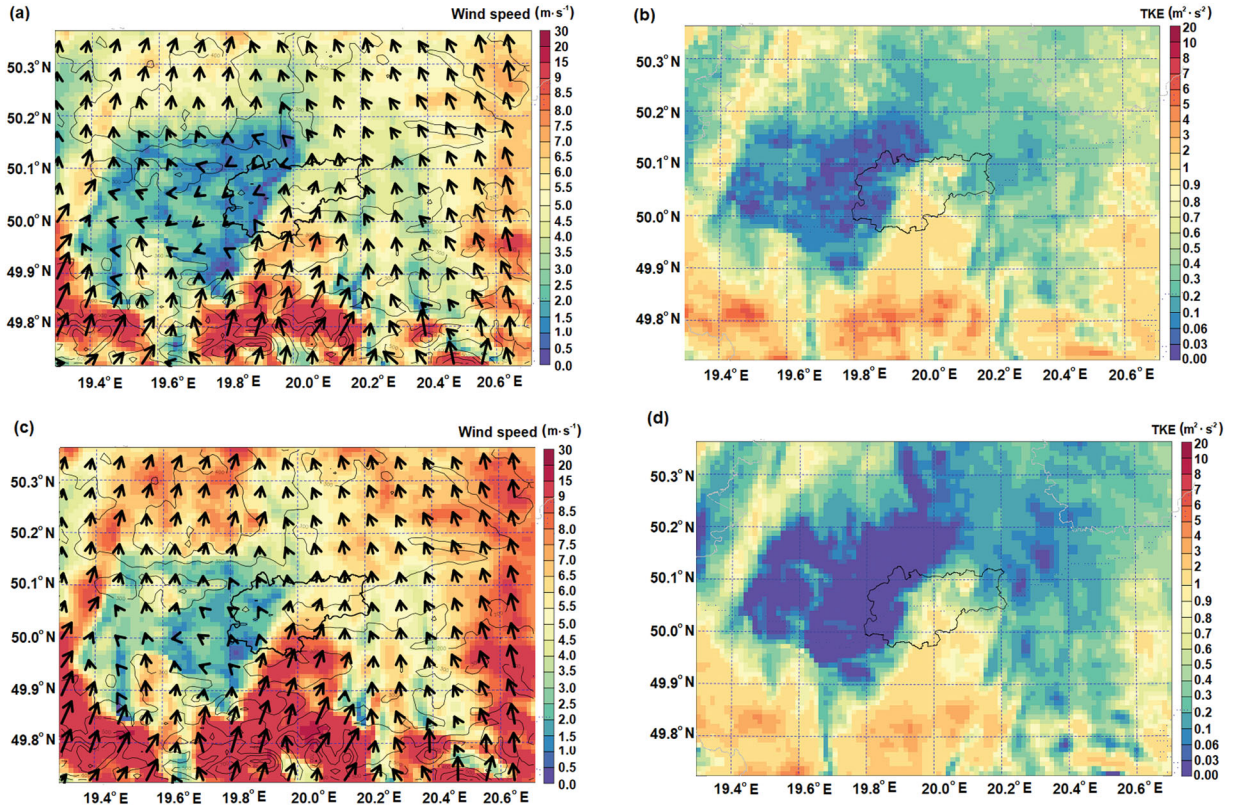


Fig. 10. Spatial patterns of wind speed and direction a. at 30 m a.g.l. and c. 110 m a.g.l.; turbulent kinetic energy parameter (TKE) at b. 30 m a.g.l. and d. 110 m a.g.l. at 11 UTC on 10.2.2019.

CAPs in deep basins represent a combination of a stable boundary layer near the surface (at night), residual stability at the top of the nocturnal stable layer which is not much eroded during the day, and any stability above this is due to air mass stratification.

5. Discussion

A foehn blowing from the Carpathian Mountains, can significantly modify the UBL in the areas it reaches, which in turn has a significant impact on air pollution dispersion conditions and pollution levels in ambient air. The main mechanisms involved in that process, and known from other mountain areas, are:

1. Intensification of air temperature inversion and the CAP, and reduction in the available air volume for mixing pollutants (e.g. Li X. et al., 2015; Drechsel and Mayr 2008);
2. Occurrence of gravity waves (Zängl 2003), hydraulic jump (Gohm and Mayr 2004; Kishcha et al. 2017), trapped lee waves (Nance and Durran 1998) or shear-induced gravity waves which occur at the top of CAPs (Richner and Hächler 2013);
3. Intrusion of foehns into a valley and mixing local air parcels into a larger volume (Drechsel and Mayr 2008).

Research on the intra-urban spatial variability of PM is not very common (e.g. Moore et al. 2009; Vicente et al. 2018), and the impact of a foehn on intra-urban air quality has been studied in detail even less (e.g. Li X. et al., 2015). An important aspect of the present work is to evaluate the role of a foehn in the modification of PM_{10} dispersion conditions in relation to other factors which regularly impact UBL in Kraków. On the one hand, as already mentioned, the allowed mean daily level of PM_{10} (i.e. 50 $\mu g \cdot m^{-3}$) was exceeded at one measurement point in Kraków at least on 57% of days in the study period, and a foehn occurred on only 12% of those days, but on the other hand, the allowed limit was exceeded on 69% of days with a foehn. In the case of mean hourly PM_{10} concentrations, values $\geq 50\,\mu g \cdot m^{-3}$ for all days of the study period constitute from 50.2% to 23.6%, and there is no spatial order in their distribution, while on days with a foehn, a clear difference can be seen between the western part of the valley (represented by Krasińskiego St, Dietla St and Złoty Róg St) and the eastern one. In the western

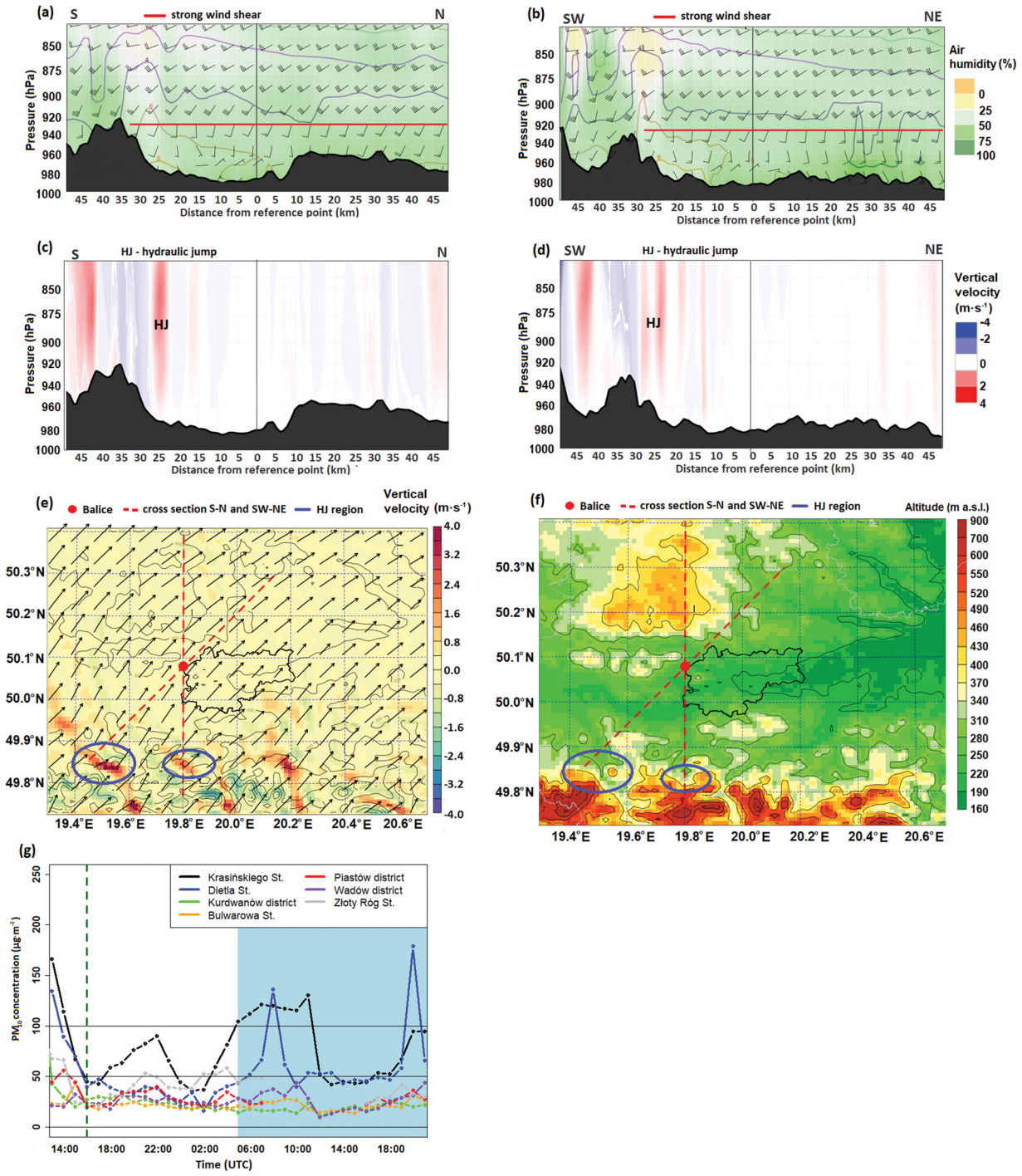


Fig. 11. Spatial pattern of a. air temperature (contour lines), relative humidity (background) and wind speed (in knots) and direction (graphical symbols) in the S-N cross section through Kraków and nearby, and c. vertical velocity at 11 UTC on 10.02.2019; SW-NE cross section of b. air temperature (contour lines), relative humidity (background) and wind speed (in knots) and direction (graphical symbols), and d. vertical velocity at 11 UTC (10.02.2019). Spatial map of vertical velocity at 800 m a.g.l. with arrows presenting horizontal wind at this altitude (e). Blue circles in Fig. 11e-f present location of hydraulic jumps identified at S-N and SW-NE cross sections (Fig. 11c and d). Location of Balice station (reference point in Fig. 11a-d) and cross sections presented in Fig. 11a-d at topographic map, from the AROME model (f). Spatial-temporal patterns of PM_{10} concentrations on 10.02.2019 (g).

Key: reference point with distance 0 in Fig. 11a-d: Balice; the red and blue colour scales at cross section of vertical velocity in Fig. 11c-d indicates upward and downward movements, respectively; blue background in Fig. 11g: foehn period.

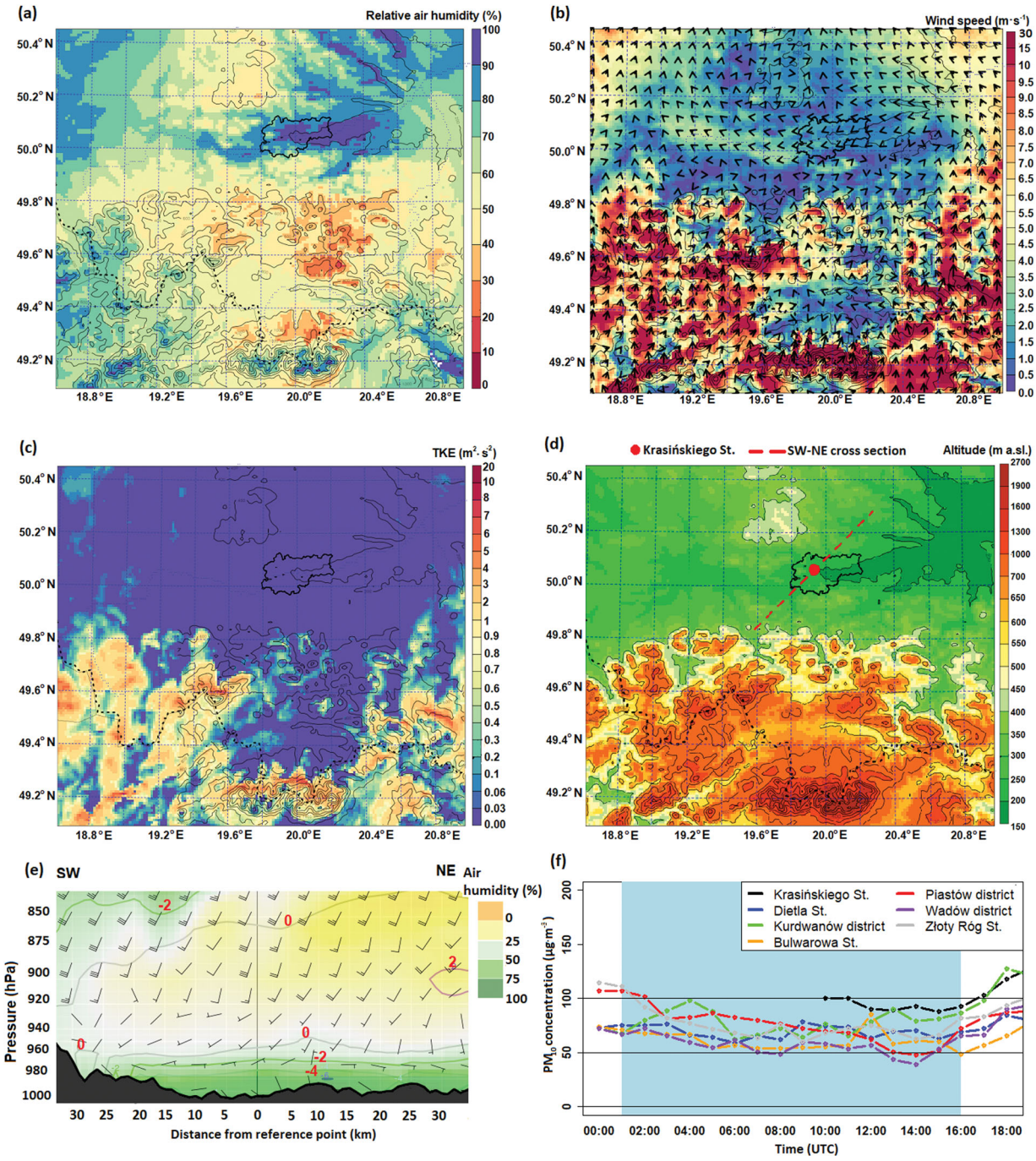


Fig. 12. Spatial pattern of relative air humidity (a), wind speed and direction (b) and turbulence kinetic energy at 110 m a.g.l. (c), topographic map of this terrain (d) and cross section of air temperature (temperature isolines), relative humidity (background) and wind (in knots) (e) for station Krasińskiego St at 6 UTC (20.12.2018). Spatial-temporal patterns of PM_{10} concentrations on 20.12.2018 (f). Key: blue background in Fig. 12f: foehn period.

part, the share of time with PM_{10} concentrations above 50 $\mu g \cdot m^{-3}$ is from 33.1% to 52.9% while in other points it reaches from 19.2% to 28.7%. Therefore, the foehn can be considered an important factor which contributes both to an increase in PM_{10} concentration in Kraków, and to its large spatial variability. However, that impact has a different background than for instance in the case of the Santa Ana (Álvarez and Noel Carbajal 2019) which

shows the importance of local conditions for the evaluation of foehn impacts on air quality.

In the case of Kraków, the main factor which modifies weather conditions at a local scale is the relief, as described in Section 2. That factor is decisive for the interactions between the foehn and UBL too. The city is located in a valley which is generally perpendicular to southerly winds, it is much wider in the eastern than in the western part, and during the cold half year stable atmospheric conditions occur in the UBL most of the time. The foehn can either blow above the valley or enter it in various modes. As shown in Section 4, it can either worsen or improve air pollution dispersion conditions, and increase or decrease PM_{10} levels, but it also contributes to large differences in PM_{10} concentrations within the city. The mode of interaction depends to a large extent on the exact direction from which the foehn reaches the city, which is an effect of general circulation conditions; SE winds have a much larger potential to enter the valley.

The mechanisms of interaction between the UBL and a foehn described in Section 4 were modified by local-scale processes. As shown for Urumqi (Li X. et al. 2015) or for Dead Sea valley (Vüllers et al. 2018), the impact of foehns on the UBL and on air pollution depends strongly on its modification by local relief which further suggests that it is possible to construct conceptual models concerning its impact on spatial patterns of urban air pollution but for a certain type of city location only. In the case of Kraków, such a model consists of the following elements:

1. The foehn from the Tatra Moutains is often strong enough to reach the area of the city of Kraków. It can affect air pollution dispersion conditions in the city and contribute both to a sudden and a large decrease or increase of PM_{10} levels all over the city, or to the occurrence of PM_{10} peaks in the western part of the city only, or to long-lasting high PM_{10} levels throughout the city. The occurrence of a particular effect depends on the mode of foehn transfer through the area of the city and nearby.
2. The following transfer modes were identified: a. the foehn flows above the valley where a strong CAP and return flow can be found; b. the foehn enters the valley from the east or from the valley top and destroys the CAP; c. gravity waves generated by the foehn are strong enough to enter the western, narrower part of the valley and cause large spatial differences in turbulence parameters within the city.
3. The first transfer mode worsens air pollution dispersion conditions for the whole city and leads to large increases in PM_{10} levels, the second transfer mode improves the dispersion conditions and leads to large decreases in PM_{10} levels throughout whole city, and the third mode generates large spatial differences in PM_{10} levels within the city.

6. Conclusions

Analysis of PM_{10} concentration changes in Kraków during foehn episodes showed that there is no single effect on air pollution dispersion conditions. Several mechanisms of foehn impact on the UBL were identified and a conceptual model of the foehn effect on PM_{10} spatial pattern was formulated. The model might be useful in research on other cities located in similar relief conditions to Kraków, i.e. in large valleys located at the foothills of mountain ranges with a special focus on those perpendicular to the foehn direction. An important issue is valley width; in the western narrower part of the valley, the PM_{10} levels are higher than in the wider eastern part. This is due to limited natural ventilation and the katabatic flows which intensify the CAP. The latter factor shows that the mechanisms of foehn impact on the UBL and air pollution dispersion conditions, well known from research in various mountain areas, might be significantly modified by specific local-scale processes.

The present study is an attempt at a climatological approach to the issue of foehn impact on UBL properties, air pollution dispersion conditions and intra-urban PM_{10} patterns, in spite of the limited research period length. The four patterns of PM_{10} spatial-temporal changes, described in Section 4, were defined by analysis of several cases for each pattern and accompanying processes. These analyses were possible due to the combination of observational and model data, including long-term mesoclimatic measurements. Such an approach allows results to be obtained which are useful for municipal management including spatial planning and air protection policy. As urban air pollution is a problem for many cities, a better understanding of the various mechanisms controlling UBL features and air pollution dispersion is needed.

Disclosure statement

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

Álvarez, C. A. and Noel Carbajal, N. 2019. Regions of influence and environmental effects of Santa Ana wind event. *Air Qual. Atmos. Health***12**, 1019–1034. doi:10.1007/s11869-019-00719-3

Bénard, P., Vivoda, J., MasEk, J., Smolíková, P., Yessad, K. and co-authors. 2010. Dynamical kernel of the Aladin-NH spectral limited-area model: Revised formulation and

sensitivity experiments. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **136**, 155–169. https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.522. doi:10.1002/qj.522

Bokwa, A. 2011. Influence of air temperature inversions on the air pollution dispersion conditions in Krakow. *Prace Geogr. IGiGP UJ* **126**, 41–51. http://www.pg.geo.uj.edu.pl/documents/3189230/4482219/2011_126_41-51.pdf/3a9b98f7-8324-48de-a772-aba57ac3aae2.

Bokwa, A. 2007. Zanieczyszczenie powietrza [Air pollution]. In: *Klimat Krakowa w XX wieku [Climate of Kraków in the 20th century]* (ed. D. Matuszko). Institute of Geography and Spatial Management, Jagiellonian University, Kraków, Poland, pp. 187–199.

Bokwa, A. 2008. Environmental impacts of long-term air pollution changes in Kraków, Poland. *Pol. J. Envir. Stud.* **17**, 673–686. http://www.pjoes.com/Issue-5-2008,3821.

Bougeault, P. and Lacarrere, P. 1989. Parameterization of orography induced turbulence in a meso-beta-scale model. *Mon. Wea. Rev.* **117**, 1872–1888. https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281989%29117%3C1872%3APOOITI%3E2.0.CO%3B2. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2

Brinkmann, W. A. R. 1971. What is a foehn? *Weather* **26**, 230–239. doi:10.1002/j.1477-8696.1971.tb04200.x

Burnett, R. T., Pope, C. A., Ezzati, M., Olives, C., Lim, S. S. and co-authors. 2014. An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure. *Environ. Health Perspect.* **122**, 397–403. doi:10.1289/ehp.1307049

Cetti, C., Buzzi, B., and Sprenger, M. 2015. Climatology of Alpine north foehn. *Sci. Rep. MeteoSwiss* **100**, 76.

Corsmeier, U., Kossmann, M., Kalthoff, N. and Sturman, A. 2006. Temporal evolution of winter smog within a nocturnal boundary layer at Christchurch. *Meteorol. Atmos. Phys.* **91**, 129–148. doi:10.1007/s00703-005-0111-5

Cuxart, J., Bougeault, P. and Redelsperger, J.-L. 2000. A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *QJ. Royal Met. Soc.* **126**, 1–30. https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.49712656202.

Drechsel, S. and Mayr, G. J. 2008. Objective Forecasting of Foehn Winds for a Subgrid-Scale Alpine Valley. *Weather Forecast.* **23**, 205–218. doi:10.1175/2007WAF2006021.1

Drobinski, P., Steinacker, R., Richner, H., Baumann-Stanzer, K., Beffrey, G. and co-authors. 2007. Föhn in the Rhine Valley during MAP: A review of its multiscale dynamics in complex valley geometry. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **133**, 897–916. doi:10.1002/qj.70

Elvidge, A. D., Renfrew, I. A., King, J. C., Orr, A. and Lachlan-Cope, T. A. 2016. Foehn warming distributions in nonlinear and linear flow regimes: a focus on the Antarctic Peninsula. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **142**, 618–631. doi:10.1002/qj.2489

European Environment Agency. (2018). Air quality in Europe — 2018 report. European Environment Agency, Luxembourg, Publications Office of the European Union, http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2018.

Flamant, C., Drobinski, P., Furger, M., Chimani, B., Tschannett, S. and co-authors. 2006. Föohn/cold-pool interactions in the Rhine valley during MAP IOP 15. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **132**, 3035–3058. doi:10.1256/qj.06.36

Gohm, A. and Mayr, G. J. 2004. Hydraulic aspects of fohn winds in an Alpine valley. *Q J. R Meteorol. Soc.* **130**, 449–480. doi:10.1256/qj.03.28

Hajto, M. and Rozwoda, W. 2010. Wykorzystanie danych sodarowych do oceny warunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w warstwie granicznej atmosfery w Krakowie [Application of sodar data for evaluation of air pollution dispersion conditions in the boundary layer in Kraków]. In: *Ochrona powietrza w teorii i praktyce [Air Protection in Theory and Practice]*, Vol. 2, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk [Institute of Environmental Engineering, Polish Academy of Sciences], Zabrze, Poland, pp. 81–92.

Hann, J. 1901., *Lehrbuch der Meteorologie* (1st ed.), Verlag C. H. Tauchnitz, Leipzig, 805 pp.

Hess, M. 1974. Klimat Krakowa [Climate of Kraków]. *Folia Geogr. Ser. Geogr. Phys.* **8**, 45–102.

Hoinka, K. P. 2007. Observation of the airflow over the Alps during a foehn event. *Qjr. Meteorol. Soc.* **111**, 199–224. doi:10.1002/qj.49711146709

Kishcha, P., Starobinets, B. and Alpert, P. 2017. Modelling of foehn-induced extreme local dust pollution in the Dead Sea valley. In: *Air Pollution Modeling and Its Applications XXV* (eds. C. Mensink and G. Kallos). Springer Proceedings in Complexity, Springer, Cham, pp. 433–437. doi:10.1007/978-3-319-57645-9_68.

Kunin, P., Alpert, P. and Rostkier-Edelstein, D. 2019. Investigation of sea-breeze/foehn in the Dead Sea valley employing high resolution WRF and observations. *Atmos. Res.* **229**, 240–254. doi:10.1016/j.atmosres.2019.06.012

Largeron, Y. and Staquet, C. 2016. Persistent inversion dynamics and wintertime PM10 air pollution in Alpine valleys. *Atmos. Environ.* **135**, 92–108. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.03.045

Li, X., Xia, X., Wang, L., Cai, R., Zhao, L. and co-authors. 2015. The role of foehn in the formation of heavy air pollution events in Urumqi, China. *J. Geophys. Res. Atmos.* **120**, 5371–5384. doi:10.1002/2014JD022778

Li, Y., Chen, Q., Zhao, H., Wang, L. and Tao, R. 2015. Variations in PM10, PM2.5 and PM1.0 in an urban area of the Sichuan basin and their relation to meteorological factors. *Atmosphere* **6**, 150–163. doi:10.3390/atmos6010150

Liu, L., Zhang, Z., Zhong, J., Wang, J. and Yang, Y. 2019. The 'two-way feedback mechanism' between unfavorable meteorological conditions and cumulative PM2.5 mass existing in polluted areas south of Beijing. *Atmos. Environ.* **208**, 1–9. doi:10.1016/j.atmosenv.2019.02.050

Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A. and co-authors. 2013. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.* **6**, 929–960. doi:10.5194/gmd-6-929-2013

Mira-Salama, D., Van Dingenen, R., Gruening, C., Putaud, J.-P., Cavalli, F. and co-authors. 2008. Using Föhn Conditions to Characterize Urban and Regional Sources of Particles. *Atmos. Res* **90**, 159–169. doi:10.1016/j.atmosres.2008.02.007

Moore, K., Krudysz, M., Pakbin, P., Hudda, N. and Sioutas, C. 2009. Intra-Community Variability in total particle number concentrations in the San Pedro Harbor area (Los Angeles, California). *Aerosol Sci. Technol.* **43**, 587–603. doi:10.1080/02786820902800900

Muñoz, R. C. and Corral, M. J. 2017. Surface Indices of wind, stability, and turbulence at a highly polluted urban site in Santiago, Chile, and their relationship with nocturnal particulate matter concentrations. *Aerosol Air Qual. Res.* **17**, 2780–2790. doi:10.4209/aaqr.2017.05.0190

Nance, L. B. and Durran, D. R. 1998. A modeling study of nonstationary trapped mountain lee waves. *Part II Nonlinearity. J. Atmos. Sci* **55**, 1429–1445., 1998.

Niedźwiedź, T. and Olecki, Z. 1994. Wpływ sytuacji synoptycznych na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie. *Zesz. Nauk UJ, Pr. Geogr* **96**, 55–68. [Impact of synoptic situations on air pollution in Kraków].

Niedźwiedź, T. and Olecki, Z. 1995. The variability of air pollution in Cracow. In: *Klimat i bioklimat miast [Urban Climate and Bioclimate]* (ed. K. Kłysik). Publishing House of the University of Łódź, Łódź, pp. 205–212.

Pergaud, J., Masson, V., Malardel, S. and Couvreux, F. 2009. A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Boundary-Layer Meteorol.* **132**, 83–106. doi:10.1007/s10546-009-9388-0

Prtenjak, M. T., Jericevic, A., Kraljevic, L., Bulic, I. H., Nitis, T. and co-authors. 2009. Exploring atmospheric boundary layer characteristics in a severe SO2 episode in the north-eastern Adriatic. *Atmos. Chem. Phys.* **9**, 4467–4483. doi:10.5194/acp-9-4467-2009

Richner, H. and Hächler, P. 2013. Understanding and forecasting alpine foehn. In: *Mountain Weather Research and Forecasting* (eds. F. Chow, S. De Wekker, and B. Snyder). Springer Atmospheric Sciences. Springer, Dordrecht.

Seibert, P. 1990. South fohn studies since the ALPEX experiment. *Meteorl. Atmos. Phys.* **43**, 91–103. doi:10.1007/BF01028112

Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N. 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.

Sheridan, P. F. 2019. Synoptic-flow interaction with valley cold-air pools and effects on cold-air pool persistence: Influence of valley size and atmospheric stability. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **145**, 1636–1659. doi:10.1002/qj.3517

Sheridan, P. F. and Vosper, S. B. 2005. Numerical simulations of rotors, hydraulic jumps and eddy shedding in the Falkland Islands. *Atmos. Sci. Lett.* **6**, 211–218. doi:10.1002/asl.118

Statistical Yearbook of Kraków. 2019. Statistical Office in Kraków. http://krakow.stat.gov.pl.

Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R. and co-authors. 2018. The ALADIN System and its Canonical Model Configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Model Dev.* **11**, 257–281. doi:10.5194/gmd-11-257-2018

Tomaszewska, A. M. 1994. Zależność stężeń zanieczyszczeń atmosfery w Krakowie od wybranych elementów meteorologicznych w okresie grzewczym 1992/1993 [Dependence of air pollution concentration in Kraków from selected meteorological elements in the heating season 1992/1993]. *Wiad. IMGW* **3**, 5–17.

Toro A, R., Kvakić, M., Klaić, Z. B., Koračin, D., Morales S, R. G. E. and co-authors. 2019. Exploring atmospheric stagnation during a severe particulate matter air pollution episode over complex terrain in Santiago, Chile. *Environ. Pollut.* **244**, 705–714. doi:10.1016/j.envpol.2018.10.067

Turton, J. V., Kirchgaessner, A., Ross, A. N. and King, J. C. 2018. The spatial distribution and temporal variability of föhn winds over the Larsen C Ice Shelf Antarctica Quarterly. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **144**, 1169–1178. doi:10.1002/qj.3284

Ustrnul, Z. 1992a. Potencjalne warunki występowania wiatrów fenowych w Karpatach Polskich (Potential conditions of foehn effects in the Polish Carpathians). *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne* **90**, 97–112.

Ustrnul, Z. 1992b. Influence of foehn winds on air temperature and humidity in the Polish Carpathians. *Theor. Appl. Climatol.* **45**, 43–47. doi:10.1007/BF00865992

Vergeiner, J. 2004. South foehn studies and a new foehn classification scheme in the Wipp and Inn valley, Ph.D. thesis, Univ. of Innsbruck, Austria.

Vicente, A. B., Juan, P., Meseguer, S., Díaz-Avalos, C. and Serra, L. 2018. Variability of PM10 in industrialized-urban areas. New coefficients to establish significant differences between sampling points. *Environ. Pollut.* **234**, 969–978. doi:10.1016/j.envpol.2017.12.026

Vüllers, J., Mayr, G. J., Corsmeier, U. and Kottmeier, C. 2018. Characteristics and evolution of diurnal foehn events in the Dead Sea valley. *Atmos. Chem. Phys.* **18**, 18169–18186. doi:10.5194/acp-18-18169-2018

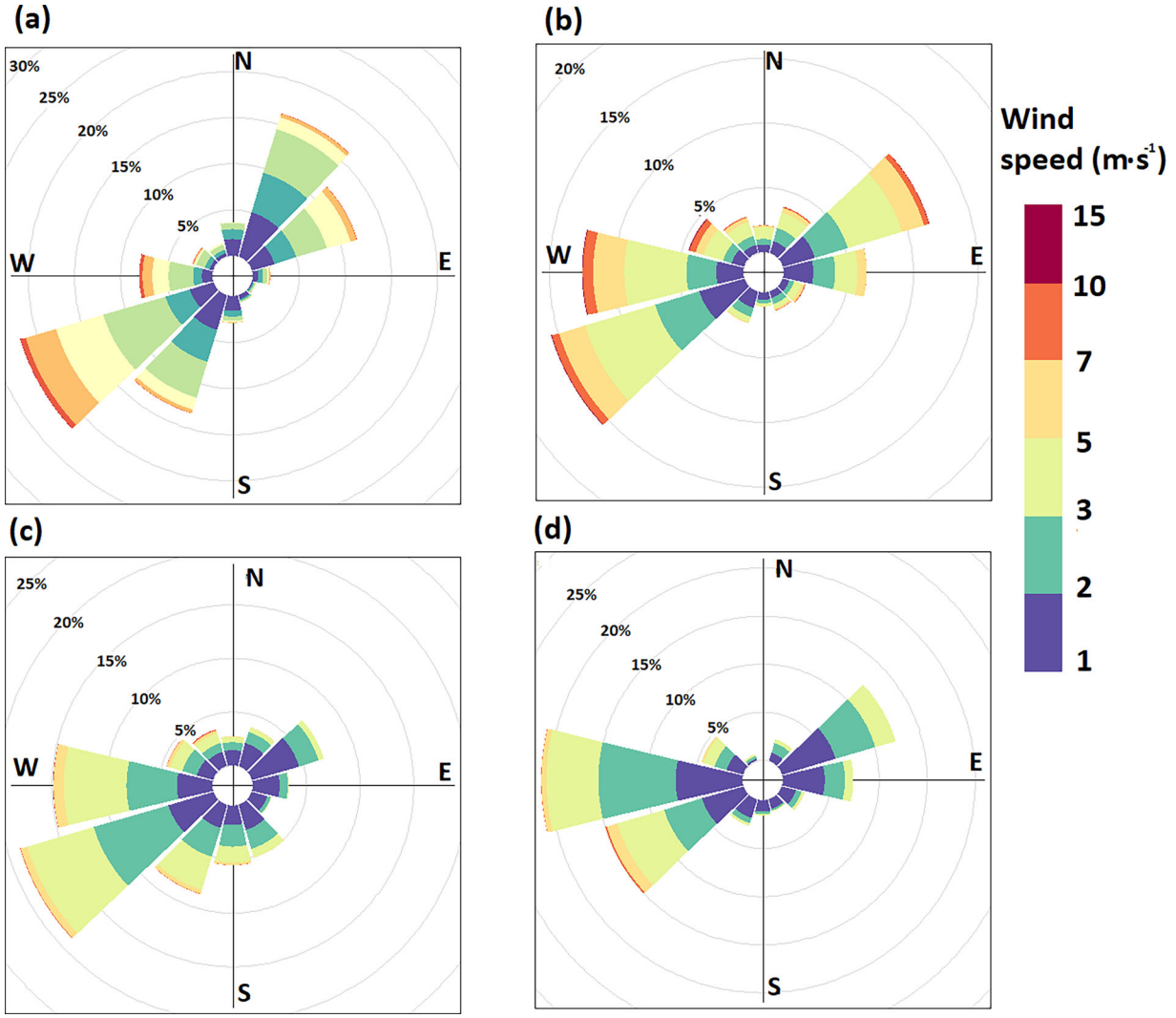
Walczewski, J., Heryan, A. and Krokowski, J. A. 1996. Monitoring powietrza i wody w Krakowie jako narzędzie ochrony zdrowia mieszkańców [Air and water monitoring in Kraków as a tool of the inhabitans' health protection]. *Folia Geogr. Ser. Geogr. Phys.* **26 – 27**, 159–171.

Wang, C., Wang, C., Myint, S. and Wang, Z. 2017. Landscape determinants of spatio-temporal patterns of aerosol optical depth in the two most polluted metropolitans in the United States. *Sci Total Environ.* **609**, 1556–1565. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.273

WHO. 2016. WHO: Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden for disease 2016. WHO, Geneva. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1.

Zängl, G. 2003. Deep and shallow south foehn in the region of Innsbruck: Typical features and semi-idealized numerical simulations. *Meteorol. Atmos. Phys.* **83**, 237–261. doi:10.1007/s00703-002-0565-7

Appendix 1. Wind rose at two Sub-periods for (a) Balice, (b) Igołomia, (c) Libertów and (d) Reymonta St



Appendix 2. List of foehn wind episodes studied

No. of episode	Foehn start at Kasprowy Wierch (UTC)	Foehn end at Kasprowy Wierch (UTC)	Duration (h)	PM10 pattern type observed
1	08.09.2017 17:00	10.09.2017 00:00	31	2
2	25.11.2017 05:00	25.11.2017 21:00	16	1–2
3	10.12.2017 10:00	12.12.2017 08:00	46	3
4	13.12.2017 18:00	15.12.2017 13:00	43	1–3
5	15.01.2018 18:00	16.01.2018 19:00	25	1–3
6	11.03.2018 16:00	13.03.2018 00:00	32	3
7	02.04.2018 17:00	05.04.2018 00:00	55	2–3
8	28.04.2018 19:00	01.05.2018 08:00	61	3
9	29.10.2018 08:00	31.10.2018 00:00	40	3

(*Continued*)

(*Continued*).

No. of episode	Foehn start at Kasprowy Wierch (UTC)	Foehn end at Kasprowy Wierch (UTC)	Duration (h)	PM10 pattern type observed
10	12.11.2018 12:00	13.11.2018 15:00	27	1,4
11	20.12.2018 01:00	20.12.2018 16:00	43	2,4
	21.12.2018 00:00	21.12.2018 20:00		
12	01.02.2019 00:00	03.02.2019 12:00	60	2–4
13	06.03.2019 13:00	07.03.2019 21:00	32	1–3
14	23.04.2019 07:00	26.04.2019 15:00	80	1–2

Explanations: pattern 1 - increase of PM10 concentration at all stations, pattern 2 - decrease of PM10 concentration at all stations; pattern 3 - short-term peaks or long-term periods of high PM10 at western stations; pattern 4 - long-term periods of high PM10 concentrations at all measurement points

Appendix 3. Number of days with mean daily PM concentrations $\geq$ 50, 100, 150 and 200 $\mu g \cdot m^{-3}$ at measurement points in Kraków in the study periods (two cold seasons)

PM concentrations	Krasińskiego St	Piastów district	Wadów district	Złoty Róg St.	Kurdwanów district	Dietla St.	Bulwarowa St.
$>50\,\mu g \cdot m^{-3}$	275	127	115	176	163	185	151
$>100\,\mu g \cdot m^{-3}$	64	12	9	27	26	28	14
$>150\,\mu g \cdot m^{-3}$	6	1	1	3	3	4	4
$>200\,\mu g \cdot m^{-3}$	1	0	0	0	0	0	0

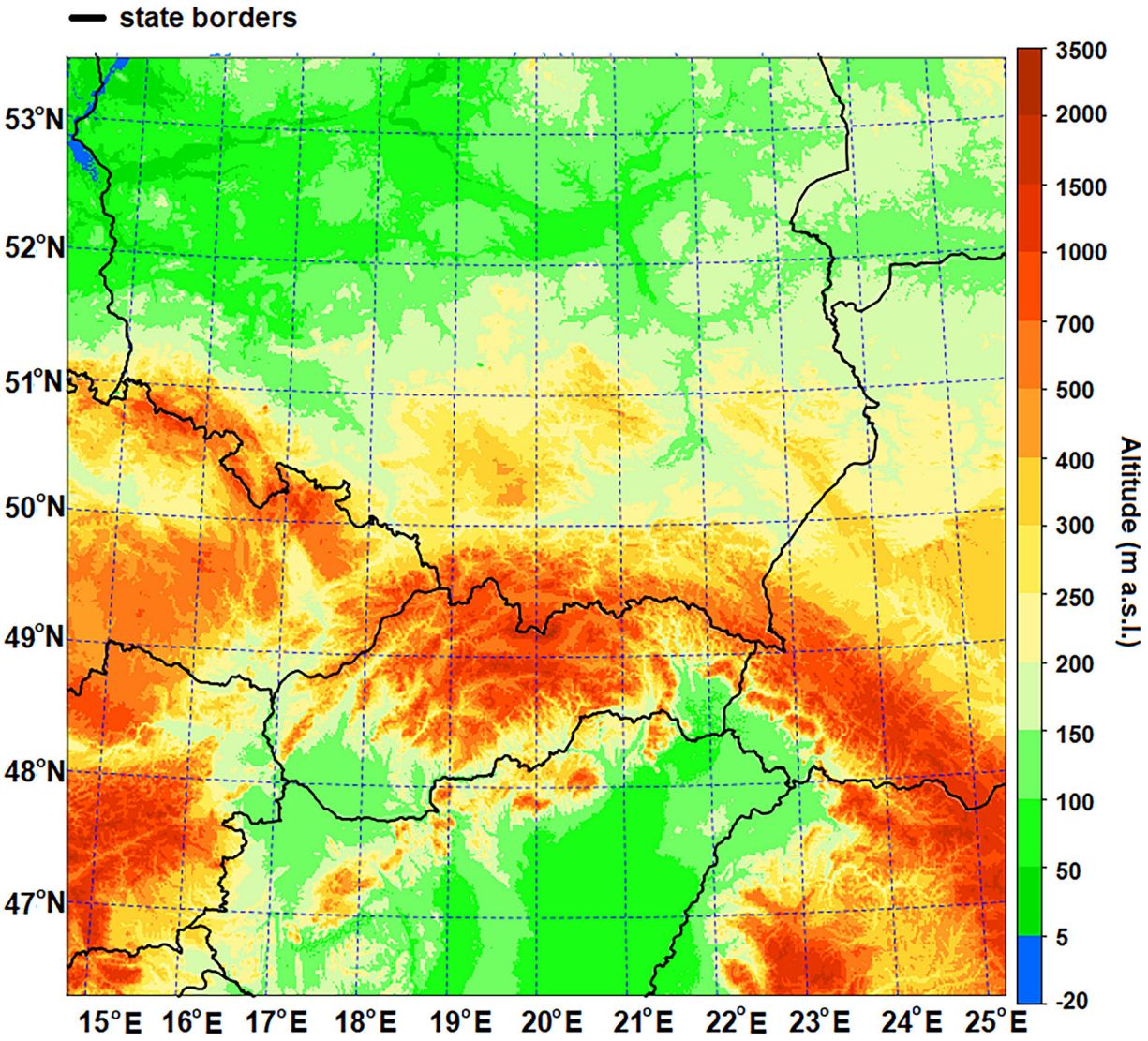
Appendix 4. Height of the lowest 87 vertical levels (v.l.) from the model up to 3 km of altitude, used in forecast

No. of v.l.	Height of v.l. (km a.g.l.)	No. of v.l. (cont.)	Height of v.l. (km a.g.l.)
1	0.009	20	0.969
2	0.030	21	1.055
3	0.053	22	1.144
4	0.079	23	1.237
5	0.110	24	1.334
6	0.143	25	1.435
7	0.180	26	1.537
8	0.221	27	1.640
9	0.264	28	1.744
10	0.311	29	1.849
11	0.362	30	1.957
12	0.415	31	2.066
13	0.472	32	2.178
14	0.533	33	2.292
15	0.597	34	2.408
16	0.664	35	2.527
17	0.735	36	2.649
18	0.809	37	2.773
19	0.887	38	2.900

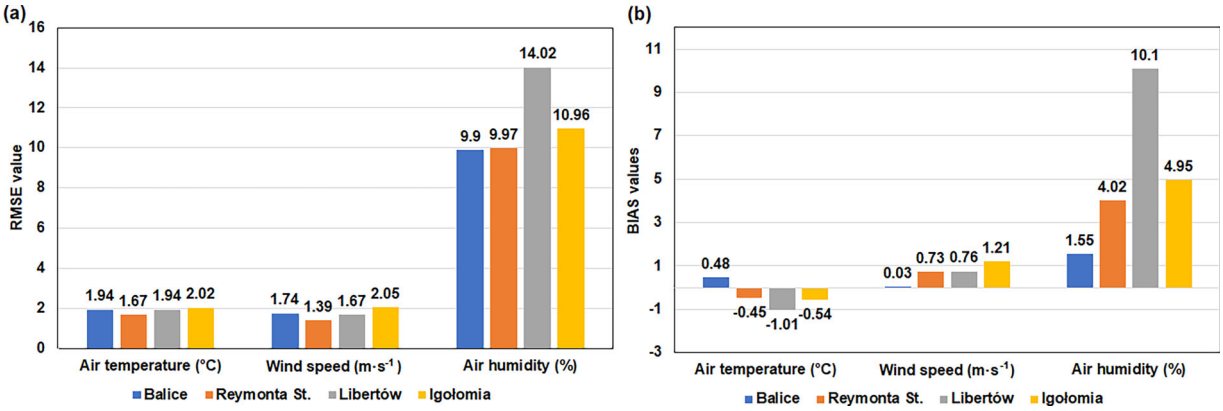
Appendix 5. Physical processes' schemes used in AROME CMC 1-km model

Dynamics	Nonhydrostatic ALADIN (21.20.Bénard et al. 2010)
Turbulence	Prognostic turbulent kinetic energy (TKE) combined with diagnostic nixing length (Cuxart et al. 2000; Bougeault and Lacarrere. 1989)
Radiation	Longwave Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) radiation scheme, Morcrette shortwave radiation scheme from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
Microphysics	Three-class parameterization (ICE3)
Shallow convection	Pergaud, J., Masson, V., Malardel, S., and Couvreux, F., 2009 (PMMC09) (Pergaud et al. 2009)
Deep Convection	–
Clouds	Statistical cloud scheme
Surface scheme	SURFEX (Masson et al. 2013)

Appendix 6. Orographic map of the AROME model domain with 1km x 1km grid spacing



Appendix 7. Verification of the AROME model forecast with data from meteorological stations: a) RMSE value; b) BIAS value

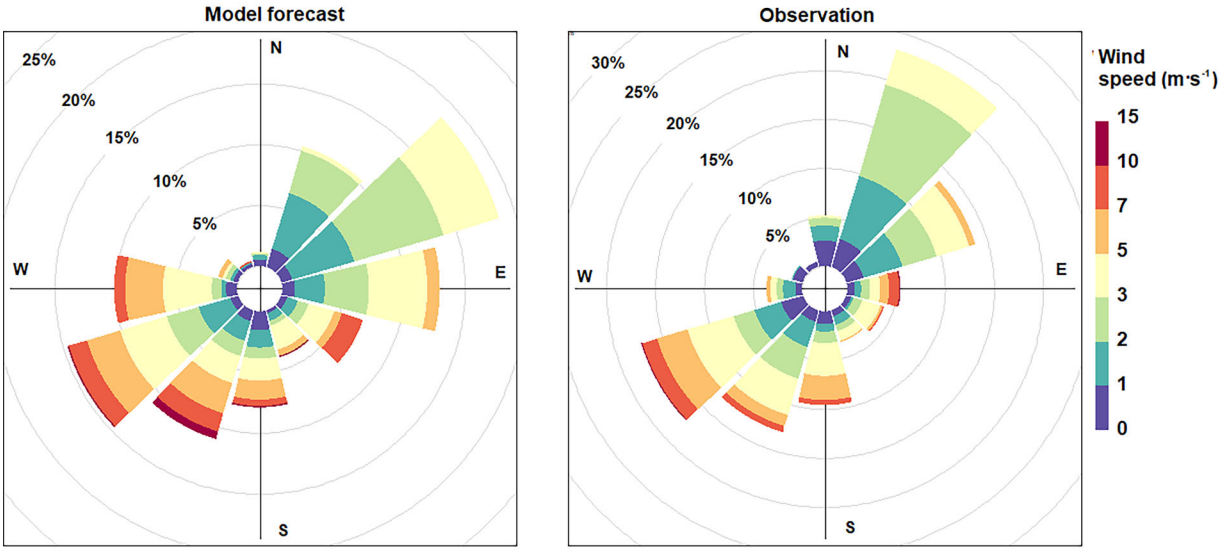


Appendix 8. Accuracy of the AROME forecast (%) in comparison with data from meteorological stations

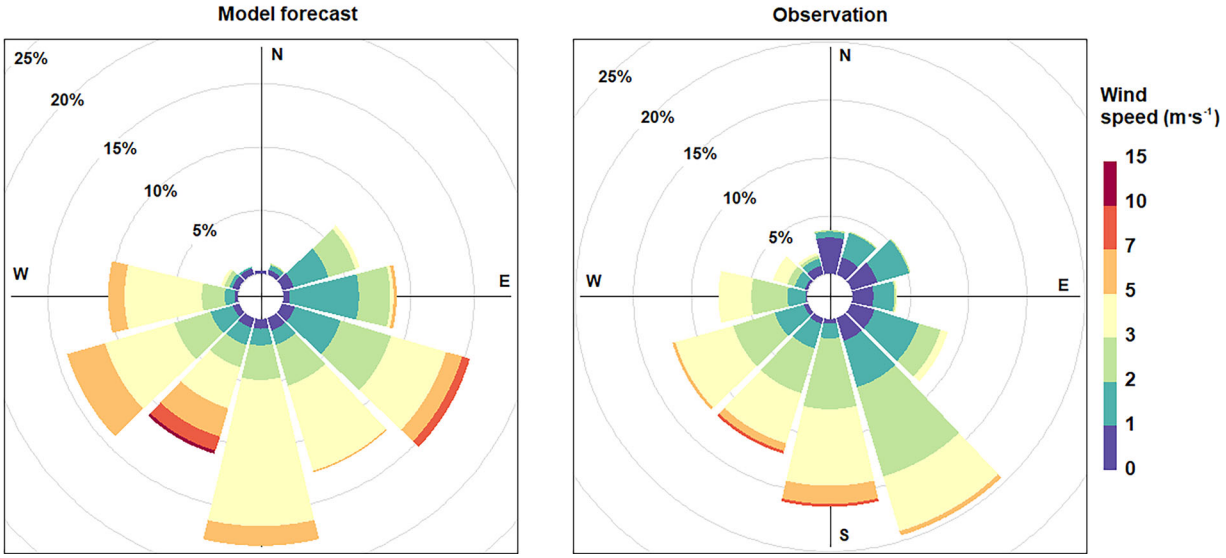
Parameter	Balice	Reymonta St.	Libertów	Igołomia
Air temp. ±1 °C	41	46	39	44
Air temp. ±2 °C	71	78	71	70
Air temp. ±5 °C	98	99	98	97
Air hum. ±10%	66	68	47	64
Air hum. ±20%	96	96	84	92
Air hum. ±30%	100	100	98	99
Wind speed ±1 $m \cdot s^{-1}$	58	60	48	42
Wind speed ±2 $m \cdot s^{-1}$	83	88	80	74
Wind speed ±5 $m \cdot s^{-1}$	98	100	99	98

Appendix 9. Comparison of wind roses obtained from model forecast and measurements for Balice (i.e. a station on the valley bottom; a), and Libertów (i.e. a station on a hilltop; b)

(a)



(b)



sensors

MDPI

Article

Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics

Piotr Sekula [1,2,*], Miroslaw Zimnoch [1], Jakub Bartyzel [1], Anita Bokwa [3], Michal Kud [1] and Jaroslaw Necki [1]

[1] Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH-University of Science and Technology, 30-059 Krakow, Poland; zimnoch@agh.edu.pl (M.Z.); Jakub.Bartyzel@fis.agh.edu.pl (J.B.); Michal.Kud@fis.agh.edu.pl (M.K.); Jaroslaw.Necki@fis.agh.edu.pl (J.N.)
[2] Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute, IMGW-PIB Branch of Krakow, 30-215 Krakow, Poland
[3] Institute of Geography and Spatial Management, Jagiellonian University, 30-387 Krakow, Poland; anita.bokwa@uj.edu.pl
* Correspondence: piotr.sekula@fis.agh.edu.pl; Tel.: +48-516-467-918

Abstract: Winter smog episodes are a severe problem in many cities around the world. The following two mechanisms are responsible for influencing the level of pollutant concentrations: emission of pollutants from different sources and associated processes leading to formation of secondary aerosols in the atmosphere and meteorology, including advection, which is stimulated by horizontal wind, and convection, which depends on vertical air mass movements associated with boundary layer stability that are determined by vertical temperature and humidity gradients. The aim of the present study was to evaluate the performance of an unmanned aerial vehicle (UAV)-based measurement system developed for investigation of urban boundary layer dynamics. The evaluation was done by comparing the results of temperature, relative humidity, wind speed and particulate matter fraction with aerodynamic diameter below 10 µm (PM_{10}) concentration vertical profiles obtained using this system with two reference meteorological stations: Jagiellonian University Campus (JUC) and radio transmission tower (RTCN), located in the urban area of Krakow city, Southern Poland. The secondary aim of the study was to optimize data processing algorithms improving the response time of UAV sensor measurements during the ascent and descent parts of the flight mission.

Keywords: low-cost sensor; vertical profile; UAV; PBL; air pollution; response time

check for updates

Citation: Sekula, P.; Zimnoch, M.; Bartyzel, J.; Bokwa, A.; Kud, M.; Necki, J. Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics. *Sensors* **2021**, *21*, 2920. https://doi.org/10.3390/s21092920

Academic Editor: Lammert Kooistra

Received: 8 March 2021
Accepted: 15 April 2021
Published: 21 April 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Air quality in urban and suburban areas is a major long-term public health problem. Recent reports of air quality in Europe [1] indicate that many Polish cities do not meet the required standards. Many actions have been undertaken to improve the air quality in Poland. However, this is a complex problem that is connected to both the distribution and efficiency of pollution emission sources and local meteorological conditions. Particulate matter (PM) concentration is a parameter that is used to determine air quality. A high PM concentration affects human health [2,3], decreases visibility [4] and affects the global climate.

The concentration of individual compounds in ambient air depends on many factors, such as the location of emission sources, land forms, degree of urbanization and particular local environmental conditions. Studies of severe haze episodes in Beijing indicated that they are largely driven by meteorological conditions. High aerosol concentrations were recorded with weak wind conditions and air mass stagnation in the city [4]. The next step to better understand the dispersion of pollutants in urban areas is to investigate the boundary layer (BL) dynamics. A key element in such studies is to determine the vertical atmospheric profiles. Studies of vertical atmospheric profiles can be performed using devices such as balloon sounding [5], light detection and ranging (LIDAR) [6,7] and sound detection

and ranging (SODAR) [8]. Selected studies indicate the possibility of a hyperfine vertical structure occurrence observed in the stable nocturnal boundary layer [9], which is related to the nonturbulent motions, microfronts or intermittent drainage flows. Another example of fine vertical structure was demonstrated by Pardyjak et al. [10], where a two-layer nocturnal structure was observed in a mountain valley. Cold pool occurrence and foehn air flow preventing the breakdown of stable boundary layer and trapping atmospheric pollutants close to the ground level in a mountain valley were presented in Li et al. 2015 [11].

Interest in air quality has significantly increased and inspired many companies to develop low-cost portable air quality sensors. In parallel, large progress in developing unmanned aerial vehicles (UAVs) is observed. These two factors recently enabled the use of sensors mounted on unmanned aerial vehicles for investigation of the boundary layer. Significant development of numerous low-cost PM sensors creates a new possibility of their use onboard a UAV to study vertical distribution of particles in many locations. It has been demonstrated that PM sensor models providing comparable results to reference sensors are Shinyei PPD42NS [12], Shinyei PPD60PV, Alphasense OPC-N2 [13], Plantower PMS1003 [14] and Plantower PMS3003 [15]. Long-term test results using a new model of Plantower PMS7003 conducted from 20 August 2017 to 24 December 2017 in Wrocław, Poland, show high correlations with the TEOM 1400a analyzer results [16]. Results of that study show good precision of this sensor because the variation coefficient was less than 7%. Tests using Plantower PMS7003 in indoor and roadside outdoor locations in Shanghai, China, also show good performance, with a high linear response and low bias values.

Aerosol distribution through the atmospheric column can provide valuable information about atmospheric compositions in specific layers [17–19].

Tests using UAVs to measure vertical profiles of the atmospheric parameters are becoming more common, and they are used to measure meteorological parameters, selected aerosols and gaseous pollutants, black carbon [20], methane, carbon dioxide [21] and ozone [22] concentrations. Using UAVs to study the lower troposphere provides new possibilities because UAV vehicles can cover large areas and monitor remote, dangerous or difficult-to-access locations, which increases operational flexibility and resolution over surface observations [23,24]. Comparison of results obtained using LIDAR and an optical particle counter (OPC) onboard a UAV [19] suggests that these two measurement are complementary methods for determining vertical aerosol concentration profiles with respect to altitude range characteristic for both methods.

Publications reporting the application of UAVs for measuring vertical atmosphere profiles in urban areas [25], along motorways [26,27] and in non-urban areas [23] have shown promising results. The first studies of the lower troposphere thermal structure over Krakow up to 3000 m a.g.l. were conducted in 1970–1972 using plane PZL 101 "Gawron" [28]. Research on the lower troposphere over the area of Krakow city was conducted using an airplane with a meteorograph on board and by using a weather balloon in 1978–1979. Measurements using sound detection and ranging (SODAR) equipment have been conducted since 1980 by the Remote Sensing Department of the Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute (IMWM-NRI), in Krakow-Czyzyny. Measurements using SODAR showed that a 24-h ground inversion or elevated inversion may occur in Krakow on up to 20% of the days each year. A higher upward surface long-wave radiation flux and lower atmospheric dynamics during the cold periods cause the 24-h inversion. Based on the SODAR data, 86% of cases had stable atmospheric conditions at night and were associated with temperature inversions during the winter. During the remaining 14%, conditions were neutral and unstable. Detailed information about diurnal and annual variability of the thermal stratification in Krakow based on SODAR SAMOC-4c measurements from 1994–1999 was presented by Godłowska [29].

The aim of this paper was to demonstrate an airborne system for performing measurements of meteorological (temperature, relative humidity, atmospheric pressure and wind speed) and air quality parameters (PM_{10}) inside the boundary layer up to a few hundred meters above ground level based on a low-cost sensor set installed on board of a UAV. The

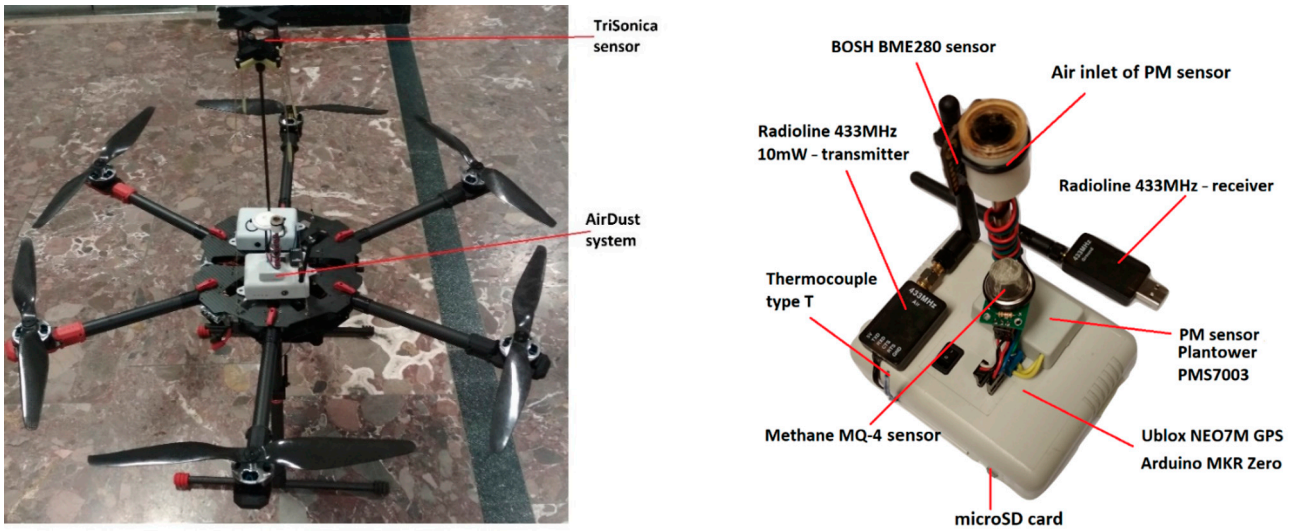
article presents configuration of the system, calibration of the sensors and full sequence of a data postprocessing procedure consisting of data smoothing and correction of sensors' response time. Finally, the performance of the system is demonstrated in the example of three atmospheric profiling measurement campaigns by comparing obtained results with other available static measurement points available in the vicinity of flight location. According to our literature studies, this is one of the few articles presenting a complete and comprehensive description of the full data flow algorithm validated by the analysis of real cases [21,30,31]. The system has been developed by the Environmental Physics Group at the AGH University of Science and Technology.

The second section presents the architecture of the system, sensor calibration and numerical procedures aimed at improving data quality consisting of time response error correction and smoothing procedure. Section Results presents the performance of the system demonstrated by the example of three measurement campaigns performed in Krakow, Southern Poland. These examples were aimed at the characterization of the transition phase of the boundary layer between stable and convective after sunrise and convective and stable after sunset. The presented results allowed us to determine the impact of the formation of convective and stable nocturnal boundary layers during the transition phase on vertical pollutant distribution in urban areas. To date, only a few studies presenting the formation of convective and stable nocturnal boundary layers using a drone measurement system in the city have been reported, e.g., [32].

2. Materials and Methods

2.1. AirDust Measurement System

Figure 1a presents an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with air quality and meteorological component sensors. The ultra-light measurement system dedicated for temperature, relative humidity, pressure and particulate matter (PM_{10} fraction) measurements is presented in Figure 1b. It was built based on the Arduino MKR ZERO microcontroller, which is responsible for communication with the sensors, storing the measurements on the memory card and sending information in real time to the ground station using a 433-MHz radio line.



(**a**) (**b**)

Figure 1. Unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with air quality and meteorological components sensors (**a**) and AirDust ultra-light measurement system (**b**) for temperature, relative humidity, atmospheric pressure, particulate matter and GPS position equipped with a data logger.

The system was powered by a drone battery, and for this purpose, a step-down converter reducing the input voltage from ca. 22 V to 5 V at 2 A was used. Temperature, relative humidity and atmospheric pressure were measured using a digital humidity, pressure and temperature sensor (BME280, Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen, Germany). It communicated with the microcontroller via an I2C interface. Additionally, the measurement system was equipped with a thermocouple type T to monitor rapid temperature changes. For PM_{10} measurements, a PMS7003 low-cost sensor (Plantower, Beijing, China) based on the light scattering method was used. To reduce the impact of water vapor condensation at high humidity and low air temperature on PM measurement, sensor air inlet was heated. Additionally, to reduce the air turbulences at the air inflow to the sensor, the air inlet was equipped with a cap located in the upper part of the drone providing a laminar flow during the drone's climb. The measurement system was supplemented with the NEO-7 GNSS module (u-blox AG, Thalwil, Switzerland) allowing monitoring of the horizontal and vertical sensor positions. Additionally, the system is equipped with an electrochemical methane (CH_4) sensor for detection of high concentration natural gas plumes, but this part was not used in the presented study. A list of components and their technical parameters provided by a producer is included in Figure 1 and Table 1. The whole system is housed in 11 × 9 × 5 cm 235 g of weight box fixed to the drone platform.

Table 1. System technical specifications.

Parameter	Value
Sampling frequency	1 Hz
Weight	235 g
Temperature operating range	−40 ÷ 85 °C
Temperature resolution	0.01 °C
Temperature noise	0.005 °C
Temperature accuracy	±1.0 °C
Temperature response time	1 s
Pressure operating range	300 ÷ 1100 hPa
Pressure resolution	0.0018 hPa
Pressure noise	0.013 hPa
Pressure accuracy	0.12 hPa
Humidity operating range	0 ÷ 100% RH
Humidity resolution	0.008% RH
Humidity noise	0.02% RH
Humidity accuracy	±3% RH
Humidity response time (0–>90%)	1 s
PM operating range	0 ÷ 1000 $\mu g \cdot m^{-3}$
PM accuracy	±10 $\mu g \cdot m^{-3}$
PM single response time	1 s
PM detectable size range, µm	0.3–10
PM size bins range, µm	0.3–0.5, 0.5–1, 1–2.5, 2.5–5, 5–10, >10
PM estimated concentrations	PM_1, $PM_{2.5}$, PM_{10}

2.2. TriSonica Wind Sensor

The second element of the presented airborne measurement system is an acoustic wind sensor using a TriSonica™ Mini Wind and Weather Sensor (Anemoment LLC, Longmont, CA, USA). This module is also equipped with a data logging module based on the

Arduino MKRZERO microcontroller and the NEO-7 GNSS module (u-blox AG, Thalwil, Switzerland) allowing monitoring of the horizontal and vertical sensor positions. Wind sensor is a 50 g miniature 3D sonic anemometer supplemented with temperature, pressure and humidity sensors (located at the bottom side of the TriSonica sensor), magnetometer and 3D accelerometer (Figure 2).

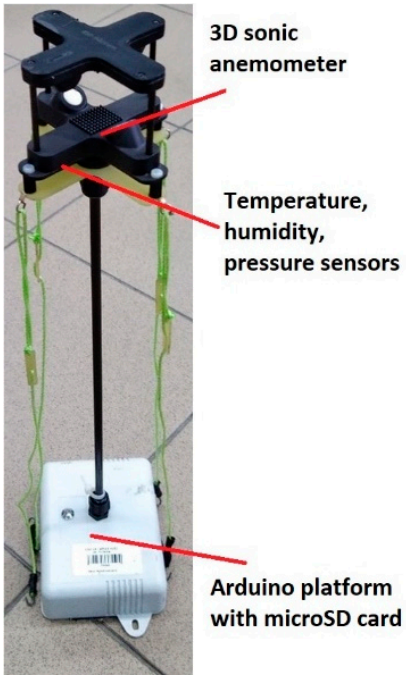


Figure 2. TriSonica^{TM}-based anemometer system.

The anemometer measures wind speed (0–50 m·s^{-1}) and wind direction (0–360°) along with the actual position of the sensor with a 10 Hz data rate. To avoid measurement disturbance due to turbulences generated by the drone's propellers, a wind sensor is fixed on a small boom ca. 30 cm above propellers' level (see Figure 2). The idea of wind direction correction using an onboard magnetometer during rotation of the drone during the flight was tested. The results show that magnetic field disturbance generated by the currents supplying the drone's motors makes it impossible to use this sensor for a correction procedure. Reliable wind direction data can be acquired only by avoiding drone rotation during the flight. A list of components and their technical parameters is included in Table 2. Test of air temperature, air humidity and atmospheric pressure sensors in the TriSonica sonic anemometer showed that their inertia is more significant than sensors used in the AirDust system (not shown in the article). Sensors are located inside the anemometer shield which causes their poor ventilation and longer time response. Due to this fact, only measurements of wind components and sonic temperature were used in the analysis.

Table 2. TriSonica^{TM} sonic anemometer technical specifications.

Parameter	Value
Size	9.1 × 9.1 × 5.2 cm
Weight	50 g
Sampling frequency	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz
Wind speed range	0–50 m·s^{-1}
Wind speed resolution	0.1 m
Wind speed accuracy	(0–10 m/s) ± 0.1 m/s; (11–30 m/s) ± 1%; (31–50 m/s) ± 2%

Table 2. *Cont.*

Parameter	Value
Wind direction range	(x/y) 0–360°; (z) ± 30°
Wind direction resolution	1°
Wind direction accuracy	±1°
Pressure range	50–115 kPa
Pressure resolution	0.1 kPa
Pressure accuracy	±1 kPa
Humidity range	0–100% RH
Humidity resolution	0.1%
Humidity accuracy	±3%
Temperature range (derived from speed of sound and humidity)	−40–80 °C (very fast response time)
Temperature resolution	0.1 °C
Temperature accuracy	±2 °C

2.3. Sensors Calibration

Calibration of meteorological and wind sensors was performed by comparison with the stationary meteorological station at the Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH University of Science and Technology (AGH UST). The meteorological station was located on the roof of the faculty building. Air temperature, relative humidity and atmospheric pressure, at the level of 20 m a.g.l., were measured using a VAISALA WXT520 platform. Additionally, particulate matter fraction measurements (PM_{10}) were conducted at the same point by a TSI 8530 optical aerosol monitor calibrated using the gravimetric method.

Figure 3 presents the comparison of tested sensors with reference instruments for three days of tests with one-minute resolution (VAISALA WXT520 platform saves data once per minute). The calibration equation and correlation coefficient R^2 were obtained using linear regression. In the plots in Figure 3, there are presented linear regression equations for individually tested parameters. For calibration of the BOSH atmospheric pressure and PM_{10} concentration sensor, the intersection points of the straight lines matching the graph were set to 0. Tests of the Plantower sensor showed the correct measurement for a concentration close to 0 $\mu g \cdot m^{-3}$. Correlation coefficient R^2 calculated for all sensors except the BOSH air temperature sensor was higher than 0.9. The highest correlation coefficient value was obtained for the PM_{10} concentration sensor and the BOSH air humidity sensor (above 0.99). Calibration of sensor Plantower indicated that concentration of PM_{10} was overestimated, therefore the slope of a regression line is equal to 0.85. Accuracy of all sensors used in the study calculated based on the accuracy provided by the manufacturer and calibration were equal for: temperature sensors from 0.6 °C (thermocouple) and 0.7 °C (BOSH temperature sensor) to 1.2 °C (TriSonica^{TM}—sonic temperature) in the range from 0 to 20 °C; for BOSH air pressure sensor, it was equal to 0.6 hPa (in the range of 300–1100 hPa, 0–65 °C); 2% for BOSH air humidity sensor (in the range of 20–90%); 0.1 $m \cdot s^{-1}$ for TriSonica^{TM} wind speed sensor (range from 0 to 10 m s^{-1}); 6 $\mu g \cdot m^{-3}$ for PM10 sensor error in the range from 0 to 100 $\mu g \cdot m^{-3}$.

Formulas of linear regression were used to correct the systematic error of measurements presented in this article.

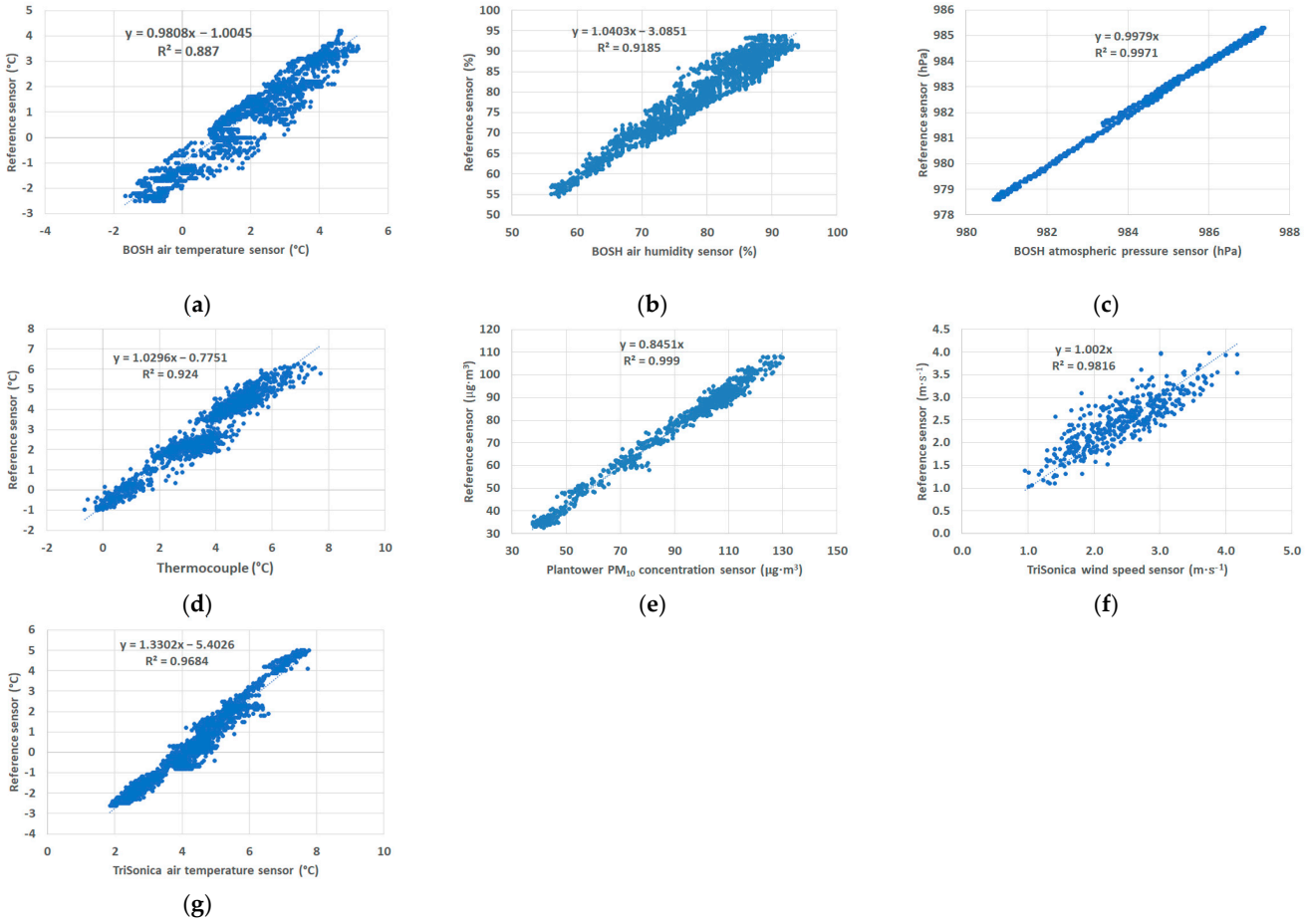


Figure 3. Comparison of the tested sensors with reference instruments: (**a**) air temperature—BOSH sensor; (**b**) air humidity—BOSH sensor; (**c**) atmospheric pressure—BOSH sensor; (**d**) air temperature—thermocouple; (**e**) PM_{10} concentration—Plantower sensor; (**f**) TriSonica^{TM} wind sensor, (**g**) TriSonica^{TM} sonic temperature.

2.4. Smoothing Procedure

To remove the noise related to the sensors, the local polynomial regression fitting method was used. Locally estimated scatterplot smoothing (LOESS) is one of the most common representations of the above procedure that combines multiple regression models in a k-nearest-neighbor-based meta-model [33]. At each point within the data set range, a low-degree polynomial was fitted to a data subset. The polynomial was fitted using weighted least squares, giving more weight to the points near the area where the response was being estimated and less weight to points that were further away. The value of the regression function for the point was then obtained by evaluating the local polynomial using the explanatory variable values for that data point. The LOESS fit was complete after the regression function values had been computed for each from the n data points. The method was implemented using R software, and it was called the LOESS function [34]. The vertical profile of air temperature without smoothing (raw measured data) and the results of the LOESS method are presented in Figure 4. The degree of smoothing was set to 0.1, which means that 10% of the data were used in the calculations for each point. Using higher values caused data smoothing that was too strong, and therefore, too much valuable information about the atmospheric vertical profiles was lost. The degree of the polynomial used in the calculation is a default value that was equal to 2. The smoothing method was used to remove noise from the vertical profiles of the air temperature, air humidity, air pressure and PM_{10} concentration profile.

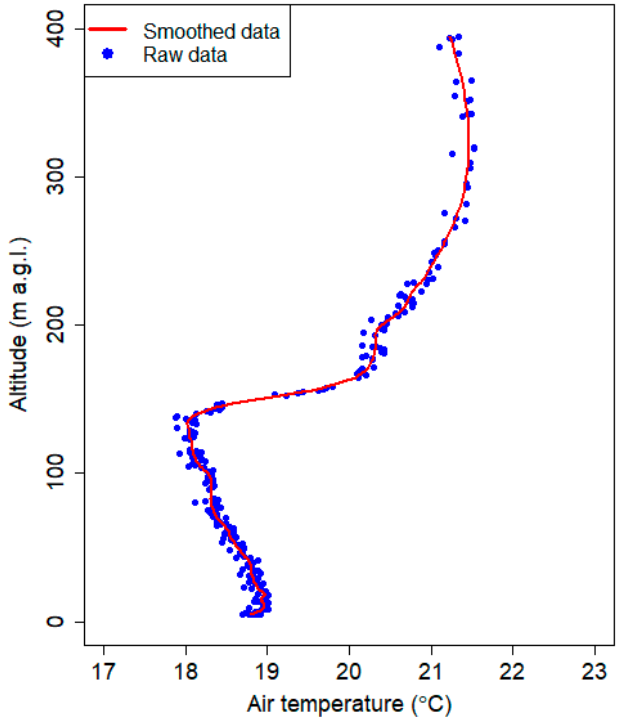


Figure 4. Smoothing data using local polynomial regression and the vertical profile of the temperature measured on 3 August 2018 at 3:23 UTC.

2.5. Correction of Sensors' Response Time

Calibration of sensors presented in Figure 2 was made for slow-changing meteorological parameters, therefore inertia of the tested sensor was invisible. During the evening or early morning, measurements of vertical profiles of atmosphere differences between ground measurements and measurements at a few hundred meters can be significant. Therefore, measurements of meteorological components [35] and gas concentrations [36] in the atmosphere are subject to several sensor-related sources of error. One of the most common in atmospheric measurements is time-lag error, which occurs in radiosonde profiles [37] or mobile measurements [38]. It is caused by the fact that sensors need a certain time in order to reach equilibrium with their ambient environment. To correct this error for humidity and temperature sensor, the procedure based on Equation (1) [39] time-dependent response presented below was developed.

$$\frac{dU_m}{dt} = \frac{1}{k} \cdot (U_a - U_m), \tag{1}$$

U_a and U_m are ambient and measured parameter values, respectively; the coefficient k is sensor time constant dependent on atmospheric conditions. "The sensor time constant is not the same for all atmospheric conditions. For temperature sensors, the sensor time constant is found to be primarily dependent on the atmospheric pressure (air density) and the ventilation of the sensor. For relative humidity sensors, the sensor time constant is additionally a function of absolute temperature and water vapor content. A decrease in temperature and atmospheric pressure leads to increased sensor response times, and so does a lack of ventilation and low water vapor content" [39]. Time-lag error in vertical profiling depends also on the vertical velocity of sensors.

Solving Equation (1) for U_a provides a simple way to compute a true ambient parameter from measurements [36]. Before calculation of a derivative, original datasets had to be smoothed. Earlier studies of this issue confirmed the need to smooth the data before correction [37–39]. To compute derivative dU_m/dt, a 4th-order Savitzky–Golay filter was used [40,41] with a length of 11 samples, without losing detailed information

of the vertical structure of the atmosphere. Calculated derivative dU_m/dt was smoothed to omit sudden changes (peak values). It should be noted that to compute a derivative, homogenous-in-time data with known time resolution are needed.

To remove the noise related to the sensors, the local polynomial regression method was used, and detailed information about this method is presented in Section 2.3.

The coefficient k was determined for each flight by an optimization that minimizes the difference between the corrected humidity and temperature profiles for ascent and descent profiles.

In order to validate the calculations, tests of time response of temperature and humidity sensors for big amplitudes of temperature and humidity in indoor-outdoor tests in the cold season were conducted. For this case, the sensors were moved inside and outside the window assuming that the time course of temperature and humidity should be a quadratic wave. By comparing results with the theoretical time course, k coefficient was calculated. Tests indoor-outdoor lasted several minutes until sensors stabilized. Obtained time curves of temperature and humidity were smoothed using 10% of the data. Calculation of derivative dU_m/dt was obtained by using 11 points. Calculated derivatives' curves were also smoothed by using 10% of data. Figure 5 presents an example plot of air humidity and temperature time series before and after correction. At the moment of putting outdoor or indoor humidity sensor, a sudden peak of humidity was observed (caused by condensation and drying of the plate on which the sensor is located)—Figure 5e,f. In order to omit enhancement of the sudden peak of humidity observed during the change of air conditions, some data were removed, and results are presented in Figure 5c,d. Optimal k coefficient was found to equal 20, 120 and 220 for the thermocouple, BOSH temperature sensor and BOSH humidity sensor, respectively.

Tests of temperature change rate at indoor-outdoor conditions pointed out that time response and temperature change rate of the thermocouple was significantly faster than the BOSH sensor. After applying a correction method to the thermocouple and BOSH time course of temperature, differences between both sensors' responses were smaller.

Detailed information about the time response of the sensor, length of sensor stabilization and temperature/humidity amplitude are included in Appendix A Table A1. Analysis of results presented in Figure 5 pointed out that the time response of temperature sensors on condition change was faster even by 60 s; before correction of the time course of the thermocouple, there was a visible sharp change of temperature in the first few seconds. Due to the fact that the optimal k coefficient for the thermocouple is relatively small compared with the coefficient for the BOSH temperature sensor, the rate change of temperature in 1 s is higher from the reference value by 15%–20%. Significant differences between reference time course and time course after correction are visible at air temperature and humidity courses from the BOSH sensor (Figure 5a–d). Length of the period during temperature or humidity change in the range from 10% to 90% of maximum amplitude is two or even three times shorter than the reference value.

However, differences of the rate of parameter change in time after correction are visible between heating and cooling of the sensors, from 15–20% lower for the thermocouple and air humidity BOSH sensor to 140% lower for temperature BOSH sensor for heating.

Presented procedures were applied to vertical profile correction. During the flight operation, vertical drone speed can differ slightly, among others during landing and take-off or caused by the disturbances (wind gusts), and due to this fact density of points in the vertical profile slightly fluctuates. Because of uneven distribution of measuring points as a function of height, smoothing original data and calculated derivative were made to the altitude, not time. Smoothing procedure was applied to the original data and calculated derivative. Depending on the amount of measurement points, the length of the sample used for smoothing varied from 20% to 30% of all data in the profile.

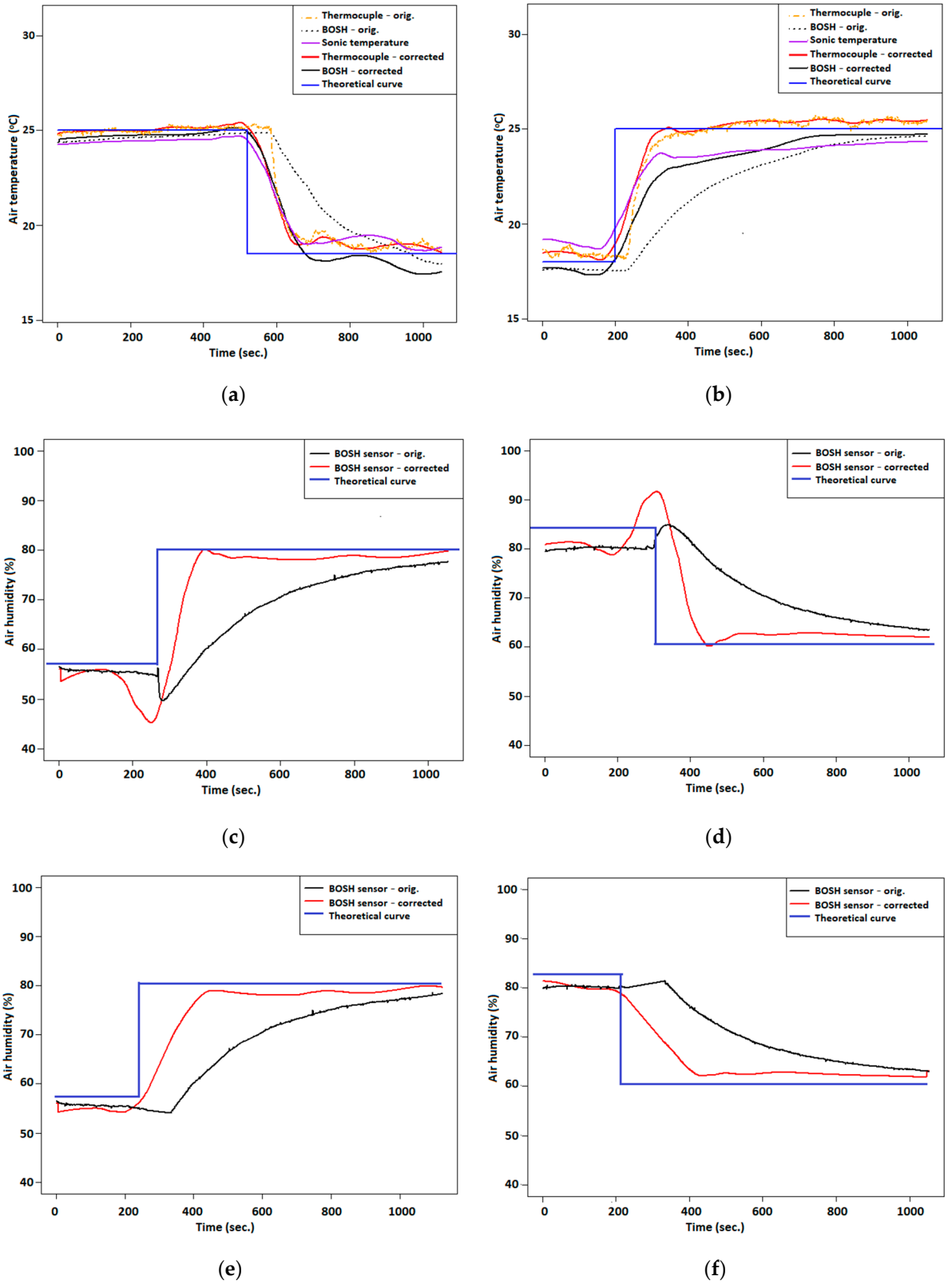


Figure 5. Test of response time correction in the outdoor-indoor conditions test: (**a**) temperature sensors response—cooling; (**b**) temperature sensors response—heating; (**c**) air humidity sensor response—moistening; (**d**) air humidity sensor response—drying; (**e**) air humidity sensor response—moistening (with data overshoot correction); (**f**) air humidity sensor response—drying (with data overshoot correction).

The flight corresponding to the ascent and descent of the drone was treated as two separate sets of data; for one data set containing both phases, the method did not give promising results.

In order to determine the convergence of the vertical profile measured during the ascent and descent parts of the profile, the mean square error (RMSE) value was determined. Calculations of RMSE were conducted for the pair of points with an altitude difference of less than 4 m.

Because during the last phase of landing at a low altitude disturbances generated by drone are significant, measurements at the lowest layer up to altitude 10– 15 m above the ground level were omitted.

Figure 6 presents the examples of temperature and humidity vertical profiles before and after correction.

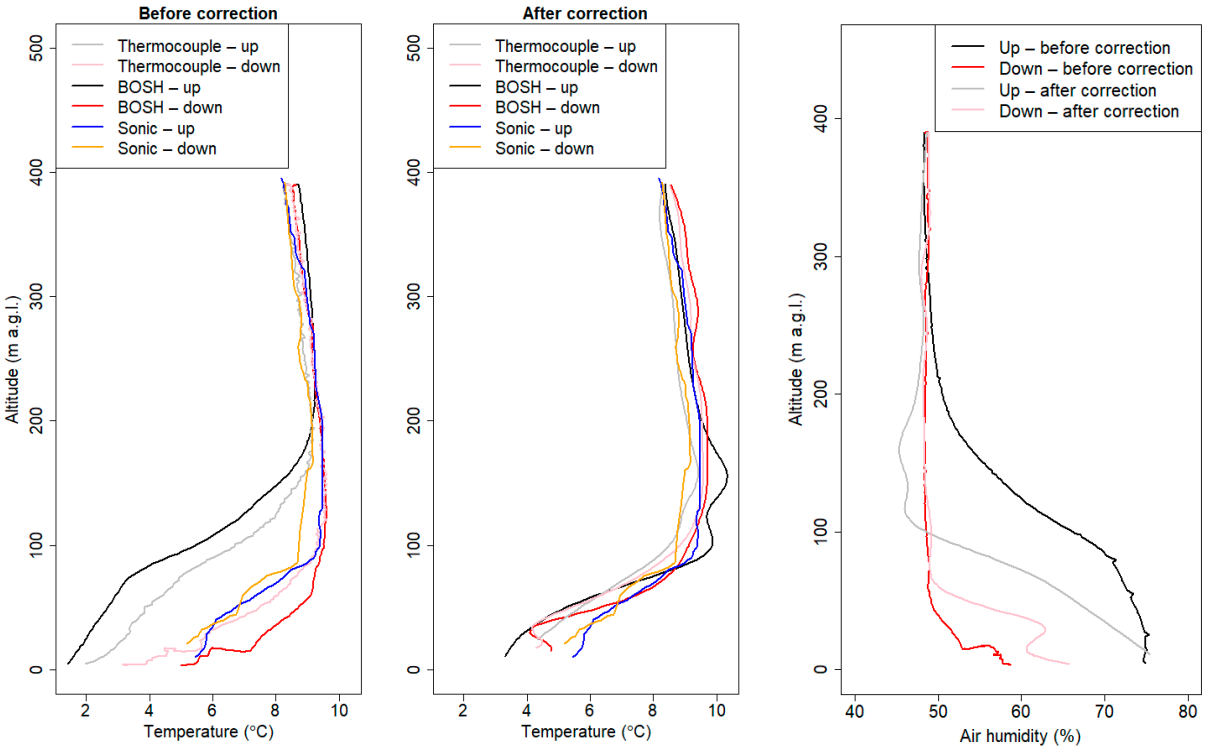


Figure 6. Vertical profiles of the atmosphere before and after correction method—flight at 7.3.2019 6:11 UTC: (**a**) air temperature; (**b**) air humidity.

Coefficient k for the thermocouple and temperature BOSH sensor was set to 24 and 44, respectively. Optimal coefficient for the BOSH air humidity sensor was found to be 50. After the correction method, we could observe that differences between ascent and descent vertical profiles were significantly smaller. Differences between the BOSH sensor and thermocouple at an altitude between 0 and 200 a.g.l. were reduced by the presented procedure. Air humidity profiles during descent and ascent of the drone after correction procedure still differed at the lowest part of the atmosphere, but a significant improvement was observed. Relative humidity profiles presented in Figure 6b show that this method has still some limitations.

2.6. Study Area

Krakow is the second-largest city in Poland (area: 327 km^2, population: 771,000 inhabitants), located in the Lesser Poland region, in a large valley of the Vistula River. The city's

area includes three different regions and geological structures, i.e., the Polish Uplands, the Western Carpathians and the basins of the Carpathian Foredeep [42]. The dominant part of the city is located in the third region, with a diversified natural environment. The hilltops bordering the city to the north and the south reach about 100 m above the river valley floor, similar to the hilltops in the western part of the valley which means that the city is located in a semi-concave land form (open only to the east) and sheltered from the prevailing western winds (Figure 7). This location is responsible for frequent air temperature inversions and the prevailing weak western winds, which contribute to the poor ventilation in the city. A clear reduction in the wind speed in the city is reflected by the frequent incidence of atmospheric calm. Analysis of data from 2001–2010 indicated that there was atmospheric calm in Krakow during an average of 16.8% of the year [43]. Mobile measurements of air temperature during calm and cloudless nights indicate that most probably katabatic flows occur on the slopes of the hills which surround the city, but the resulting cold air pool is formed only in rural areas, i.e., those flows do not enter the urbanized area and have no impact on the urban canopy layer inside the city [44].

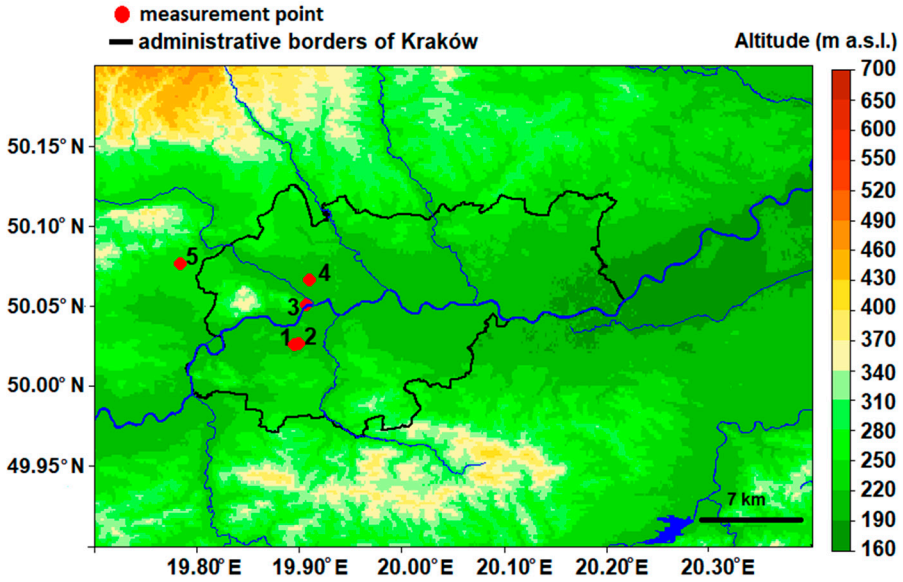


Figure 7. Location of measurement points in Krakow.

Vertical profile measurement data were collected on the Jagiellonian University (JU) Campus (UAV place; Figure 7). The flight point was located in the western part of the city; the terrain was covered with grass, and altitude differences of the surrounding area were up to 15 m (average value, 209 m a.s.l.). The flights were performed up to a height of 500 m a.g.l., and the maximum flight height was determined by the limitations of the aircraft. The location of the vertical measurements using a UAV was chosen based on safety requirements (e.g., distance from buildings and people), and it was a location that was close to the city center that was representative for incoming air masses.

Vertical profile measurements representing the lower part of the profile (altitude up to 5 m a.g.l.) were compared with the observations from a meteorological station located at a distance of 300 m east from the flight point on the JU Campus (Figure 7). Small differences between measurement results that originated from flights and the meteorological station may be caused by the influence of microclimatic conditions in both locations. The flight point is located in open space, while the station is located between three-story University buildings.

Vertical profile measurements of air temperature and relative humidity corresponding to altitudes of 50 m a.g.l. and 100 m a.g.l. were compared with the measurements from the RTCN tower, located 2.7 km north from the flight point. The location of the RTCN tower is shown in Figure 7. Temporal resolution of meteorological parameters from the JU Campus and RTCN tower stations was equal to 10 min; for the AGH UST station, temporal

resolution was equal to 1 min; measurements from the synoptic station of Balice had hourly resolution. Location of measurement points used in the study is included in Table 3.

Table 3. Geographical coordinates of measurement points.

No.	Name of Place	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Height (m a.s.l. *)
1	Location of vertical measurement (UAV ** place)	19.898	50.026	209
2	JU Campus meteorological station	19.902	50.026	212
3	RTCN tower	19.909	50.051	222
4	AGH UST *** meteorological station	19.912	50.067	220
5	Synoptic station Balice	19.909	50.051	237

*—meters above sea level (m. a.s.l.). **—unmanned aerial vehicle (UAV). ***—AGH University of Science and Technology (AGH UST).

Explanations: numbers as in Table 3. Topographic data used in Figure 7 come from Shuttle Radar Topography Mission database provided by the National Aeronautics and Space Administration (https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/ (accessed on 18 April 2021)).

2.7. Measurement Periods

From December 2017 to November 2018, more than 60 vertical profile test measurements of the atmospheric parameters were performed in Krakow. In the present study, measurements taken on the following 2 days (12 flights) were analyzed:

- 18 September 2018 from 15:00 UTC to 21:00 UTC, i.e., afternoon hours;
- 21 September 2018 from 4:00 UTC to 9:30 UTC, i.e., morning hours.

The aim of the measurements was to study the dynamics of the atmospheric boundary layer during transition phases between the convective boundary layer (CBL) and stable boundary layer (SBL) after sunset and between SBL and CBL after sunrise. The measurements were made during weather conditions controlled by a high-pressure system, with clear sky and weak wind at the ground level. High-pressure weather in the summer season is favorable for fog formation and a strong thermal inversion at night and strong convective mixing during the day.

In 2019, the drone system was expanded by a TriSonica sonic anemometer sensor. An example of wind profiles associated with other measured parameters in profiles is presented for the flight campaign performed in March 2019.

Observations during the measurements, synoptic comments (available at http://www.meteo.pl/ (accessed on 18 April 2021)) and surface pressure charts (available at https://danepubliczne.imgw.pl (accessed on 18 April 2021)) were used to describe the meteorological conditions during the measurement campaigns.

2.8. Vertical Profile Measurements

Each measurement campaign consisted of several vertical flights performed over the same location approximately every hour. The duration of each flight lasted from 5 to 15 min depending on the maximum altitude and the climb velocity, which ranged from 1 m s^{-1} to 2 m s^{-1}. The maximum drone climb velocity (2 m s^{-1}) was determined based on the assumed flight altitude and battery operating time. It was tested that, for velocities below 2 m s^{-1}, the obtained results after applying all postprocessing algorithms described in Section 2 reflected actual variability in the vertical profile. Because of strong turbulence generated by the multirotor propellers below the aircraft, the sensors were located on the upper part of the drone, and only the ascending part of the flight was analyzed.

3. Results

In this section, vertical profile measurements from three campaign days are analyzed. Figures presented in Sections 3.1–3.3 show vertical profiles of the air potential temperature, relative humidity and PM_{10} concentration for all campaigns. Additionally, for the third

campaign wind speed profiles are presented in Section 3.3. In subsections below are presented the time series of air temperature, humidity and wind speed recorded at the surface station of the JU Campus. The red points added to charts represent measurements conducted by the UAV platform at the start of each flight. Thermal stratification of the atmosphere in Krakow during the measurement days are presented in the last Figures at Sections 3.1–3.3, using data from two different levels at the RTCN tower (50 and 100 m a.g.l.). Points presented in those Figures represent measurements of air temperature made by a drone during each flight at the altitudes that were closest to the tower sensors' elevations.

Due to the fact that the measurement campaign was conducted during nighttime and daytime conditions, temporal variation of vertical PBL structure was observed. During each campaign period, ground thermal inversion with and ground layer with increased air humidity were observed. Depending on temporary conditions, the depth of both layers could be different.

For this purpose, the vertical gradient of temperature/humidity was calculated. A location where significant gradient change is observed in the vertical profile of potential temperature is assigned as estimated ground inversion layer height (see Figure 8). Studies of the vertical air humidity profile and its vertical stratification will be continued in further work in order to better understand the phenomenon. Atmospheric stability was estimated based on the vertical gradient of potential temperature [45]. Based on the analysis of all vertical profiles from the measurement campaign of potential air temperature and climatological analysis of the analyzed region (not shown) for neutral and stable conditions, potential temperature gradient interval was set to ±0.7 °C/100 m and >0.7 °C/100 m, respectively. Cases of unstable atmospheric conditions with the potential gradient lower than −0.7 °C/100 m were not observed. General information presenting characteristics of relative air humidity and potential air temperature vertical profiles are included in Appendix A, Tables A2–A4.

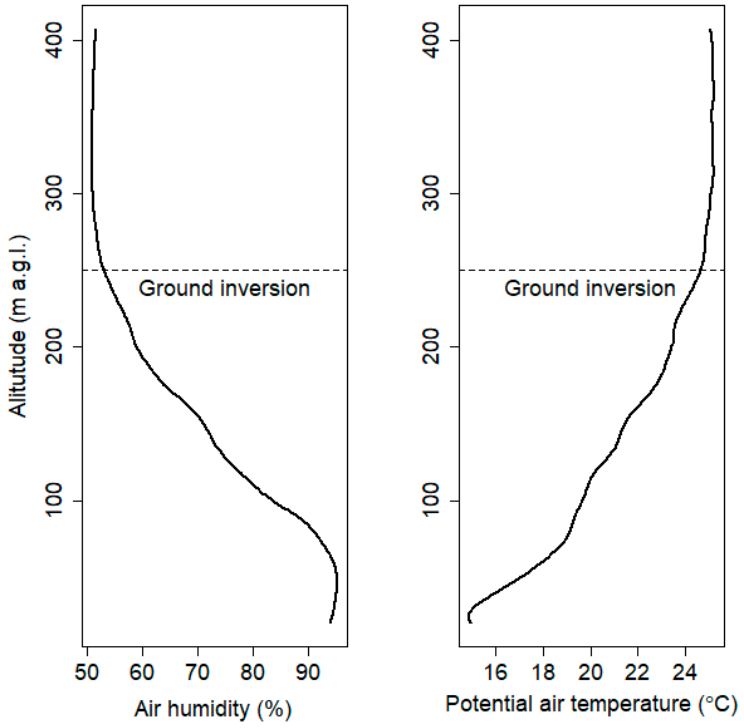


Figure 8. Ground inversion layer height at sixth flight (18 September 2018).

3.1. 18 September 2018—Evening Campaign

Between 17 and 21 September 2018, Poland was under the influence of a high-pressure system that was moving slowly from the west to the east of the European continent. Polar,

warm maritime air masses were passing over Poland. During the measurement period of 18 September 2018, the sky was almost cloudless, and the wind in the afternoon was weak (below 2 m s^{-1}). At night, local radiation fog was observed close to the ground level at flight point. Sunset for the city of Krakow was at 16:50 UTC, and flights were conducted from 15:00 UTC until 21:00 UTC.

Figure 9 presents vertical profiles obtained during this campaign. The maximum altitude of the measurements varied between individual flights from 200 m a.g.l. up to 500 m a.g.l.

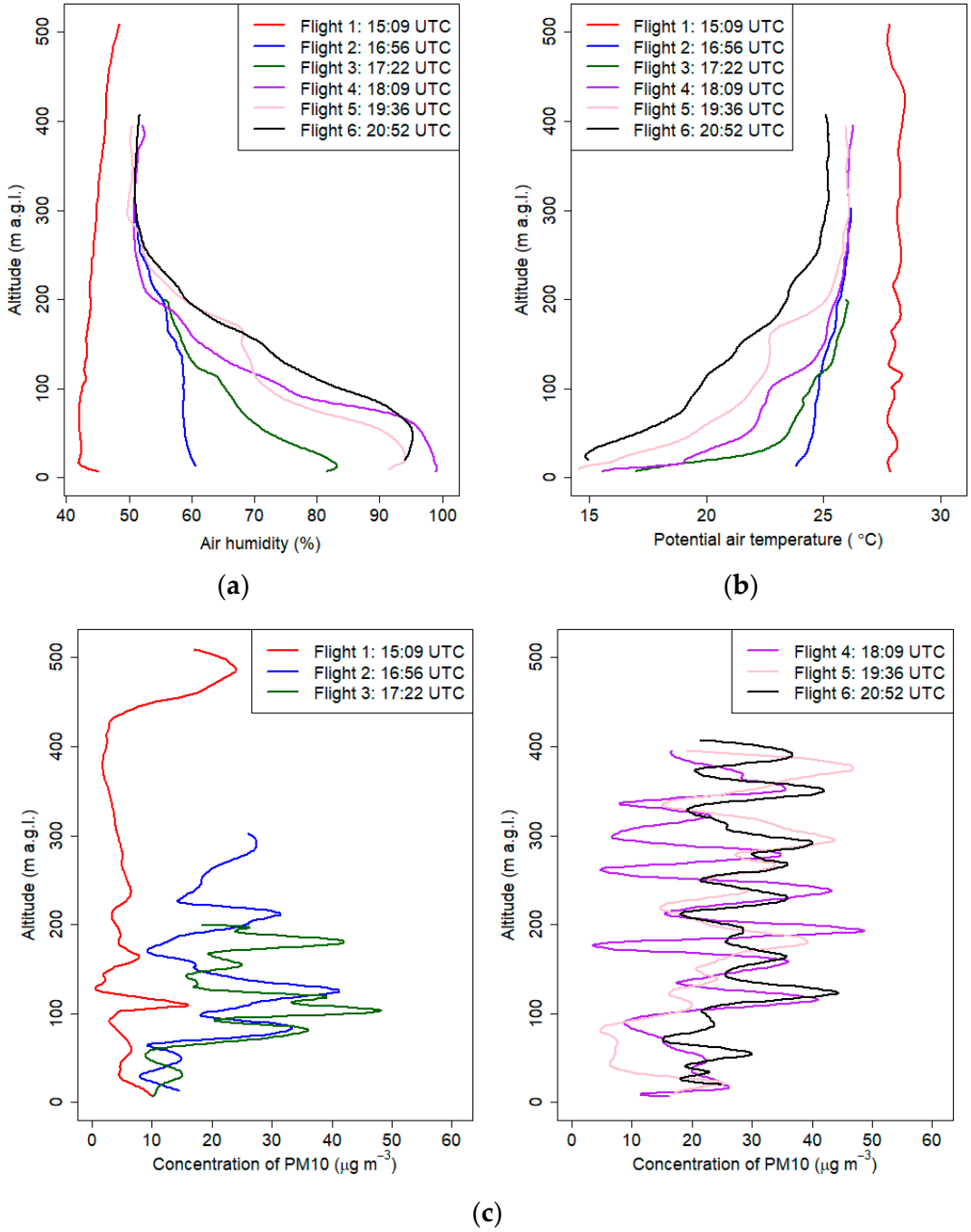


Figure 9. Vertical profiles of relative humidity (**a**), potential air temperature (**b**) and PM_{10} concentration (**c**) on 18 September 2018 from 15:00 UTC to 21:00 UTC.

First measurements were made 2 h 40 min before the sunset. The vertical profile of the potential temperature and relative humidity at the first flight was almost constant, and

maximum differences in the potential temperature were approximately 0.8 °C. Starting from the third flight (16:32 UTC), formation of ground thermal inversion was observed. The process started before the sunset, because of strong cooling of the ground at clear sky conditions.

The observed mean gradient of the potential temperature from the ground level up to 300 m a.g.l. at the sixth flight was equal to 3.3 °C/100 m. The largest change in potential air temperature was measured during the third flight. Differences in the potential air temperature between 7 m a.g.l. and 40 m a.g.l. were 6.1 °C (the potential temperature gradient was equal to 18 °C/100 m). Similar phenomena were presented in Banta et al. 2007 [46] defined as a very stable boundary layer and as a shallow boundary layer with a thickness of 10–30 m with weak intermittent turbulence within the strong surface-based radiation inversion. Because of strong surface cooling at night, we observed radiation fog, which was also visible in the vertical profiles of air humidity after 18:00 UTC. Air humidity measurements suggested that the upper limit of the fog was 60 m a.g.l. Subsequent vertical air humidity profiles above 290 m a.g.l. did not differ significantly for flights 2 and 6. Measurements of vertical profiles of potential temperature and relative humidity indicated that in the valley, a cold air pool developed below valley depth. Significant decrease of air humidity and potential temperature in the layer between 60 and 300 m a.g.l. indicates that at the upper layers above the valley, advection of drier and warmer air masses occurred.

The PM_{10} concentration in the vertical profile measured at 15:09 UTC also confirmed that the lower part of the planetary boundary layer (PBL) was homogeneous, and values from the ground up to 400 m a.g.l. were less than 20 μg m^{-3}. PM_{10} concentration values observed during the first flight were higher in the upper part of the profile, with the maximum value of ca. 30 μg m^{-3} observed close to maximum altitude. Higher PM_{10} values observed in the upper part could be caused by an emission plume originating from a powerplant located ca. 8.5 km southwest from the flight location.

During the night, the PM_{10} concentration in the profile increased, but the maximum concentration in all profiles did not exceed 50 μg m^{-3}. Analysis of vertical profiles of PM_{10} concentration indicates that pollution in the Vistula River Valley in the layer up to 50–70 m a.g.l. did not vary significantly (small fluctuations). However, during flights 2–6, at a layer above 100 m a.g.l. (valley depth), significant fluctuations in pollution were visible. Possible explanation of this phenomenon is occurrence of pollutant transport from distant areas or influence of residual turbulence on pollutants trapped in the ground inversion layer and residual layer located above.

Second possible scenario is occurrence of a nocturnal low-level jet above valley depth, which can modify the dispersion of pollutants. The long-term studies for the period 1994–1999 with the use of SODAR for this region showed the presence of a significant wind direction change during the day in the cold season and in the warm season during the night. The largest wind direction change was observed in the layer of 100–150 m a.g.l. Additionally, attention should be paid to the frequent occurrence of a significant wind speed increase in the layer 50–170 m a.g.l. during the night in the warm season (nocturnal low-level jet) [29].

Figure 10 presents the air temperature, humidity and wind conditions on 18 September 2018. During the drone measurements, the mean wind speed was below 2 m s^{-1}, with a maximum speed reaching 3 m s^{-1}; between 14:00 UTC and 16:30 UTC, the wind direction was south, but between 16:30 UTC and 17:30 UTC, the direction changed to west-south-west. Maximum air temperature measured on the JU Campus was 26.4 °C at 13:40 UTC. Air temperature during the first four flights measured by a drone differed from the measurements conducted at the Campus JU station, and the differences ranged from 1.8 ± 0.6 °C to 3.6 ± 0.6 °C. The differences during the afternoon hours may be caused by well-developed thermal turbulence, which generates significant microclimatic variability in the air temperature and relative humidity. The turbulence is the result of the differences in air temperature over various active surfaces which can be found around the measurement site and the campus. Each active surface shows a different structure of

the heat balance [47]. Air parcels of various properties are generated over each type of the active surface, and then they are moved freely so the sensors measure the properties of accidental air parcels. During the night, when the thermal turbulence is much weaker, the air temperature measurements from both sources were consistent, and the maximum difference in air temperature in flights 5 and 6 was 0.7 ± 0.6 °C. Measurements of air humidity during almost all the flights did not differ significantly from measurements made at the station, except for measurements during flight 4 when the difference was 15%.

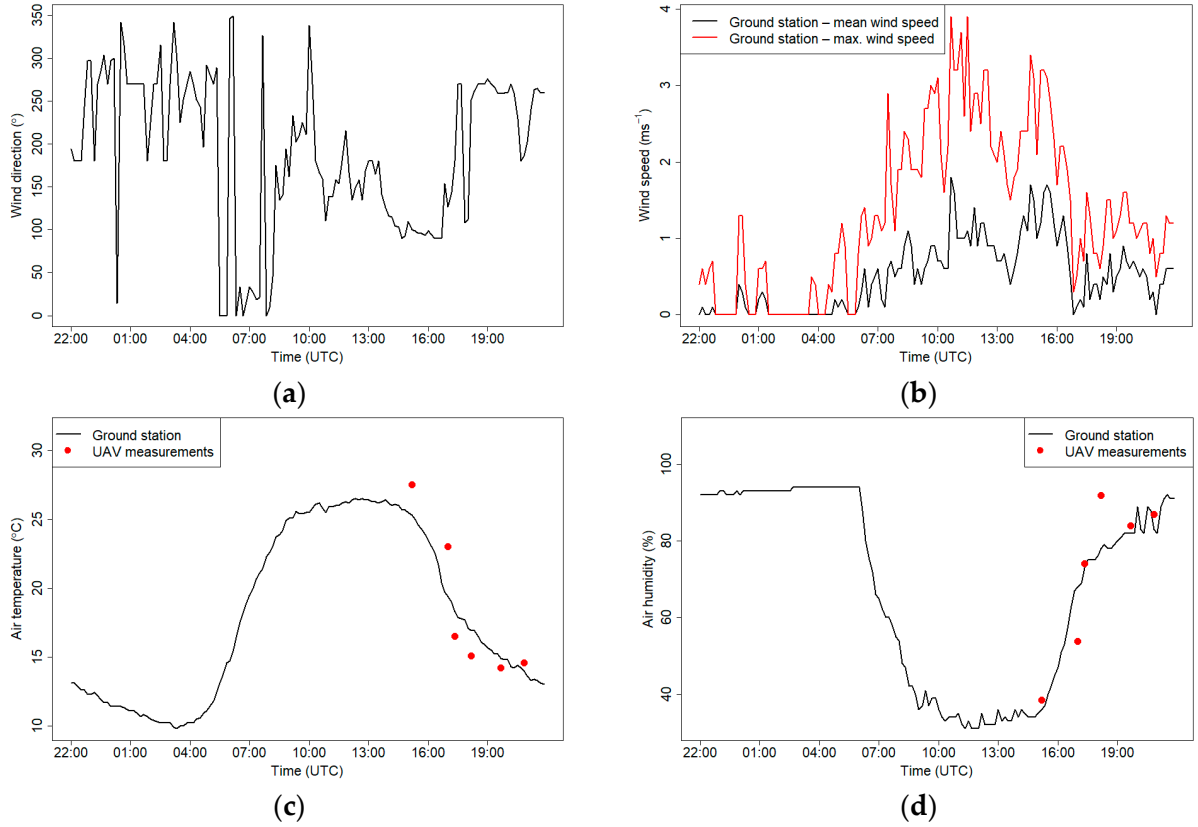


Figure 10. Wind direction (**a**), wind speed (**b**), air temperature (**c**) and relative humidity (**d**) measured at the JU Campus meteorological station on 18 September 2018. Red dots show measurements from the drone that were made at the start of each flight.

Figure 11 presents measurements of air humidity and temperature on 18 September 2018 that were measured at the RTCN tower and using a drone at the following two levels: 50 m a.g.l. and 100 m a.g.l. Observations of air temperature and humidity that were conducted using a drone during the day (first flight) were slightly different from the tower site for both levels. Temperatures measured using a drone were approximately 2 °C higher than the tower, and relative humidity was approximately 8% lower, but the observed gradients between 50 and 100 m a.g.l. were the same for both sites. For the later flights, the temperature that was measured using the drone was lower, and the relative humidity was higher than the tower results, especially for 50 m a.g.l. The differences in meteorological conditions between the two places were possibly caused by different surface radiation budgets because of differences in land cover that was adjacent to both sites. The second possibility of significant differences between layer 50 and 100 m a.g.l. is topographic relief; in the west from the RTCN tower are hilltops with altitudes that reach from 300 to 400 m a.s.l. (Figure 7, RTCN tower—point no. 3), while at the nearest region to the flight place, the altitude varies between 200 and 250 m a.s.l. Due to this fact, the tower station may be under the influence of topographic shading at selected atmospheric conditions (i.e., western advection). On the other hand, inconsistences between relative

humidity measurements can be partially caused by insufficient response time correction of the sensor on the drone (see Figure 6b).

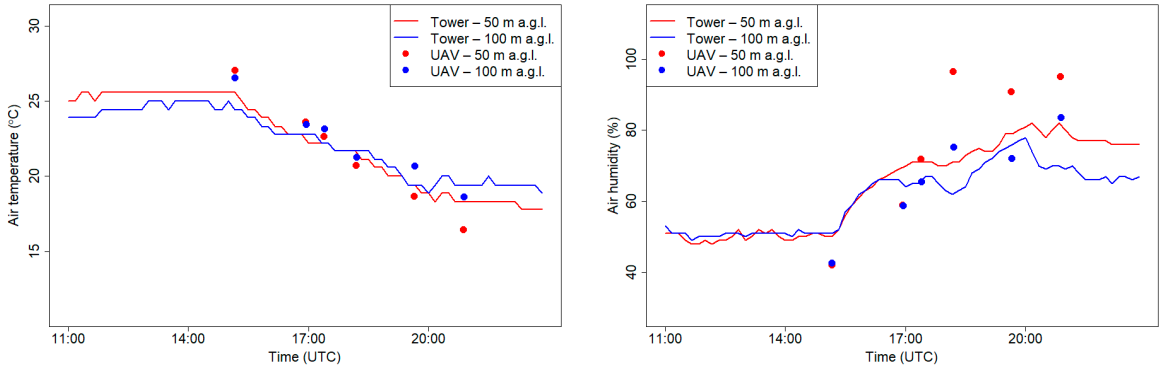


Figure 11. Air temperature (**a**) and relative humidity (**b**) at 50 and 100 m a.g.l. measured at the RTCN tower and by UAV on 18 September 2018.

3.2. 21 September 2018—Morning Campaign

On 21 September 2018, Poland was under the influence of a high-pressure system that was located on the border between Ukraine and Moldova. In the morning, the sky was clear, and fog was observed from the ground level to a height of several dozen meters. At the synoptic station of Balice, visibility until 7 UTC did not exceed 10 km; in the valley, atmospheric silence occurred (wind speed below 1 m s^{-1}).

Figure 12 presents the results of vertical profiles obtained during the flights from September the 21st. The first flight started before sunrise, and profiling was continued until forenoon. Sunrise for that day for Krakow was at 4:22 UTC, and measurements were conducted from 4:00 UTC to 9:30 UTC. Maximum altitude of the measurement ranged from 200 m a.g.l. to 295 m a.g.l.

During the early morning hours, before sunrise, atmospheric conditions were stable (cold air pool developed in the valley), which was confirmed by the vertical profiles of potential air temperature from the first and second flights (the depth of the ground inversion layer at the first and second flights was equal to 230 and 190 m. a.g.l., respectively) (Appendix A, Table A3). The gradient of potential air temperature for both flights was 5.2 °C/100 m (between 0 m a.g.l. and 295 m a.g.l.) and 6 °C/100 m (between 0 m a.g.l. and 195 m a.g.l.), respectively. During subsequent flights, the stable boundary layer gradually disappeared as a result of surface heating. Vertical profiles from flights 3 and 4 indicated the disappearance of the near-ground inversion (neutral conditions in the lowest layer with a depth of ca. 100m a.g.l.) and the appearance of the upper inversion layer. Vertical potential temperature gradient in the layer between 200 and 100 m a.g.l was equal to 5.4 °C/100 m and 3.9 °C/100m during the third and fourth flights, respectively. After sunrise, the air layer close to the ground quickly heated up, which triggered convection processes. Vertical profiles of potential air temperature from flights 5 and 6 (after 8:00 UTC) presented a developed mixed layer with constant potential temperature throughout the profile. Significant differences of the vertical profile of air humidity between the first and second flights at a layer between 70 and 200 m a.g.l. indicate that advection of dry warmer air masses caused destruction of the cold air pool from upper layers.

During the last flight, we observed a thermal plume between 190 and 250 m a.g.l. The maximum difference between the potential temperature in the plume and the surrounding air was 2.8 °C, while the maximum value was measured at 240 m a.g.l.

Accurate analysis of the subsequent pollutant concentration profiles provided valuable information. First flight in the early morning indicated that PM_{10} concentration at the ground layer up to 150 m a.gl. slightly increased with the altitude; at the layer above were

visible significant fluctuations of PM_{10} concentration. After the sunrise, vertical profiles of PM_{10} concentration changed because of convective movements.

A significant change in the PM_{10} concentration on the first flight was measured at 150 m a.g.l. Due to the fact that the PM_{10} sensor inlet was heated, the error caused by significant air humidity change was reduced (provided by laboratory experiments not shown in the article). Sudden change of PM_{10} concentration close to the transition layer observed at the vertical profile of air humidity was probably caused by new particle formation (NPF), which was also observed at the top of the atmospheric boundary layer (ABL) in different studies [32]. Research by Platis et al. (2016) [48] indicated that the thermodynamic conditions such as high thermodynamic fluctuations, strong gradients of temperature and humidity near the top of the ABL were favorable for the NPF. Vertical profiles of PM_{10} from the second and third flights showed that at an altitude of ca. 200 m a.g.l. transport of pollutants occurred; in subsequent flights, increased PM_{10} concentration was not visible at this altitude, which is probably caused by a change of meteorological conditions (wind vertical profile and upward convection movements). The PM_{10} concentration in the vertical profile up to 250 m a.gl. was significantly reduced after 9:00 UTC, and the values did not exceed 20 μg m^{-3}, except local maximum at 100 m a.g.l. (24 ± 6 μg m^{-3}).

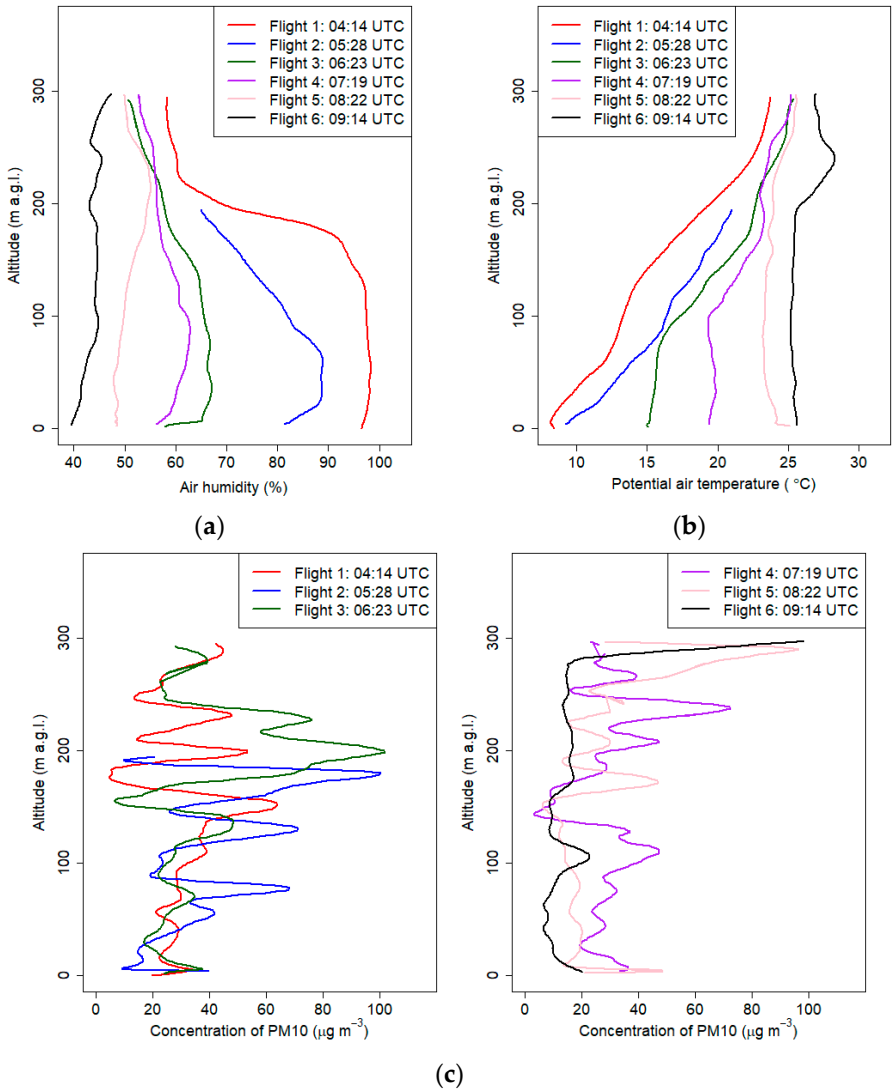


Figure 12. Vertical profiles of relative humidity (**a**), potential air temperature (**b**) and PM_{10} concentration (**c**) on 21 September 2018 from 4:00 UTC to 12:00 UTC.

Figure 13 shows meteorological conditions on 21 September 2018. The wind direction during the morning was changing from north to west-southwest at 8:30 UTC, mean wind speed during the night (until 8:00 UTC) was less than 1 m s^{-1}, and maximum wind speed during the measurements was 8 m s^{-1} at 10:00 UTC. Measurements of air humidity and temperature that were obtained using the drone were consistent with measurements from the meteorological station.

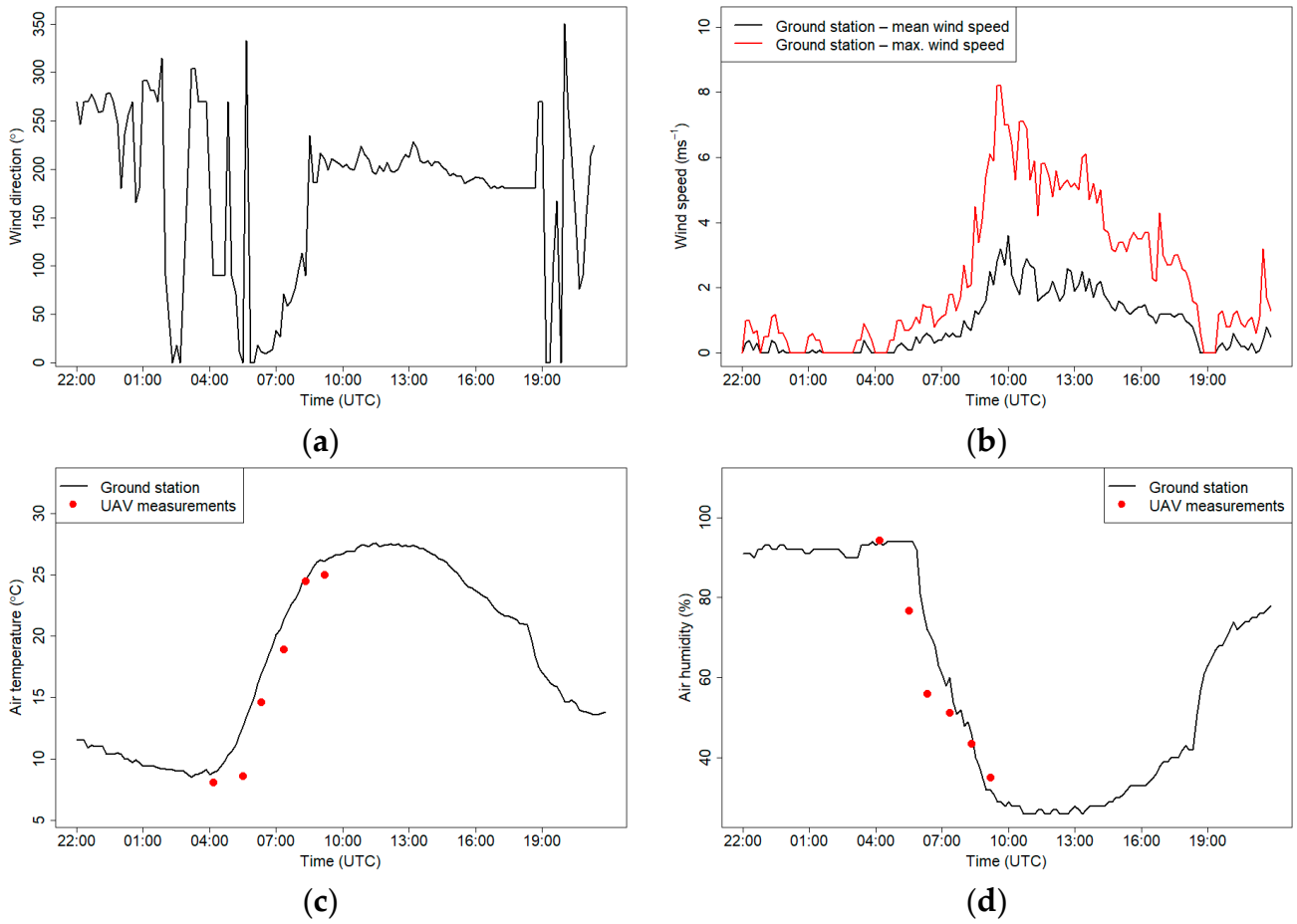


Figure 13. Wind direction (**a**), wind speed (**b**), air temperature (**c**) and relative humidity (**d**) measured at the JU Campus meteorological station on 21 September 2018. Red dots show measurements from the drone made at the start of each flight.

Figure 14 presents measurements of air humidity and temperature on 21 September 2018 at the RTCN tower and using a drone at two levels 50 m a.g.l. and 100 m a.g.l. Measurements at both levels differed significantly in the first two flights when air temperature from the drone was lower than the observations from the RTCN tower. Vertical profiles of air temperature and air humidity from the tower station indicated that at the western part of the Vistula Valley, during the night, ground inversion occurred. Differences between layer 50 and 100 m a.g.l. in air humidity points out that during the night there was advection of warmer, drier air close to the valley depth. After sunrise, observations from both places did not differ significantly. Lower air humidity at the flight location in comparison with measurements from the tower station after the third may have been caused by ventilation condition differences of both places.

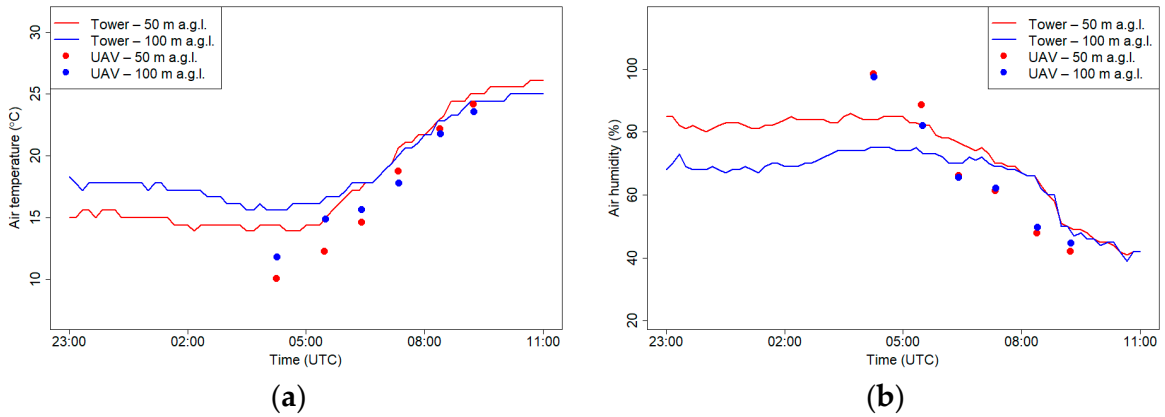


Figure 14. Air temperature (**a**) and relative humidity (**b**) at 50 and 100 m a.g.l. measured at the RTCN tower and by UAV on 21 September 2018.

3.3. 7 March 2019—Whole-Day Campaign

On 7 March 2019, air advection to Poland from the southwest was caused by the influence of the high-pressure system above Russia and the low-pressure system over the British Isles. The movement of both pressure systems to the east resulted in the inflow of a cold front on that day in the afternoon hours. Measurements from the synoptic station of Balice indicated that high cloudiness during the measurement day maintained up to 14 UTC (6–7 octants), and between 14 and 17 UTC, a sudden decrease in cloud cover up to 2 octants and subsequent increase in cloud cover occurred. Sunrise on that day occurred at 5:12 UTC, until 9 UTC there was a weak wind below 2 m s^{-1}, and afterward, there was an increase in wind speed in the Vistula River Valley.

The last presented campaign was done on March the 7th 2019 between 6:00 and 15:00 UTC. The aim was to observe the development of foehn wind occurring in the Tatra Mountains (ca. 100km south from Krakow). The first flight (Figure 15) indicated that the thermal inversion reached up to 150 m a.g.l. (potential temperature gradient equal to 5 °C/100 m); during subsequent flights (2–4), its height decreased up to 100 m a.g.l., and the vertical gradient of relative humidity and potential temperature decreased as a result of soil heating and advection of warm air masses associated with the occurrence of the foehn wind. Flights 4-11 indicated that at strong vertical mixing (well-mixed air), vertical gradient of potential temperature and relative humidity during these flights were equal on average to −0.1 °C/100 m and 1.9%/100 m, respectively (Figures 15 and 16). Air humidity in the vertical profile during the measurement campaign did not vary significantly; however, in the first three vertical profiles up to 100 m a.g.l., relative air humidity varied between 40% and 50%. The vertical profiles of PM_{10} for the first two flights (Figure 17a) showed moderate values (up to 50 µg m^{-3}) with fine structure including local concentration peaks at 80 m a.g.l. which was probably connected to the change of vertical gradient of relative air humidity from −29%/100 m in the ground layer up to 100 m a.g.l. at first flight and −33%/100 m in the ground layer up to 80 m a.g.l. to almost 0%/100 m at the upper layer. Later flights until 10:00 UTC showed low constant values, which was an effect of foehn wind intrusion into the valley and exchange of air masses (Figure 17a,b). After 11:00 UTC, the PM_{10} concentration started to rise (up to 150 µg m^{-3}), and profiles become irregular (Figure 17b,c). One possible explanation is long-range transport of particulate matter by strong foehn wind. The second possibility is that ascending airflow lifted particles from the ground, and therefore at the 10th and 11th flights, high concentration peaks in the layer up to 150 m a.g.l were observed. Final interpretation requires deeper analysis to be performed in another study. The wind speed profile showed the evolution of strong wind gradually penetrating deeper parts of the valley where the city is located. The first five vertical profiles (Figure 18a,b), with the exception of flight 2, indicated that horizontal wind speed in the layer up to 80–100 m a.g.l. did not exceed 2 m s^{-1}, which was partially caused

by topographic relief (Vistula River Valley depth). Significant increase of wind speed from the ground level up to 150 m a.g.l. (local wind maximum) at second flight was caused by a sudden intrusion of foehn wind from the East into the valley (eastern wind at 7 UTC at the JU Campus station). Sudden temporal intrusion of foehn wind is characteristic of this phenomenon which was confirmed by other studies [49,50].

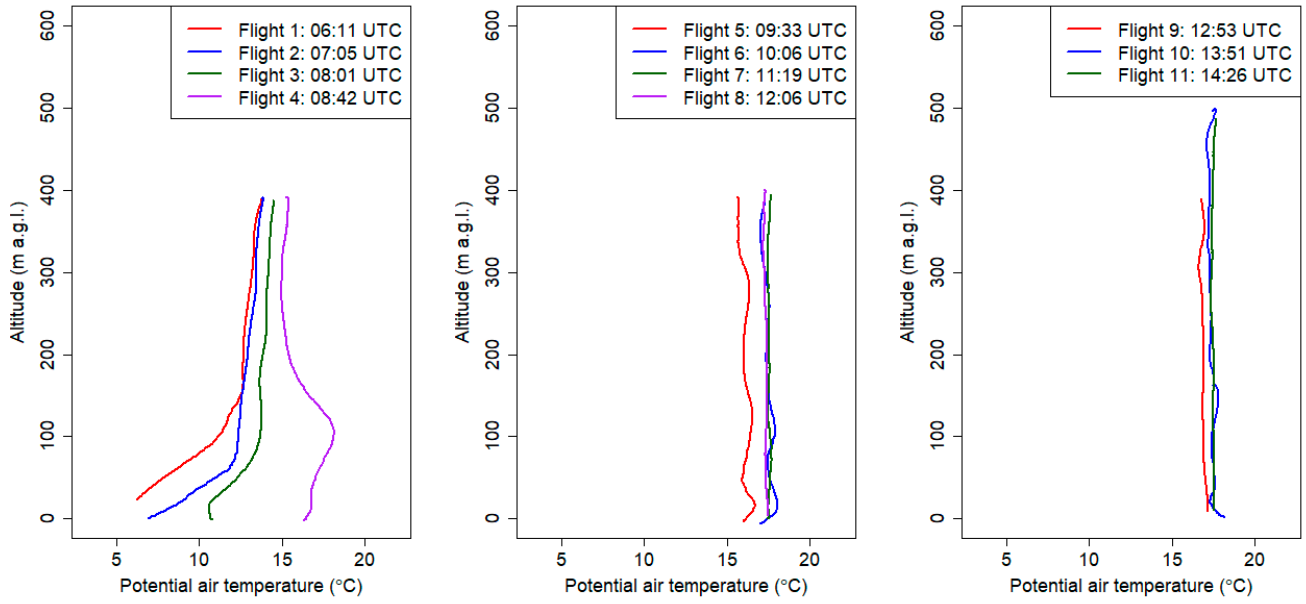


Figure 15. Vertical profiles of potential temperature on 7 March 2019 from 6:00 UTC to 15:00 UTC.

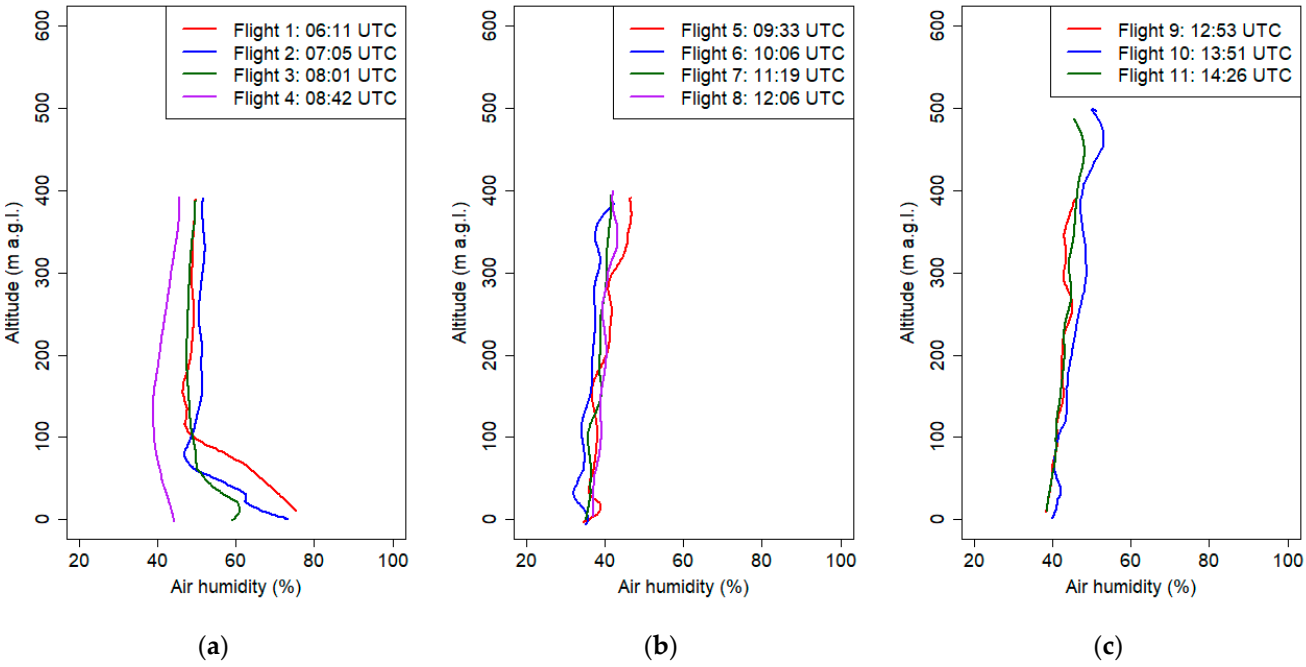


Figure 16. Vertical profiles of relative humidity on 7 March 2019 from 6:00 UTC to 15:00 UTC.

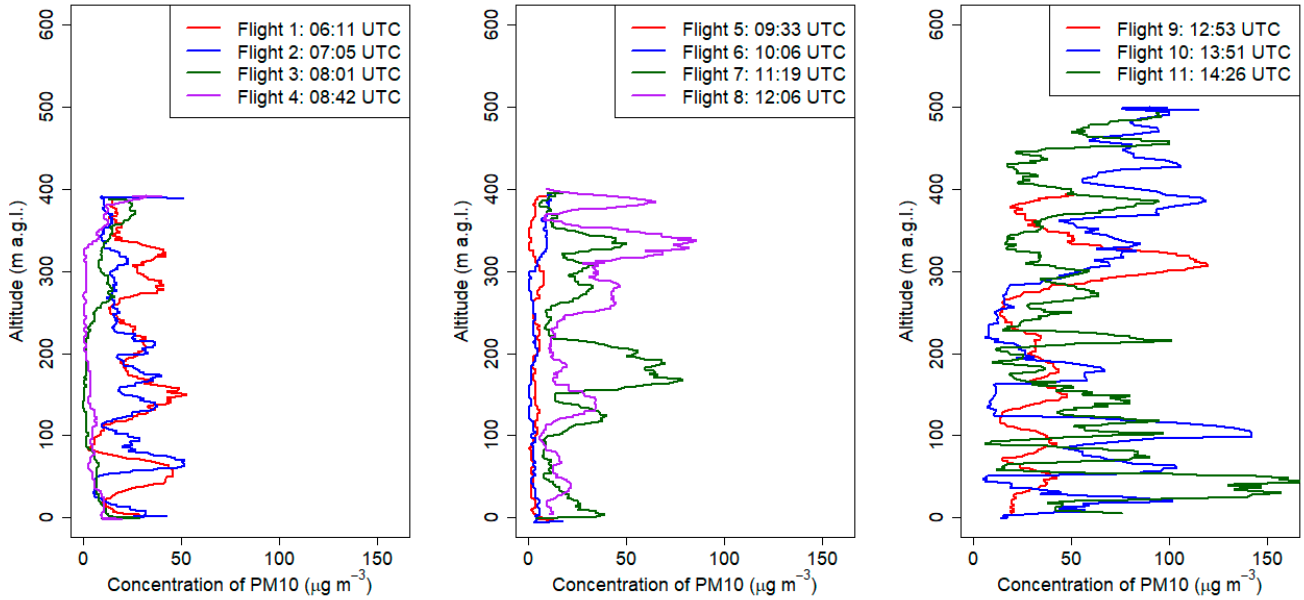


Figure 17. Vertical profiles of PM_{10} concentration on 7 March 2019 from 6:00 UTC to 15:00 UTC.

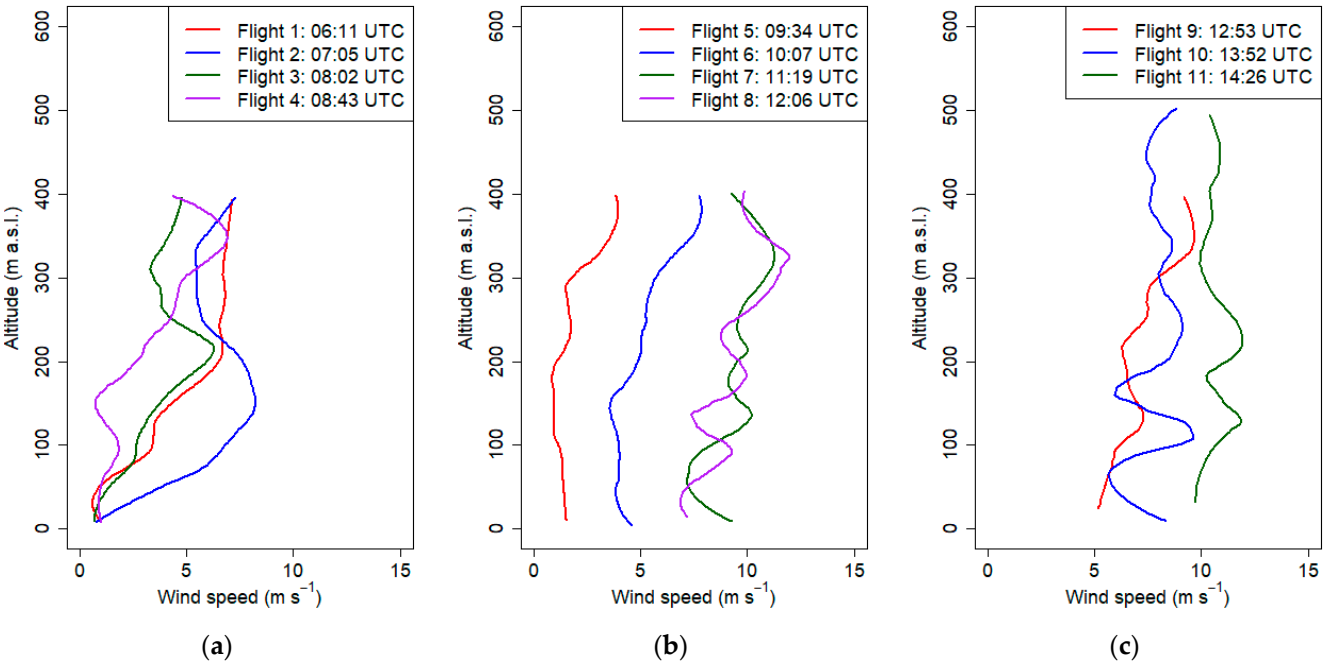


Figure 18. Vertical profiles of wind speed on 7 March 2019 from 6:00 UTC to 15:00 UTC.

During the last flight, a strong wind speed exceeding 10 m s^{-1} was observed in the whole profile (Figure 18c).

Figure 19 shows meteorological conditions at the JU Campus station on 7 March 2019. The wind direction during the morning was changing from east to west at 9:00 UTC, wind speed during the night (until 9:00 UTC) was less than 1.5 m s^{-1}, and maximum wind speed during the measurements reached 10 m s^{-1} at 14:30 0 UTC.

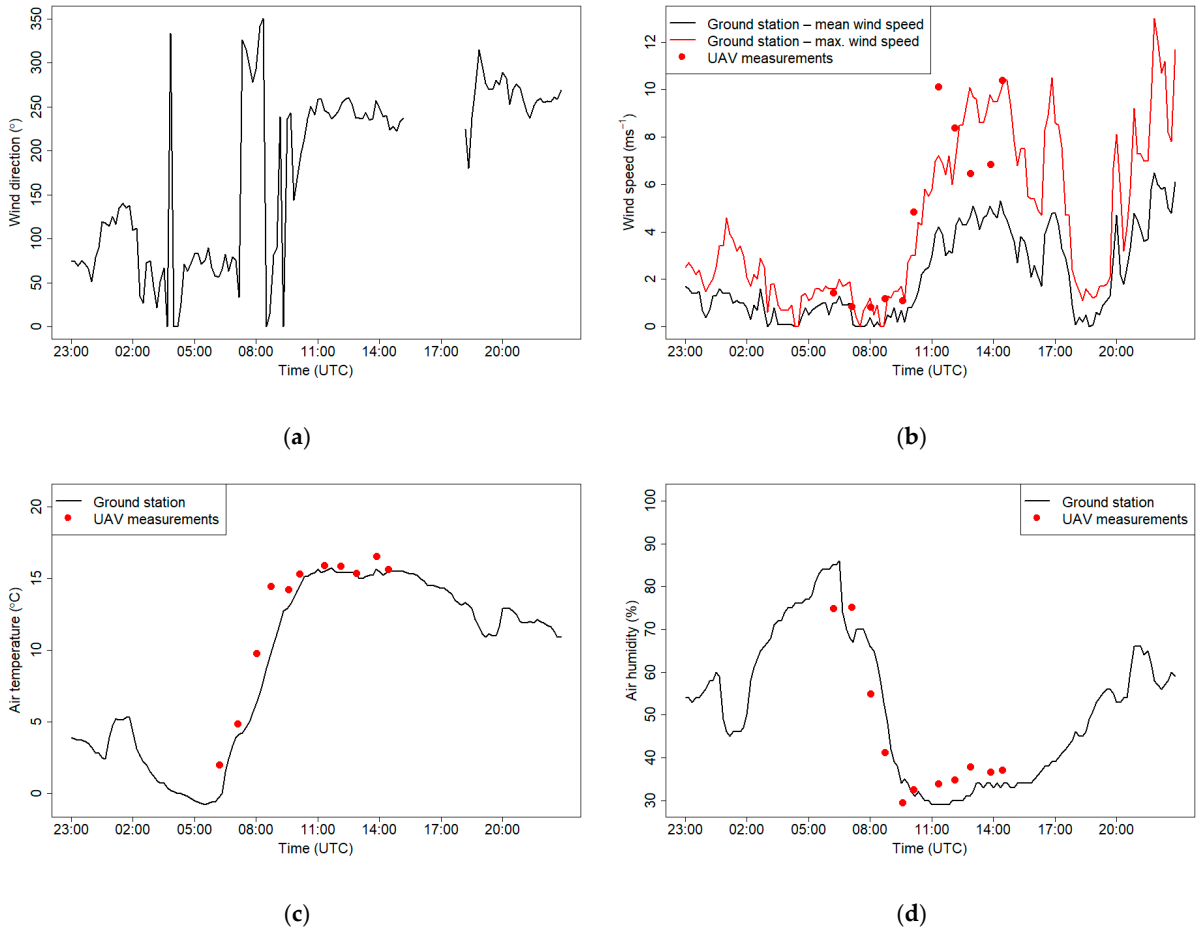
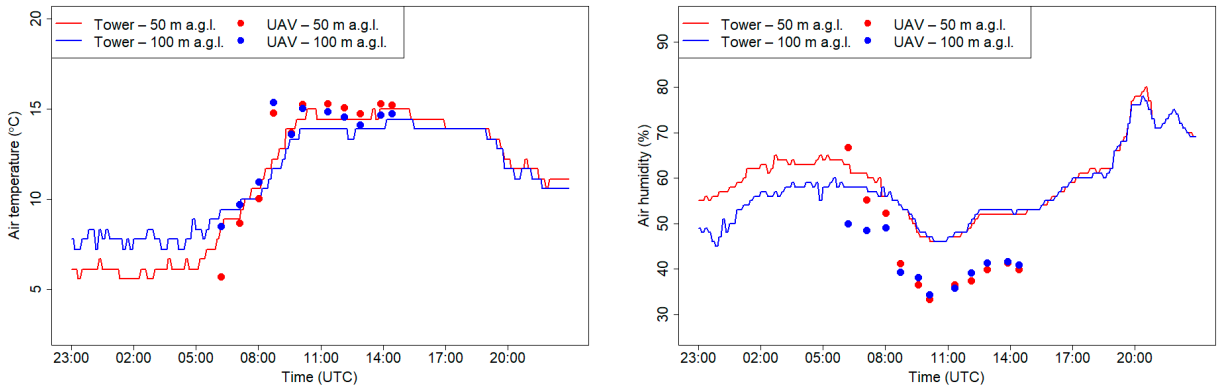


Figure 19. Wind direction (**a**), wind speed (**b**), air temperature (**c**) and relative humidity (**d**) measured at the JU Campus meteorological station on 7 March 2019. Red dots show measurements from the drone made at the start of each flight.

Increase of wind speed being the effect of foehn wind was associated with temperature increase and significant drop of relative humidity between 6 and 9 UTC at the ground station. Measurements of air humidity and temperature that were obtained using the drone were consistent with measurements from the meteorological station. Due to the fact that temporal resolution of the wind component data from the ground meteorological station is the mean values of the 10-min period, Figure 19b presents mean and maximum wind speed measurements. Wind speed data from the sensor located in the UAV have 1 s resolution, therefore during windy conditions, single measurement points can fluctuate significantly. Measurements from the drone conducted at 10 m a.g.l. at the first five flights during weak wind conditions were consistent with observations from the ground station. During the subsequent flights, temporal measurements of wind speed from the drone varied between mean and maximum wind speed observed at the JU ground station for most of the cases, except the sixth and seventh flights.

Figure 20 presents measurements of air humidity and temperature on 7 March 2019 at the RTCN tower and using a drone at two levels, 50 m a.g.l. and 100 m a.g.l. In the first part of the record, a clear vertical gradient of temperature and relative humidity was observed. The same effect was confirmed by the data from flights. In the later part, after increase of wind speed, a strong turbulence in the atmosphere caused the vertical gradients to disappear. Temperature data from the RTCN and drone were consistent while the relative humidity recorded by the drone during a higher wind speed period was lower by 10% compared to tower observations at both elevations (50 and 100 m a.g.l.).



(**a**) (**b**)

Figure 20. Air temperature (**a**) and relative humidity (**b**) at 50 and 100 m a.g.l. measured at the RTCN tower and by the UAV on 7 March 2019.

4. Discussion

The results obtained during the presented campaigns using an airborne multisensor measurement platform enabled detailed analysis of temporal variation of vertical PBL structure at a local scale during three different synoptic conditions. Results from morning campaigns (21 September 2018 and 7 March 2019) pointed out that in the layer with strong gradients of temperature and humidity near the top of the ground inversion layer, peaks of PM_{10} concentration were observed. During stable conditions, PM_{10} concentration in the ground layer up to 100 m a.g.l. (valley depth) did not vary significantly, while at the upper layers, strong fluctuations of PM_{10} concentration were observed. Possible explanation is weakening of mechanical turbulence in the valley due to topographic shading and occurrence of nocturnal low-level jet above the valley which can induce mechanical turbulence and modify pollutant dispersion.

Other research presenting the occurrence of a layer with increased concentration of air pollution at a certain height points out that these conditions were connected to vertical diffusion—increased concertation of pollutants at a layer a few dozens of meters above the ground [51]—and diffusion of plumes from elevated sources—upper layers at an altitude of a few hundred meters above the ground [52] or downward flows of regional pollutants from the upper layer [53].

Studies of vertical profiles of potential air temperature and relative humidity pointed out that an important factor that affects cold air pool break is advection of warmer air above the valley during morning hours. At the first campaign (18 September 2018), advection of warmer air strengthened the ground inversion layer during the night. Observed potential temperature gradient up 100 m a.g.l. at sixth flight (after sunset) was equal to 6.3 °C/100 m, while at first flight on 21 September 2018 (before sunrise) was equal to 5.4 °C/100 m.

The temperature data obtained during the first and second campaigns were used for comparison of atmospheric processes occurring during convective and stable nocturnal boundary layer formation. In particular, a potential temperature gradient and the altitude associated with its rapid change were analyzed for subsequent flights. While the first two profiles obtained during the campaign representing the formation of stable nocturnal boundary (15:09 UTC and 16:56 UTC) were almost constant (temperature gradient below 0.3 °C/100 m), next profiles showed temporal increase of nocturnal boundary layer (NBL) depth (defined as the altitude where potential temperature is stabilizing) starting from ca. 100 m a.g.l observed during flight no. 3 and reaching the end value of ca. 300 m a.g.l. for flight 6 (Figure 9b). In the first phase of NBL formation (flight 3), a very steep gradient was observed close to the ground level (ca. + 18 °C/100 m) which gradually disappeared during the next flights when the NBL depth was increasing. The gradient value in the upper part of NBL was almost constant for flights 4–6 (ca. +3.3 °C/100 m). During the

second campaign representing the formation of the convective boundary layer, potential temperature profiles looked different. In the initial state before sunrise (first flight at 4:14 UTC), a clear thermal inversion layer reaching the height of ca. 300 m a.g.l. was observed. The potential temperature gradient within the NBL layer was equal to ca. 5 °C/100 m. Starting from flight 3 (6:23 UTC), a formation of the convective layer was observed close to the ground. The surface temperature was increasing for subsequent flights and remained constant in the first part of the profile. The depth of the convective layer (defined as the maximum altitude where the temperature was close to the surface) was increasing with time starting from ca. 80 m a.g.l for flight 3 and ending up with ca. 200 m a.g.l. for flight 6. Above the observed convective layer, a residual layer was still present, and the potential temperature gradient within this layer remained constant.

The comparison of the results of the wind speed from the drone with observations from the JU Campus meteorological station showed good agreement for weak wind conditions (below 2 m s^{-1}), while during stronger wind speed occurrence, drone measurements were in between average and maximum wind speed recorded by the JU station, being in most cases closer to the maximum values at a certain moment. Such an effect can be explained by local reduction of wind speed at the JU station location due to the influence of the surrounding campus buildings while the flights were made in the open field area.

Analysis of the period with occurrence of foehn wind in the valley allowed us to identify two opposite effects associated with elevated wind speed. On the one hand, an improvement of the air quality induced by the intense dispersion of pollution stimulated by strong turbulences associated with high wind speed in the first phase of foehn wind (wind speed below 5 m s^{-1}) was observed (Figure 17a,b, flights 3–6), but on the other hand, deterioration of air quality by resuspension of deposited particles from the ground was observed in the second phase when wind speed exceeded the value of 5 m s^{-1} (Figure 17b,c, flights 7–11). A similar effect was reported by Kishcha et al. [54] for the Dead Sea Valley region.

An attempt was made to calculate the turbulent kinetic energy (TKE) parameter which can be very useful to identify thermal winds occurrence in the valley; however, drone position fluctuations during the flights in turbulent conditions masked recorded wind components fluctuations required for its calculation, and the obtained values of TKE were extremely noisy and did not show any pattern along the vertical profiles. Future studies are required to test if the analysis of drone fluctuations itself can be useful for determination of the TKE parameter.

5. Conclusions

The availability of high-quality atmospheric measurements by using a UAV provides unquestionable value to meteorological studies. However, attention should be paid to the time resolution of the equipment used to measure meteorological (air temperature, wind components, air pressure and air humidity) and air quality parameters (e.g., PM_{10} concertation, amount of particulate matter at selected size). The recommended time resolution of meteorological parameters should be 1s or less [30]. Recent studies indicated that the location of the measuring equipment on the drone is very significant; it can cause two significant problems: bias measurement related to exposure to external radiation sources (e.g., insufficient solar shielding) and heat (e.g., engines or electronics) [30,55]. Position of the sensors on the drone should provide proper ventilation undisturbed by drone propeller movement (quick sensor response to changing environmental conditions).

Several other studies that investigated the effects of a multicopter on air sampling pointed out similar conclusions. The results of computational fluid dynamics (CFD) simulation for the quadrotor with added sampler presented in the article by McKinney et al. 2019 [56] and field studies of the flow of a four-rotor drone using colored pyrotechnical smoke cartridges [57] confirm that the largest airflow disturbances exist at the propellers (especially below the propellers) and the smallest in the middle of the drone above the

propeller position. Hence the optimal position of the sensors is in the middle part of a UAV and elevated above the propeller height.

The smaller size of a UAV makes operation much simpler and easier but may reduce the resistance capability of strong winds and increase the instability of measurements significantly [32]. It was confirmed that fluctuations of drone position influence wind speed variability making reliable calculation of, e.g., the TKE parameter, impossible. Additionally, tests of low-cost air pollution sensors indicated influence of air humidity on the measurement of PM_{10} concentration (e.g., sensor Mie pDR-1500 [32]). It was demonstrated that equipping the sensor with a heated inlet solves this problem.

Atmospheric measurements by using a UAV can be applied in high-resolution research, verification of modeling results [58] and as an additional source for data assimilation in the lower troposphere [59]. Recent study indicates that UAVs that are able to accurately measure three-dimensional wind might be used as a cost-effective and flexible addition to measurement masts and LIDAR scans [60].

The atmospheric vertical profile results obtained during three campaigns using an airborne measurement system demonstrate the usefulness of this tool in investigating the dynamics of the lower part of the PBL. The results present three different pictures of the transition phase between the nocturnal boundary layer and the convective layer and influence of the foehn wind on the PBL structure in the city located inside the river valley. Campaign 1 showed the transition from convective to stable stratified atmosphere. Campaign 2 showed vertical atmosphere dynamics during the opposite process. The last campaign was dedicated to studying the influence of foehn wind formation on urban PBL structure.

Concentrations of the PM_{10} fraction in air pollution that are associated with temperature and relative humidity measurements along the vertical profile help to better understand meteorological processes influencing the formation of high PM_{10} concentration. Results of experiments during the night indicate that development of a stable nocturnal boundary layer affected higher PM_{10} concentrations at the lowest part of the boundary layer. After sunrise, the PM_{10} concentration above the ground decreases because of convection that dilutes pollutants in the larger air volume and transports them to the higher levels. The last case showed that, during strong wind periods, a long-distance pollutant transport can significantly influence the air quality.

Author Contributions: Conceptualization, M.Z., P.S., J.B., A.B., J.N. and M.K.; methodology, P.S., M.Z. and M.K.; software, P.S., M.Z. and J.B.; validation, P.S., M.Z. and M.K.; formal analysis, P.S. and M.Z.; investigation, P.S., M.Z. and A.B.; resources, P.S., M.Z., M.K., J.N. and A.B.; data curation, P.S. and M.Z.; writing—original draft preparation, P.S., M.Z. and A.B.; writing—review and editing, P.S., M.Z., A.B., J.N. and J.B.; visualization, P.S. and M.Z.; supervision, A.B., M.Z. and J.B.; project administration, P.S.; funding acquisition, M.Z. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was partly supported by the EU Project POWR.03.02.00-00-I004/16 (PS) and by the Ministry of Science and Higher Education, project no. 16.16.220.842 B02.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

Appendix A

Table A1. Time response of humidity and temperature sensors before and after correction procedure.

Humidity Sensor—BOSH						
Order number	Humidity amplitude (%)	Time before correction	The rate of change before correction (%/s.)	Humidity amplitude (%)	Time after correction	The rate of change after correction (%/s.)
Cooling						
1	22	440	0.050	28	150	0.187
2	15	250	0.060	20	100	0.200
Mean value	**19**	**345**	**0.055**	**24**	**125**	**0.193**
Heating						
1	17	500	0.034	25	150	0.167
2	17	430	0.040	23	140	0.164
Mean value	**17**	**465**	**0.037**	**24**	**145**	**0.165**
Temperature sensor—thermocouple						
Order number	Temperature amplitude before correction (°C)	Time (s)	The rate of change (°C/s.)	Temperature amplitude after correction (°C)	Time after correction	The rate of change after correction (°C/s.)
Cooling						
1	6.3	102	0.062	5.8	90	0.064
2	5.5	100	0.055	5.5	80	0.069
Mean value	**5.9**	**101**	**0.058**	**5.7**	**85**	**0.067**
Heating						
1	7	120	0.058	6.6	110	0.060
2	6.1	160	0.038	5.9	110	0.054
Mean value	**6.55**	**140**	**0.048**	**6.3**	**110**	**0.057**
Temperature sensor—BOSH						
Cooling						
1	7.1	409	0.017	7.6	280	0.027
2	5.5	320	0.017	6.2	140	0.044
Mean value	**6.3**	**364.5**	**0.017**	**6.9**	**210**	**0.036**
Heating						
1	5.9	440	0.013	6.2	390	0.016
2	5.7	450	0.013	5.9	400	0.015
Mean value	**5.8**	**445**	**0.013**	**6.1**	**395**	**0.015**

Table A2. Stability of atmosphere on 18 September 2018.

Potential temperature					
Flight order number	Min. temp. (°C) (height a.g.l.)	Max. temp. (°C) (height a.g.l.)	Depth of lowest layer (m)	Potential temperature gradient in lowest layer (°C/100 m)	Stability of atmosphere
1	25 (499)	28 (7)	>500	−0.4	Neutral
2	24 (16)	26 (300)	>300	0.8	Neutral
3	20 (9)	26 (200)	130	4.6	Inversion
4	17 (10)	26 (392)	150	7.2	Inversion
5	15 (10)	26 (386)	200	4.6	Inversion
6	15 (21)	25 (404)	250	3.4	Inversion

Table A2. *Cont.*

Air humidity					
Flight order number	Min. humidity (%) (height a.g.l.)	Max. humidity (%) (height a.g.l.)	Depth of lowest layer (m)	Relative humidity gradient in lowest layer (%/100 m)	Stability of atmosphere
1	50 (499)	41 (7)	>500	1	Neutral
2	60 (16)	50 (300)	>300	−4	Neutral
3	87 (9)	54 (199)	120	−30	Inversion
4	100 (10)	53 (391)	200	−26	Inversion
5	96 (10)	49 (386)	200	−22	Inversion
6	96 (21)	51 (404)	250	−18	Inversion

Table A3. Stability of atmosphere on 21 September 2018.

Potential Temperature					
Flight order number	Min. temp. (°C) (height a.g.l.)	Max. temp. (°C) (height a.g.l.)	Depth of lowest layer (m)	Potential temperature gradient in lowest layer (°C/100 m)	Stability of atmosphere
1	6 (0)	23 (293)	230	7.4	Inversion
2	9 (4)	21 (187)	187	6.3	Inversion
3	15 (5)	25 (290)	90	1.9	Inversion
4	20 (4)	25 (297)	100	0.2	Neutral
5	24 (5)	26 (294)	220	0.7	Neutral
6	26 (3)	27 (298)	>300	0.4	Neutral
Air humidity					
Flight order number	Min. humidity (%) (height a.g.l.)	Max. humidity (%) (m a.g.l.)	Depth of lowest layer (m)	Relative humidity gradient in lowest layer (%/100 m)	Stability of atmosphere
1	58 (293)	98 (0)	200	−16.3	Inversion
2	62 (187)	86 (4)	187	−8.9	Inversion
3	48 (290)	65 (5)	290	−3.9	Inversion
4	52 (297)	55 (4)	90	10	Neutral
5	47 (5)	49 (294)	210	3.6	Neutral
6	38 (3)	46 (298)	>300	2.9	Neutral

Table A4. Stability of atmosphere on 7 March 2019.

Potential Temperature					
Flight order number	Min. temp. (°C) (height a.g.l.)	Max. temp. (°C) (height a.g.l.)	Depth of lowest layer (m)	Potential temperature gradient in lowest layer (°C/100 m)	Stability of atmosphere
1	6 (24)	14 (389)	150	5.0	Inversion
2	7 (2)	14 (391)	70	7.4	Inversion
3	11 (12)	15 (386)	100	2.9	Inversion
4	15 (285)	18 (105)	100	1.7	Inversion
5	16 (392)	17 (17)	>400	−0.3	Neutral
6	17 (355)	18 (20)	>400	−0.3	Neutral
7	17 (136)	18 (89)	>400	0.0	Neutral
8	17 (331)	17 (13)	>400	−0.1	Neutral
9	17 (307)	17 (12)	>400	−0.1	Neutral
10	17 (456)	18 (2)	>500	−0.2	Neutral
11	17 (268)	18 (488)	>500	0	Neutral

Table A4. *Cont.*

Air humidity					
Flight order number	Min. humidity (%) (height a.g.l.)	Max. humidity (%) (m a.g.l.)	Depth of lowest layer (m)	Relative humidity gradient in lowest layer (%/100 m)	Stability of atmosphere
1	47 (155)	75 (11)	100	−28.8	Inversion
2	47 (82)	73 (2)	80	−32.6	Inversion
3	48 (199)	61 (12)	60	−14.1	Inversion
4	39 (133)	46 (381)	100	−5.0	Inversion
5	34 (2)	47 (372)	>400	3.0	Neutral
6	32 (34)	43 (386)	>400	1.8	Neutral
7	35 (2)	42 (381)	>400	1.6	Neutral
8	37 (9)	43 (347)	>400	1.3	Neutral
9	38 (10)	46 (390)	>400	2.0	Neutral
10	40 (2)	53 (464)	>500	2.3	Neutral
11	39 (12)	48 (448)	>500	1.4	Neutral

References

1. *Air Quality in Europe-2019*; European Environment Agency: København, Denmark, 2019.
2. Biswas, P.; Wu, C.Y. 2005 Critical Review: Nanoparticles and the environment. *J. Air Waste Manag. Assoc.* **2005**, *55*, 708–746. [CrossRef]
3. Karlsson, H.L.; Gustafsson, J.; Cronholm, P.; Moller, L. Size-dependent toxicity of metal oxide particles-A comparison between nano- and micrometer size. *Toxicol. Lett.* **2009**, *188*, 112–118. [CrossRef] [PubMed]
4. Guo, S.; Hu, M.; Zamora, M.L.; Peng, J.F.; Shang, D.J.; Zheng, J.; Du, Z.F.; Wu, Z.; Shao, M.; Zeng, L.M.; et al. Elucidating severe urban haze formation in China. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2014**, *111*, 17373–17378. [CrossRef] [PubMed]
5. Renard, J.B.; Michoud, V.; Giacomoni, J. Vertical Profiles of Pollution Particle Concentrations in the Boundary Layer above Paris (France) from the Optical Aerosol Counter LOAC Onboard a Touristic Balloon. *Sensors* **2020**, *20*, 1111. [CrossRef]
6. Wang, D.X.; Stachlewska, I.S.; Song, X.Q.; Heese, B.; Nemuc, A. Variability of the Boundary Layer over an Urban Continental Site Based on 10 Years of Active Remote Sensing Observations in Warsaw. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 33. [CrossRef]
7. Baron, A.; Chazette, P.; Totems, J. Remote sensing of two exceptional winter aerosol pollution events and representativeness of ground-based measurements. *Atmos. Chem. Phys.* **2020**, *20*, 6749–6768. [CrossRef]
8. Wood, C.R.; Jarvi, L.; Kouznetsov, R.D.; Nordbo, A.; Joffre, S.; Drebs, A.; Vihma, T.; Hirsikko, A.; Suomi, I.; Fortelius, C.; et al. An Overview of the Urban Boundary Layer Atmosphere Network in Helsinki. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2013**, *94*, 1675–1690. [CrossRef]
9. Mahrt, L. Stably Stratified Atmospheric Boundary Layers. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **2014**, *46*, 23–45. [CrossRef]
10. Pardyjak, E.R.; Fernando, H.J.S.; Hunt, J.C.R.; Grachev, A.A.; Anderson, J. A case study of the development of nocturnal slope flows in a wide open valley and associated air quality implications. *Meteorol. Z.* **2009**, *18*, 85–100. [CrossRef]
11. Li, X.; Xia, X.; Wang, L.; Cai, R.; Zhao, L.; Feng, Z.; Ren, Q.; Zhao, K. The role of foehn in the formation of heavy air pollution events in Urumqi, China. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2015**, *120*, 5371–5384. [CrossRef]
12. Wang, K.; Chen, F.E.; Au, W.; Zhao, Z.H.; Xia, Z.L. Evaluating the feasibility of a personal particle exposure monitor in outdoor and indoor microenvironments in Shanghai, China. *Int. J. Environ. Health Res.* **2019**, *29*, 209–220. [CrossRef] [PubMed]
13. Mukherjee, A.; Stanton, L.G.; Graham, A.R.; Roberts, P.T. Assessing the Utility of Low-Cost Particulate Matter Sensors over a 12-Week Period in the Cuyama Valley of California. *Sensors* **2017**, *17*, 16. [CrossRef] [PubMed]
14. Kelly, K.E.; Whitaker, J.; Petty, A.; Widmer, C.; Dybwad, A.; Sleeth, D.; Martin, R.; Butterfield, A. Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environ. Pollut.* **2017**, *221*, 491–500. [CrossRef]
15. Zheng, T.S.; Bergin, M.H.; Johnson, K.K.; Tripathi, S.N.; Shirodkar, S.; Landis, M.S.; Sutaria, R.; Carlson, D.E. Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high-and low-concentration environments. *Atmos. Meas. Tech.* **2018**, *11*, 4823–4846. [CrossRef]
16. Badura, M.; Batog, P.; Drzeniecka-Osiadacz, A.; Modzel, P. Optical particulate matter sensors in PM2.5 measurements in atmospheric air. In Proceedings of the 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering (EKO-DOK), Polanica Zdroj, Poland, 16–18 April 2018.
17. Schnitzhofer, R.; Norman, M.; Wisthaler, A.; Vergeiner, J.; Harnisch, F.; Gohm, A.; Obleitner, F.; Fix, A.; Neininger, B.; Hansel, A. A multimethodological approach to study the spatial distribution of air pollution in an Alpine valley during wintertime. *Atmos. Chem. Phys.* **2009**, *9*, 3385–3396. [CrossRef]
18. Chemel, C.; Burns, P. Pollutant Dispersion in a Developing Valley Cold-Air Pool. *Bound. Layer Meteorol.* **2015**, *154*, 391–408. [CrossRef]

19. Mamali, D.; Marinou, E.; Sciare, J.; Pikridas, M.; Kokkalis, P.; Kottas, M.; Binietoglou, I.; Tsekeri, A.; Keleshis, C.; Engelmann R.; et al. Vertical profiles of aerosol mass concentration derived by unmanned airborne in situ and remote sensing instruments during dust events. *Atmos. Meas. Tech.* **2018**, *11*, 2897–2910. [CrossRef]
20. Chilinski, M.T.; Markowicz, K.M.; Kubicki, M. UAS as a Support for Atmospheric Aerosols Research: Case Study. *Pure Appl. Geophys.* **2018**, *175*, 3325–3342. [CrossRef]
21. Kunz, M.; Lavric, J.V.; Gerbig, C.; Tans, P.; Neff, D.; Hummelgard, C.; Martin, H.; Rodjegard, H.; Wrenger, B.; Heimann, M. COCAP: A carbon dioxide analyser for small unmanned aircraft systems. *Atmos. Meas. Tech.* **2018**, *11*, 1833–1849. [CrossRef]
22. Guimaraes, P.; Ye, J.; Batista, C.; Barbosa, R.; Ribeiro, I.; Medeiros, A.; Souza, R.; Martin, S.T. Vertical Profiles of Ozone Concentration Collected by an Unmanned Aerial Vehicle and the Mixing of the Nighttime Boundary Layer over an Amazonian Urban Area. *Atmosphere* **2019**, *10*, 599. [CrossRef]
23. Brady, J.M.; Stokes, M.D.; Bonnardel, J.; Bertram, T.H. Characterization of a Quadrotor Unmanned Aircraft System for Aerosol-Particle-Concentration Measurements. *Environ. Sci. Technol.* **2016**, *50*, 1376–1383. [CrossRef] [PubMed]
24. Villa, T.F.; Jayaratne, E.R.; Gonzalez, L.F.; Morawska, L. Determination of the vertical profile of particle number concentration adjacent to a motorway using an unmanned aerial vehicle. *Environ. Pollut.* **2017**, *230*, 134–142. [CrossRef]
25. Masic, A.; Pikula, B.; Bibic, D. Mobile Measurements of Particulate Matter Concentrations in Urban Area. In Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, Zadar, Croatia, 8–11 November 2017; pp. 0452–0456. [CrossRef]
26. Weber, K.; Heweling, G.; Fischer, C.; Lange, M. The use of an octocopter UAV for the determination of air pollutants—a case study of the traffic induced pollution plume around a river bridge in Duesseldorf, Germany. *Int. J. Educ. Learn. Syst.* **2017**, *2*, 63–66.
27. Babaan, J.B.; Ballori, J.P.; Tamondong, A.M.; Ramos, R.V.; Ostrea, P.M. Estimation of PM 2.5 vertical distribution using customized UAV and mobile sensors in brgy. up campus, diliman, quezon city. In Proceedings of the International Conference Geomatic & Geospatial Technology (Ggt 2018): Geospatial and Disaster Risk Management, Kuala Lumpur, Malaysia, 3–5 September 2018; Volume 42–44, pp. 89–103. [CrossRef]
28. Morawska-Horaska, M. Struktura termiczna dolnej części troposfery i jej wpływ na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie. *Człowiek Sr.* **1978**, *2*, 61–85.
29. Godłowska, J. Wpływ warunków meteorologicznych na jakość powietrza w krakowie. In *Badania Porównawcze i Próba Podejścia Modelowego*; Institute of Meteorology and Water Management: Warsaw, Poland, 2019.
30. Jacob, J.D.; Chilson, P.B.; Houston, A.L.; Smith, S.W. Considerations for Atmospheric Measurements with Small Unmanned Aircraft Systems. *Atmosphere* **2018**, *9*, 16. [CrossRef]
31. Nolan, P.J.; Pinto, J.; Gonzalez-Rocha, J.; Jensen, A.; Vezzi, C.N.; Bailey, S.C.C.; de Boer, G.; Diehl, C.; Laurence, R.; Powers, C. W.; et al. Coordinated Unmanned Aircraft System (UAS) and Ground-Based Weather Measurements to Predict Lagrangian Coherent Structures (LCSs). *Sensors* **2018**, *18*, 4448. [CrossRef]
32. Liu, C.; Huang, J.P.; Wang, Y.W.; Tao, X.Y.; Hu, C.; Deng, L.C.; Xu, J.P.; Xiao, H.W.; Luo, L.; Xiao, H.Y.; et al. Vertical distribution of PM2.5 and interactions with the atmospheric boundary layer during the development stage of a heavy haze pollution event. *Sci. Total Environ.* **2020**, *704*, 12. [CrossRef] [PubMed]
33. Local Regression. Available online: https://en.wikipedia.org/wiki/Local_regression (accessed on 15 November 2020).
34. John, F.; Sanford, W. Nonparametric Regression in R. In *An Appendix to: An R Companion to Applied Regression*, 3rd ed.; Sage Publications: Thousand Oaks, CA, USA, 2018.
35. Joachim, R.; Pascal, B.; Muller, J.M.; Stephanie, M. The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research. *Meteorol. Z.* **2009**, *18*, 141–147. [CrossRef]
36. Kunz, M.; Lavric, J.V.; Gasche, R.; Gerbig, C.; Grant, R.H.; Koch, F.T.; Schumacher, M.; Wolf, B.; Zeeman, M. Surface flux estimates derived from UAS-based mole fraction measurements by means of a nocturnal boundary layer budget approach. *Atmos. Meas. Tech.* **2020**, *13*, 1671–1692. [CrossRef]
37. Miloshevich, L.M.; Paukkunen, A.; Vömel, H.; Oltmans, S.J. Development and Validation of a Time-Lag Correction for Vaisala Radiosonde Humidity Measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.* **2004**, *21*, 1305–1327. [CrossRef]
38. Achberger, C.; Barring, L. Correction of surface air temperature measurements from a mobile platform. *Agric. For. Meteorol.* **1999**, *98–99*, 227–238. [CrossRef]
39. Jonassen, M. *The Small Unmanned Meteorological Observer (SUMO): Characterization and Test of a New Measurement System for Atmospheric Boundary Layer Research*; University of Bergen: Bergen, Norway, 2008.
40. Savitzky, A.; Golay, M.J. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* **1964**, *36*, 1627–1639. [CrossRef]
41. Bromba, M.U.; Ziegler, H. Application hints for Savitzky-Golay digital smoothing filters. *Anal. Chem.* **1981**, *53*, 1583–1586. [CrossRef]
42. Bokwa, A. Miejska wyspa ciepła na tle naturalnego zróżnicowania termicznego obszaru położonego we wklęsłej formie terenu (na przykładzie Krakowa). *Prace Geogr.* **2009**, *122*, 111–132.
43. Trzepacz, P.; Wiecław-Michniewska, J.; Brzosko-Sermak, A.; Kołosin, A. *Miasto w Badaniach Geografów*; Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego: Kraków, Poland, 2015; pp. 221–240.
44. Bokwa, A. *Wieloletnie Zmiany Struktury Mezoklimatu Miasta na Przykładzie Krakowa*; Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego: Kraków, Poland, 2010.

45. Arya, S.P. (Ed.) *Introduction to Micrometeorology*; International Geophysics; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2001; Volume 79, pp. 62–88.
46. Banta, R.M.; Mahrt, L.; Vickers, D.; Sun, J.; Balsley, B.B.; Pichugina, Y.L.; Williams, E.L. The very stable boundary layer on nights with weak low-level jets. *J. Atmos. Sci.* **2007**, *64*, 3068–3090. [CrossRef]
47. Oke, T.R. *Boundary Layer Climates*, 2nd ed.; Routledge: London, UK, 1987; p. 464.
48. Platis, A.; Altstadter, B.; Wehner, B.; Wildmann, N.; Lampert, A.; Hermann, M.; Birmili, W.; Bange, J. An Observational Case Study on the Influence of Atmospheric Boundary-Layer Dynamics on New Particle Formation. *Bound. Layer Meteorol.* **2016**, *158*, 67–92. [CrossRef]
49. Cetti, C.; Buzzi, B.; Sprenger, M. *Climatology of Alpine North Foehn*; MeteoSwiss: Zurich, Switzerland, 2015; p. 77.
50. Drobinski, P.; Steinacker, R.; Richner, H.; Baumann-Stanzer, K.; Beffrey, G.; Benech, B.; Berger, H.; Chimani, B.; Dabas, A.; Dorninger, M.; et al. Fohn in the Rhine Valley during MAP: A review of its multiscale dynamics in complex valley geometry. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2007**, *133*, 897–916. [CrossRef]
51. Strbova, K.; Raclavska, H.; Bilek, J. Impact of fugitive sources and meteorological parameters on vertical distribution of particulate matter over the industrial agglomeration. *J. Environ. Manag.* **2017**, *203*, 1190–1198. [CrossRef]
52. Xu, Y.W.; Zhu, B.; Shi, S.S.; Huang, Y. Two Inversion Layers and Their Impacts on PM2.5 Concentration over the Yangtze River Delta, China. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **2019**, *58*, 2349–2362. [CrossRef]
53. Han, S.Q.; Hao, T.Y.; Zhang, Y.F.; Liu, J.L.; Li, P.Y.; Cai, Z.Y.; Zhang, M.; Wang, Q.L.; Zhang, H. Vertical observation and analysis on rapid formation and evolutionary mechanisms of a prolonged haze episode over central-eastern China. *Sci. Total Environ.* **2018**, *616*, 135–146. [CrossRef]
54. Kishcha, P.; Starobinets, B.; Alpert, P. Modeling of Foehn-Induced Extreme Local Dust Pollution in the Dead Sea Valley. In Proceedings of the 35th International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application (ITM), Chania, Greece, 3–7 October 2016; pp. 433–437.
55. Greene, B.R.; Segales, A.R.; Bell, T.M.; Pillar-Little, E.A.; Chilson, P.B. Environmental and Sensor Integration Influences on Temperature Measurements by Rotary-Wing Unmanned Aircraft Systems. *Sensors* **2019**, *19*, 1470. [CrossRef] [PubMed]
56. McKinney, K.A.; Wang, D.; Ye, J.H.; de Fouchier, J.B.; Guimaraes, P.C.; Batista, C.E.; Souza, R.A.F.; Alves, E.G.; Gu, D.; Guenther, A.B.; et al. A sampler for atmospheric volatile organic compounds by copter unmanned aerial vehicles. *Atmos. Meas. Tech.* **2019**, *12*, 3123–3135. [CrossRef]
57. Crazzolara, C.; Ebner, M.; Platis, A.; Miranda, T.; Bange, J.; Junginger, A. A new multicopter-based unmanned aerial system for pollen and spores collection in the atmospheric boundary layer. *Atmos. Meas. Tech.* **2019**, *12*, 1581–1598. [CrossRef]
58. Lee, S.H.; Kwak, K.H. Assessing 3-D Spatial Extent of Near-Road Air Pollution around a Signalized Intersection Using Drone Monitoring and WRF-CFD Modeling. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 6915. [CrossRef] [PubMed]
59. Leuenberger, D.; Haefele, A.; Omanovic, N.; Fengler, M.; Martucci, G.; Calpini, B.; Fuhrer, O.; Rossa, A. Improving High-Impact Numerical Weather Prediction with Lidar and Drone Observations. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2020**, *101*, E1036–E1051. [CrossRef]
60. Thielicke, W.; Hübert, W.; Müller, U.; Eggert, M.; Wilhelm, P. Towards accurate and practical drone-based wind measurements with an ultrasonic anemometer. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **2020**, *2020*, 1–29. [CrossRef]

Atmos. Chem. Phys., 21, 12113–12139, 2021
https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021
© Author(s) 2021. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Atmospheric Chemistry and Physics
Open Access
EGU

Measurement report: Effect of wind shear on PM_{10} concentration vertical structure in the urban boundary layer in a complex terrain

Piotr Sekuła[1,2], Anita Bokwa[3], Jakub Bartyzel[1], Bogdan Bochenek[2], Łukasz Chmura[1,2], Michał Gałkowski[1,4], and Mirosław Zimnoch[1]

[1]Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH-University of Science and Technology, 19 Reymonta St., 30-059 Kraków, Poland
[2]Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute, Branch of Kraków, 14 Piotra Borowego St., 30-215 Kraków, Poland
[3]Institute of Geography and Spatial Management, Jagiellonian University, 7 Gronostajowa St., 30-387 Kraków, Poland
[4]Max Planck Institute for Biogeochemistry, Department of Biogeochemical Signals, Hans-Knoll-Str. 10, 07745 Jena, Germany

Correspondence: Anita Bokwa (anita.bokwa@uj.edu.pl)

Received: 31 January 2021 – Discussion started: 15 March 2021
Revised: 25 May 2021 – Accepted: 29 June 2021 – Published: 13 August 2021

Abstract. The paper shows wind shear impact on PM_{10} vertical profiles in Kraków, southern Poland. The data used consist of background data for two cold seasons (September 2018 to April 2019 and September 2019 to April 2020) and data for several case studies from November 2019 to March 2020. The data are composed of PM_{10} measurements, model data, and wind speed and direction data. The background model data come from operational forecast results of the AROME model. PM_{10} concentration in the vertical profile was measured with a sightseeing balloon. Significant spatial variability of the wind field was found. The case studies represent the conditions with much lower wind speed and a much higher PM_{10} level than the seasonal average. The inversions were much more frequent than on average too. Wind shear turned out to be the important factor in terms of PM_{10} vertical profile modification. It is generated due to the relief impact, i.e. the presence of a large valley, blocked on one side with the hills. The analysis of PM_{10} profiles from all flights allows us to distinguish three vertical zones of potential air pollution hazards within the valley (about 100 m deep) and the city of Kraków: (1) up to about 60 m a.g.l. – the zone where during periods of low wind speed, air pollution is potentially the highest and the duration of such high levels is the longest, i.e. the zone with the worst aerosanitary conditions; (2) about 60–100 m a.g.l. – transitional zone where the large decrease in PM_{10} levels with height is observed; (3) above 100–120 m a.g.l. – the zone where air quality is significantly better than in zone 1, either due to the increase in the wind speed or due to the wind direction change and advection of different, clean air masses.

1 Introduction

Particulate matter (PM) concentration remains one of the most relevant air-quality concerns in urban environments (Thürkow et al., 2021). Exposure to ambient PM concentration with diameter below 10 µm (PM_{10}) can cause lung irritation, cellular damage, coughing asthma, and cardiovascular diseases (Jeong, 2013). Particles with diameter below 1 µm (i.e. fine and ultrafine particles which constitute in most cases the majority of PM_{10} fraction) have the strongest impact on health because they can reach the deepest portions of the airways or even the bloodstream (Franchini and Mannucci, 2007, 2011). Presence of the particulate matter in the ambient air is the result of multiple physio-chemical processes, including local emission, chemical transformation, long-range transport, vertical mixing and deposition, most of which are dependent on meteorological conditions across a large range of spatial and temporal scales (Zhang et al., 2015; Zhou et al., 2020; Thürkow et al., 2021).

Local meteorological conditions determine primarily the dispersion of air pollutants and their removal (Trompetter et al., 2013), but they also affect chemical and physical processes linked to the origin of the primary and secondary aerosols (Zhou et al., 2020). One of the most studied meteorological phenomena is the occurrence of above-ground air temperature gradient inversion, which has a direct impact on the vertical distribution of the concentration of PM_{10} and its individual components, e.g. black carbon (Zhou et al., 2020) or organic PM_{10} tracers like levoglucosan (Marynowski et al., 2020). Numerous studies indicate that an important factor that affects the pollution profile is the wind profile (Li and Han, 2016; Zhou et al., 2020), occurrence of low-level jets (Li et al., 2012, 2019) or downward flows of pollutants (Han et al., 2018) which may strongly modify the diurnal cycle of a pollutant concentration in the lowest part of the troposphere.

The vertical structure of the pollutant concentration strongly depends on many factors, including season, meteorological conditions (Wang et al., 2018), topography (Trompetter et al., 2013; Strbova et al., 2017), and seasonal variability of local emissions and long-range transport (Li and Han, 2016). Due to this fact it is necessary to continuously study the spatial and vertical distributions of air pollution concentration in urbanized areas to better determine its sources and processes leading to abundant air pollution.

Research on the vertical structure of air pollution has been carried out in the past using several methods: stationary point measurements in the profile using the available infrastructure (e.g. Marynowski et al., 2020), balloon flights (e.g. Han et al., 2018; Renard et al., 2020), airplane or unmanned aerial vehicle (UAV) (Liu et al., 2020), lidar (Li and Han, 2016; Wang et al., 2020) or the use of satellite data (Ferrero et al., 2019). The highest vertical resolution can be achieved with the use of an aircraft (plane, balloon, UAV); however, these methods have certain limitations, e.g. lifting capacity, limited flight time and limited maximum reachable altitude, and they cannot operate during unfavourable weather conditions.

Throughout the previously published studies focused on the topic of lower-tropospheric air pollution, several types of the pollution concentration vertical profiles can be distinguished:

- two layers with significantly different concentration, i.e. high concentration in the stratum from the ground level to a certain height, then a transition layer with a rapid decrease in pollutant concentration with height and a stratum with a low concentration in the profile above; usually linked to thermal inversion occurrence (Strbova et al., 2017; Wang et al., 2018; Samad et al., 2020);

- a large, constant decrease in a pollutant concentration with height, resulting e.g. from a strong surface emission of a pollutant during stable conditions, from katabatic flows bringing the pollutants (Strbova et al., 2017), and from removal of the pollutants from the upper layers;

- the occurrence of a layer with increased concentration of air pollution at a certain height, connected to vertical diffusion (Strbova et al., 2017) or diffusion of plumes from elevated sources (Xu et al., 2019);

- a slight decrease in air pollution with height connected to the occurrence of strong vertical movements (Strbova et al., 2017) or removal of local air pollution due to synoptic processes linked to the advection of air masses.

It is noteworthy that many recent studies of air pollution concentration's vertical structure in cities were realized mainly for areas with little variation in the topography (e.g. Paris, Renard et al., 2020, Tianjin, Han et al., 2018), including coastal areas (Guangzhou, Zhou et al., 2020, Shanghai, Zhang et al., 2017). In fact, the understanding and the quantification of pollutant dispersion over complex terrain are much more difficult than over flat areas, as dispersion processes are affected by atmospheric interactions with the orography at different spatial scales (Giovannini et al., 2020). Studies presenting vertical profiles of pollutants' concentration in urbanized valleys are still necessary to better understand the impact of meteorology and topography on air pollutant dispersion (Strbova et al., 2017; Zhao et al., 2019; Samad et al., 2020).

A key parameter affecting pollutant concentration during the daytime is the height of the atmospheric boundary layer (ABL), which determines the volume of atmosphere available for pollutant dispersion. Turbulent mixing is a key factor which controls the evolution of the ABL depth (Giovannini et al., 2020). One of the important factors is the wind shear as it may essentially modify the structure of mean flow and turbulence in the convective boundary layer (CBL), e.g. by stretching and decoupling of the turbulent structures' production or separation of a single-layer CBL into a two-layer structure (Fedorovich and Conzemius, 2008; Rodier et al., 2017). Studies presenting the impact of ABL dynamics on vertical pollutant structure indicate that a low-level jet combined with a strong wind shear affects the transportation of the pollution e.g. by removing it (Trompetter et al., 2013) or bringing it in (pushing into the residual layer) and by favouring the growth of ABL height and weakening the stability of the atmosphere (Li et al., 2019).

The present study is focused on the impact of wind shear on the vertical profile of PM_{10} concentration in Kraków, southern Poland, a city located in a large valley. The properties of the ABL, including the vertical profile of wind speed and direction, are strongly modified by both the relief and the synoptic situation, and so are the air pollution's dispersion conditions, which in turn affects the pollutants concentration's profile. Those circumstances are of the highest importance in a city located in a valley as the built-up areas are located both in the valley bottom as well as on its

slopes, i.e. in a vertical profile of the land form. Kraków is a good study area for such considerations as it is located in diversified environmental conditions (described in detail in Sect. 2), and despite various legal actions aimed at reducing local PM_{10} emissions, daily limit values for PM_{10} are still exceeded during cold seasons. Moreover, Kraków is representative of many cities located in central Europe where aerosanitary conditions are relatively worse in comparison to the cities in the western part of the continent, as presented e.g. in the reports of the European Environment Agency (EEA, 2020). Poor air quality is, on the one hand, the result of PM_{10} emissions, which in the case of Poland are among the highest in Europe (Statista, 2021), with however a decreasing trend in recent years (Voivodeship Inspectorate of Environmental Protection, 2017). However, high PM_{10} concentrations are also linked to long-range transport of air pollution from other countries (Godłowska et al., 2015). In the Lesser Poland region (Małopolska) where Kraków is located, the main source of PM_{10} is the emission from the municipal and housing sector (78.9 % of the annual emission), from transportation (5 %), and from industry (7.8 %). In Kraków, the emissions related to vehicle traffic account for as much as 12 % of annual emission (Chief Inspectorate of Environmental Protection, 2020). Understanding the meteorological processes leading to the enhanced concentration levels is one of the key factors to enable the development strategies for inhabited areas to further reduce the number of smog episodes. To date no studies presenting temporal variability of PM_{10} concentration in the vertical profile in the cold season have been reported in that region.

2 Study area

Kraków is a large valley city located in the Wisła River valley, which is parallel to the border of the Carpathian Mountains to the south and the border of the Polish Uplands to the north (Fig. 1). About 100 km south of Kraków, there is the highest ridge of the Carpathians, the Tatra Mountains. Kraków is the second largest city of Poland, located in the Lesser Poland region (Małopolska), with an area of 326.8 km^2 and the official number of inhabitants reaching 771 000 (as of December 2018, Statistical Office in Kraków, 2019). The Kraków agglomeration consists of the city itself and highly populated towns and villages which surround it, with the total number of inhabitants estimated to exceed 1 million. The city's area belongs to three different geographical regions and geological structures, i.e. the Polish Uplands, the Western Carpathians, and the basins of the Carpathian Foredeep in between (Bokwa, 2009). The central part of the city is located in the Wisła River valley, at an altitude of about 200 m a.s.l. In the western part of Kraków, the valley is as narrow as 1 km. However, in the eastern part of the city, the valley widens to about 10 km, and there is a system of river terraces. East of the city's borders, the Raba River enters the Wisła River with a valley cutting the Carpathian Foothills from the south to the north. The hilltops bordering the city to the north and the south reach about 100 m above the river valley floor, similar to the hilltops in the western part of the valley, which means that the city is located in a semi-concave land form (open only to the east) and sheltered from the prevailing western winds (Fig. 1). The local-scale processes linked to the impact of relief include, for example, katabatic flows, cold-air pool (CAP) formation, frequent air temperature inversions, and much lower wind speed in the valley floor than at the hilltops (e.g. Hess, 1974). According to the studies on thermal stratification obtained for Kraków by using sodar measurements with hourly resolution, in the months from October to March, the mean monthly frequency of stable atmosphere conditions varies from 58.1 % in March to 74.0 % in December (Godłowska, 2019). All factors mentioned above contribute to the poor natural ventilation of the city and the occurrence of high PM_{10} levels, especially in the heating season.

3 Data and methods

3.1 Surface measurements

The data used consist of background data for two cold seasons (September 2018 to April 2019 and September 2019 to April 2020) and data for several case studies from November 2019 to March 2020. The background data are composed of PM_{10} measurements from seven stations, model data, and wind speed and direction data from four meteorological stations. The data for case studies come from seven stations with PM_{10} measurements, model analyses, and eight meteorological stations (wind speed and direction, air temperature, air humidity and cloudiness) (Fig. 2, Tables 1 and 2).

Data on PM_{10} concentrations in Kraków come from databases of the National Inspectorate of Environmental Protection (NIEP) (https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives, last access: 21 April 2021). Mean hourly data from seven measurement points were used (Table 1). The measurement points represent several parts of the city and are located in various types of land form and land use/land cover (see Fig. 2 for the location of the measurement points):

A. Krasińskiego St.: street canyon in the city centre, in the bottom of the Wisła River valley, with a very busy municipal transportation route and intensive traffic;

B. Dietla St.: a busy cross-road in the city centre, at the bottom of the Wisła River valley, with intensive tram, bus and car traffic;

C. Kurdwanów district: suburban area with a large district of blocks of flats, in the southern part of the city, about 50 m above the valley floor;

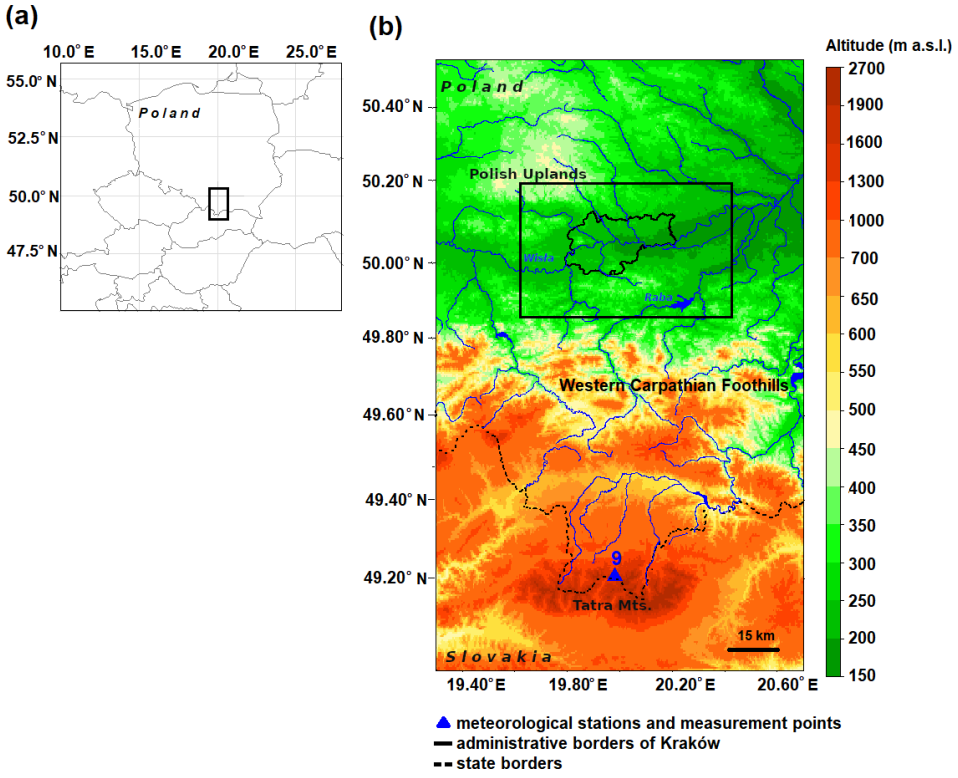


Figure 1. Location of the region studied: **(a)** in central Europe; **(b)** in southern Poland. Explanations: station no. 9 as in Table 2. The black frame in **(b)** represents the analysed area shown in Fig. 2.

D. Bulwarowa St.: suburban area with a large district of blocks of flats, located close to the steelworks, in the eastern part of the city, at a terrace of the Wisła River;

E. Piastów district: suburban area with a large district of blocks of flats, in the eastern part of the city, on the upland slope, about 50 m above the valley floor;

F. Wadów district: suburban area with agriculture activity and loose residential build-up, located close to the steelworks, at a river terrace in the eastern part of the Wisła valley;

G. Złoty Róg St.: suburban area with a large district of blocks of flats and residential build-up, on the upland slope, in the western part of the city.

Background data on wind conditions in the Wisła River valley and the neighbouring hilltop were obtained from the stations of the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute (IMWM-NRI) (Balice, Igołomia and Libertów) and the station of AGH University of Science and Technology (AGH UST), located in Reymonta St. (city centre) on the roof of the Faculty of Physics and Applied Computer Science. Wind speed and direction data of hourly resolution were used. Table 2 and Fig. 2 show the locations of the stations and the range of measurements.

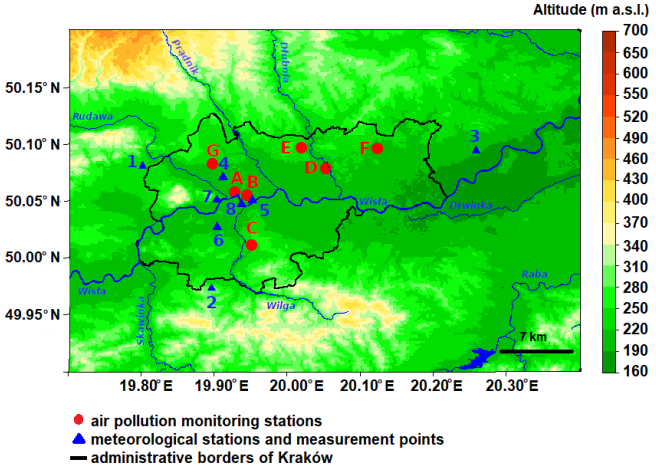


Figure 2. Location of the region studied at the junction of the Wisła River valley, Polish Uplands and Western Carpathian Foothills. Explanations: numbers and letters as in Tables 1 and 2.

3.2 Modelling systems

The Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement InterNational (ALADIN) system is a numerical weather prediction (NWP) system developed by the international ALADIN consortium for operational weather forecasting and

Table 1. Location of air pollution monitoring stations in Kraków.

Symbol	Station	Lat ° N	Long ° E	Altitude (m a.s.l.)	Land form
A	Krasińskiego St.	50.06	19.93	207	Valley bottom
B	Dietla St.	50.05	19.94	209	Valley bottom
C	Kurdwanów district	50.01	19.95	223	Valley slope
D	Bulwarowa St.	50.08	20.05	195	Valley bottom
E	Piastów district	50.10	20.02	239	Valley slope
F	Wadów district	50.10	20.12	218	Valley bottom
G	Złoty Róg St.	50.08	19.90	218	Valley slope

research purposes (Termonia et al., 2018). Part of the consortium's development work is to provide several configurations of limited-area models (LAMs), which were precisely validated to be used for operational weather forecasting at the 16 partner institutes. These configurations are called the ALADIN canonical model configurations (CMCs). Currently there are three canonical model configurations: (1) ALADIN baseline CMC, (2) Application of Research to Operations at Mesoscale (AROME) CMC, and (3) ALADIN–AROME (ALARO) CMC. AROME CMC and ALARO CMC are operationally used in IMWM-NRI, together with the CY43T2.

The background model data come from operational forecast results of the AROME model. Operational model AROME CMC 2 km has a horizontal resolution of 2 km × 2 km and 70 vertical levels, and the forecast length is 30 h. The size of the AROME CMC 2 km domain is 799 × 799 points centered on the geographical point 19.3° E, 52.3° N. The location of the lowest model level is at 9 m above ground level, and the model top is located at 65 km above ground level. During the analysed periods the model version was changed from CY40T1 to CY43T2 (11 February 2020). Seasonal verification of the AROME CMC model forecast results showed compliance of the new version with the previous one (Bochenek et al., 2020).

The ALARO model was used to prepare lateral boundary data for the AROME model. ALARO CMC CY43T2 is a non-hydrostatic model, with a horizontal resolution of 4 × 4 km and 70 vertical levels. The model configurations ALARO CMC and AROME CMC have been validated by the ALADIN team at IMWM-NRI for CY43T2 for resolutions 4 km × 4 km and 2 km × 2 km, respectively. Due to ongoing work on the assimilation of surface data in the ALARO model in the ALADIN Poland group, data assimilation was not used in this research, and models were run in dynamical adaptation mode.

Archival forecasts of the AROME CMC model with a temporal resolution of 1 h (forecast hours from the 6th to 29th) were used to study the characteristics of vertical wind and temperature profiles in the valley, with a special focus on three height levels (50, 100 and 200 m a.g.l.), as the valley depth is about 100 m. Analyses were conducted at four selected points, representing Balice meteorological station, the TV tower with vertical profile measurements, the city centre, and Bulwarowa St. (PM_{10} measurements). The points mentioned are located along the valley bottom in the W–E cross section.

3.3 Vertical profile observations and data verification

For the period from November 2019 to March 2020, additional data for the case studies are available. They consist of measurements of PM_{10} concentration in the vertical profile, performed on 31 d selected. The PM_{10} profiles' measurements were carried out in cooperation with the company Balon Widokowy sp. z o. o. (http://balonwidokowy.pl/, last access: 21 April 2021) which operates commercially the sightseeing balloon in Kraków. The PM_{10} measurements were conducted up to a maximum altitude of almost 300 m a.g.l. Balloon flights were performed in the western part of the city, at the Wisła River, in the city centre, close to the air quality monitoring stations Krasińskiego St. and Dietla St.

Measurements of PM_{10} concentration in the vertical profile were conducted by the Personal Dust Monitor (PoDust v1.1) system based on the low-cost Plantower PMS1003 optical dust sensor and Arduino platform presented in Fig. 2. The measurement system was attached to the outside of the balloon basket. It was built based on the Arduino Mega 2560 microcontroller, responsible for communication with the sensors, storing the measurements with 1 s resolution on the memory card, and sending information in real time to the database using a WiFi connection. To reduce the impact of water vapour on PM_{10} measurement during the fog conditions, the sensor inlet was heated up to 60 °C. To provide information on an actual location and other environmental conditions, the system was equipped with a GPS receiver and thermo/hygro/baro sensor providing e.g. the altitude estimated with combined GPS and barometer signals.

The measurement campaign covered the period from 28 November 2019 to 3 March 2020, during which 317 flights were conducted (31 d, 634 vertical profiles). Maximum flight altitude varied between 78 and 284 m a.g.l., depending on the vertical wind profile and the number of

passengers. Typical flight altitude during the sightseeing flight was 150 m a.g.l., but during low wind speed at higher altitudes and low passenger load, the maximum altitude was increased. The measurements were performed at different hours. The balloon's flight speed does not exceed $1\,m\,s^{-1}$ (ascent up to $0.8\,m\,s^{-1}$, descent approximately up to $0.6\,m\,s^{-1}$); flight time (ascent/descent) depended on the maximum altitude and ranged from 2–3 min (for maximum height 100 m a.g.l.) up to 6–10 min (for maximum height 300 m a.g.l.).

The frequency of flights depended on meteorological conditions and the number of customers. The decision to fly on a given day was first made based on the current forecast (available at https://m.meteo.pl/ and https://meteo.imgw.pl, last access: 21 April 2021) analysed by the flight operator. The factors determining the impossibility of flying are the occurring or forecasted wind gusts above $8\,m\,s^{-1}$, the risk of storms or the incoming atmospheric front, balloon icing, too low air temperature (below $-10\,°C$), atmospheric precipitation or low visibility. More than 70 % of the flights were performed up to 180 m above ground level, and flights reaching over 200 m above ground level made up only 15 % of the cases. Almost 50 % of the vertical profiles were conducted between 12:00 and 15:00 UTC, while profiles from 15:00 to 20:00 UTC constitute 23 % of the cases (Fig. A1). The flight altitude depended on the wind speed in the whole vertical profile of the balloon range, which was measured directly during the flight. Figure 3 presents a comparison of PM_{10} measurements from the balloon device, conducted at 2 m a.g.l., and measurements from the nearby Krasińskiego station. As the measurements from the Krasińskiego station are of hourly resolution, linear interpolation of two adjacent measurements was applied to obtain the same data resolution as for the balloon. The intersection point of the straight line matching the graph has been set to 0 because tests on the Plantower sensor have shown the correct measurement for a concentration close to $0\,\mu g\,m^{-3}$.

Data on meteorological conditions, on synoptic and local scales, for Kraków for days with balloon flights were obtained from the meteorological stations already mentioned above and additionally from two stations administered by the Jagiellonian University (JU) (Campus JU, Botanical Garden) and one station administered by IMWM-NRI (Kasprowy Wierch, in the Tatra Mountains). The JU also administers measurements at the television tower (the technical details can be found in Bokwa, 2010); the tower belongs to the Emitel company.

Due to the possible effect of foehn occurrence on ABL modification, potential foehn occurrence was determined based on the criteria of Ustrnul (1992) and on the analysis of the measurement data from the synoptic stations Kasprowy Wierch (wind speed and direction) and Balice (wind speed and direction and air humidity). One of the criteria determining foehn occurrence in Kraków is the presence of altocumulus lenticularis clouds (Ac len), which are one of the effects of mountain waves. Information about Ac len cloud occurrence was obtained from the station in the Botanical Garden in Kraków. Data on air temperature in the vertical profile of the Wisła River valley were obtained from stationary measurements at the altitudes 2, 50 and 100 m a.g.l. from the TV tower located in the western part of the valley. Table 2 and Figs. 1 and 2 show the locations of the stations and the range of measurements.

For the analysis of case study data, a different model configuration was used than for background data from the two cold seasons. Non-operational configuration of the AROME CMC 1 km × 1 km CY43T2 (AROME CMC 1 km) was applied. Operational model ALARO CY43T2 was used to prepare lateral boundary data for AROME model version CY43T2. Non-hydrostatic model AROME CMC 1 km has a horizontal resolution of 1 km × 1 km and 87 vertical levels; the forecast length was 30 h. The size of the AROME CMC 1 km domain was 810 × 810 points centered on geographical point 20° E, 50° N. The location of the lowest model level is at 9 m a.g.l., and the model top is located at 50 km a.g.l. Details concerning the height of the lowest model levels up to 3 km altitude, information about parametrization schemes used in the AROME model and a topographic map of the model domain are included in Tables A1 and A2 and Fig. A2. The data obtained with the model were used to provide vertical profiles of wind speed and direction, air temperature, relative humidity and turbulent kinetic energy (TKE) with 1 h temporal resolution in the points representative of the western, central and eastern parts of the city, corresponding to the measurements in Balice, Bulwarowa St. and the balloon measurement point, respectively. Additionally, N–S cross sections through the valley at those points were obtained for the same elements. For selected cases, wind, TKE and air temperature fields at selected levels were obtained for the whole area of Kraków and its surroundings.

Verification of forecast results of AROME CMC 1 km was performed for 24 h periods (i.e. from the 6th to 29th hours of forecast with 1 h resolution) for the selected 31 d of the case study period. Data obtained from four meteorological stations (Balice, Libertów, Igołomia and Reymonta St.) were used to verify the model forecast of air temperature, air humidity and wind components in the valley bottom and at the hilltop. The values of the root mean square error (RMSE) between observation and forecast were lower than 2 °C for air temperature, $1.5\,m\,s^{-1}$ for wind speed and 14 % for relative humidity at all the meteorological stations. Air temperature and humidity measurements at 50 and 100 m a.g.l. from the TV tower station were used to verify model forecast of atmosphere stratification in the western part of the Wisła River valley. Values of RMSE and difference (bias) for air temperature and humidity for both altitudes (i.e. 50 and 100 m) are similar: on average RMSE was equal to 1.5 °C for air temperature and 9.5 % for relative humidity.

Data analysis for the background period (i.e. two cold seasons) included calculation of standard characteristics for par-

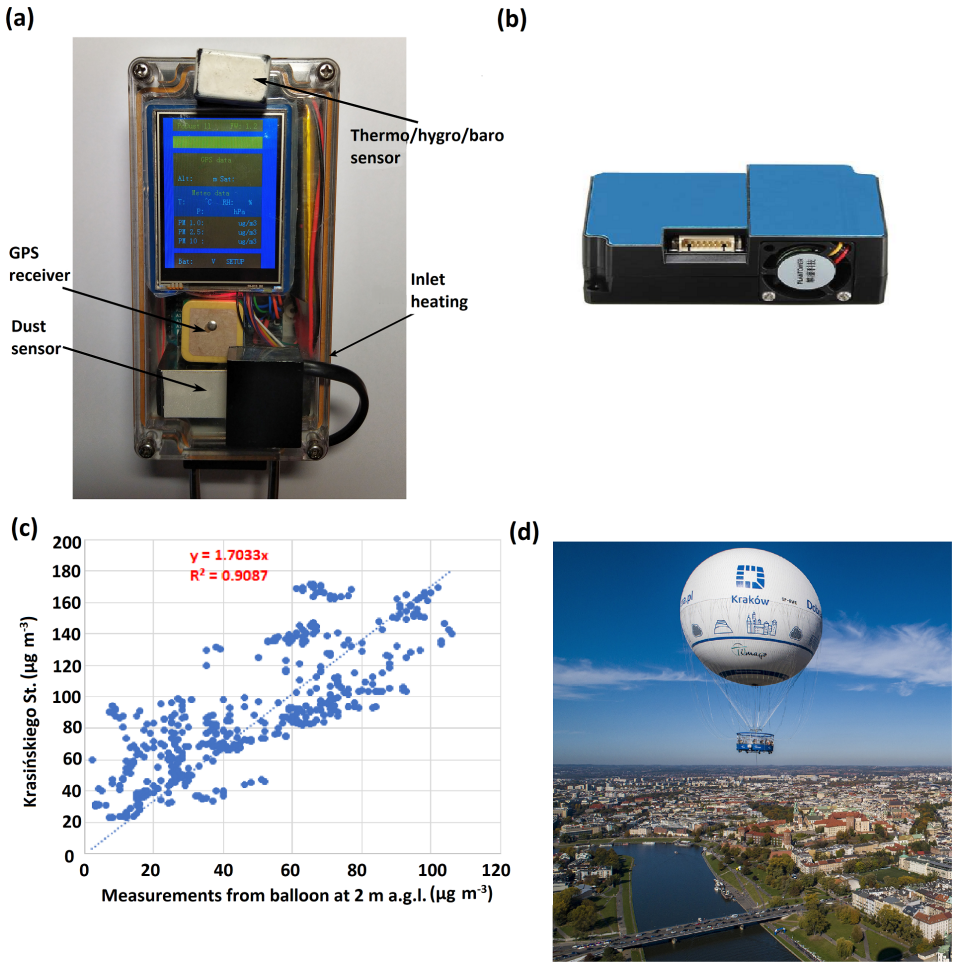


Figure 3. Self-designed and built air pollution measuring system **(a)**, low-cost sensor Plantower PMS1003 PM component **(b)**, correlation of measurements from balloon location and closest air pollution station (Krasińskiego St.) with fitted regression curve and R squared factor **(c)** and **(d)** sightseeing balloon (source: http://balonwidokowy.pl, last access: 21 April 2021).

Table 2. Locations of meteorological stations in Kraków and its vicinities, station Kasprowy Wierch, balloon measurement point and meteorological elements used in the study.

No.	Station	Lat ° N	Long ° E	Altitude (m a.s.l.)	Manager of the station	Land form	Elements used
1	Balice	50.08	19.80	237	IMWM-NRI	Valley bottom	V, D, T, RH
2	Libertów	49.97	19.90	314	IMWM-NRI	Hilltop	V, D, T, RH
3	Igołomia	50.09	20.26	202	IMWM-NRI	Valley bottom	V, D, T, RH
4	Reymonta St.	50.07	19.91	220	AGH UST	Valley bottom	V, D, T, RH
5	Botanical Garden	50.05	19.95	206	JU	Valley bottom	V, D, Ac len clouds
6	Campus JU	50.03	19.90	233	JU	Valley bottom	V, D
7	TV tower:				JU	Valley bottom	T, RH
	2 m a.g.l.			222			
	50 m a.g.l.	50.05	19.90	272			
	100 m a.g.l.			322			
8	Balloon measurement point	50.05	19.94	200	AGH UST	Valley bottom	PM_{10}
9	Kasprowy Wierch	49.23	19.98	1998	IMWM-NRI	Mountain peak	V, D, T, RH

Explanations: AGH UST – AGH University of Science and Technology, JU – Jagiellonian University. More information about the measurement points administered by JU can be found in Bokwa (2010). V – wind speed, D – wind direction, T – air temperature, RH – relative humidity.

ticular elements studied in order (1) to determine their spatial variability in the study area, (2) to define wind shear conditions, and (3) for further use in the verification of the representativeness of the case study period. The indices used included wind roses for the ground stations, wind speed histograms for three levels (50, 100 and 200 m a.g.l.), air temperature gradients, differences in PM_{10} concentrations between the stations, and the correlation between PM_{10} concentrations and wind speed.

The analysis of vertical profiles of PM_{10} concentration for individual days of the measurement campaign indicated that there were three characteristic vertical profiles of PM_{10} concentration.

- Group I: a profile with constant bracing throughout the vertical profile (slight fluctuations)
- Group II: a profile with a significant linear decrease in concentration from the ground level up to a certain height
- Group III: "S"-shaped profile (sigmoid curve)

For the case study period, first the PM_{10} concentration vertical profiles were classified with a subjective method of fitting the sigmoid curve to each vertical profile. For this purpose, the logistic curve was used which was determined by the equation

$$Y = c + \frac{d-c}{1+\exp(b(X-e))}, \quad (1)$$

where b is the slope around the inflection point, c is the lower asymptote, d is the higher asymptote, and e is a parameter determining the X value producing a response half way between d and c. The parameter b can be positive or negative and, consequently, Y may increase or decrease as X increases.

In the first step, all possible parameters b, c, d, and e were determined. If the lower asymptote c was below 0, the fitting curve was repeated with a default value of parameter c equal to 0 (minimum PM_{10} concentration in the atmosphere).

Additionally, in order to better analyse the S-shaped fitted curve, a linear curve was fitted close to the inflection point to determine the intersection with the asymptotes c and d (variables y_1 and y_2). Differences between y_1 and y_2 represented transition layer depth.

In order to separate vertical profiles into the three groups, boundary conditions were determined.

- Group I: PM_{10} concentration at the ground layer (below 10 m a.g.l.) was lower than 30 $\mu g\,m^{-3}$ (275 vertical profiles) or the difference between PM_{10} concentration at the ground layer and in the upper layer (i.e. close to the maximum flight altitude) was less than 25 $\mu g\,m^3$ (208 vertical profiles).
- Group II: the difference between PM_{10} concentration at the ground layer and in the upper layer was greater than 25 $\mu g\,m^3$ and variable y_2 was in the range $[-200; 30]$ m a.g.l. (determined experimentally for this data set) (17 vertical profiles).
- Group III: the difference between PM_{10} concentration at the ground layer and in the upper layer was greater than 25 $\mu g\,m^3$ and the variable y_2 was greater than 30 m a.g.l. (134 vertical profiles).

Figure 4 presents an example of vertical profiles from Groups II and III with a fitted sigmoid curve and variables b, c, d, e, y_1 and y_2. It should be mentioned that fitting the sigmoid curve to vertical profiles of PM_{10} concentration is useful in the analysis due to the estimation of the PM_{10} concentration in the upper layer (by assuming that the vertical profile of the parameter has a shape consistent with the function) and determination of the transition layer.

Three groups/patterns of PM_{10} concentration vertical profiles were obtained, and for each of them all meteorological data were analysed in order to determine their significance in controlling the air pollution vertical structure.

4 Results

4.1 Spatial and temporal variability of anemological conditions

Analysis of the data on wind speed and direction from three meteorological stations in the Wisła valley (Balice, Reymonta St., Igołomia) and one station at the nearby hilltop (Libertów) for the two cold seasons (September 2018 to April 2019 and September 2019 to April 2020) indicated significant spatial variability of that element due to the complexity of the land forms and the presence of urban structures. However, the differences of the wind structure between both seasons were negligible. In terms of spatial variability, the average frequency of weak wind (up to 2 $m\,s^{-1}$) varied from 43 % in Balice to 61 % in Reymonta St.; in Libertów and Igołomia the values reached 50 % and 53 %, respectively. For the wind speed $\geq 4\,m\,s^{-1}$, the highest average frequency was measured in Balice (27 %), while in Libertów and Reymonta St. it did not exceed 10 %, and in Igołomia it reached 21 %. Wind speed $\geq 10\,m\,s^{-1}$ was noted in Igołomia and Balice only. Dominant wind directions are strongly linked to the relief impact. In Balice those are SW and NE, in Igołomia and Reymonta St. W and E, and in Libertów it is the western sector: SW to WNW (Fig. A3).

Similar calculations were also performed for the case study period, i.e. 31 d during which the flights were conducted, within the period from 28 November 2019 to 3 March 2020, in order to check whether these results can be treated as representative of the whole cold period. The frequency of wind speed $\leq 2\,m\,s^{-1}$ was much larger than

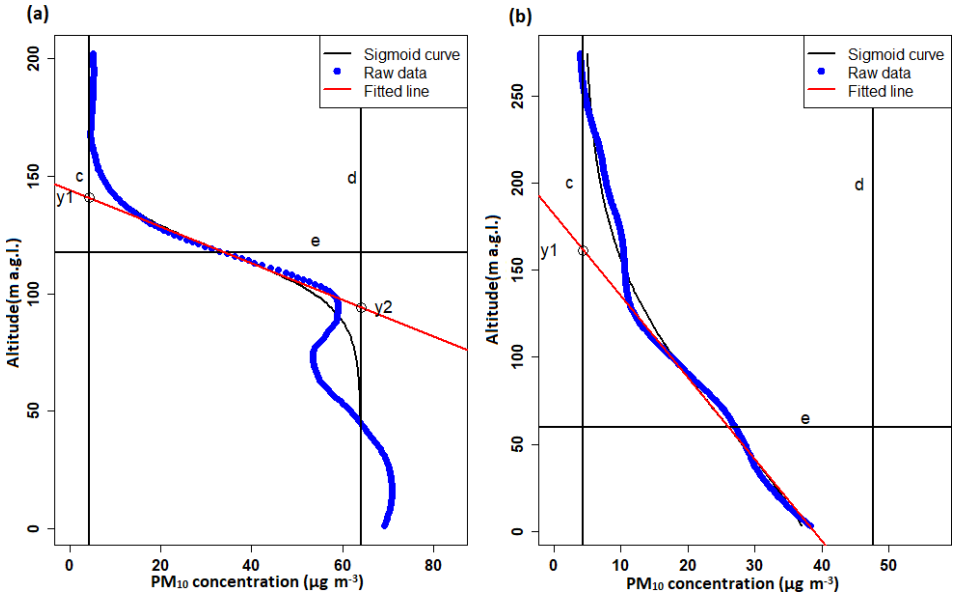


Figure 4. Vertical profiles of the PM_{10} concentration with the fitted sigmoid curve and estimated optimal parameters representing the "S"-shaped profile, group III **(a)**, and significant linear decrease from ground level, group II **(b)**.

the average value for both seasons, from 62 % in Balice to 83 % in Reymonta St., while the frequency of wind speed $\geq 4\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ was much smaller, from 0.1 % in Reymonta St. to 7.9 % in Balice. Dominant wind directions for the case study period did not differ significantly from the average values for both seasons. Therefore, the case study period can be considered to represent days with very low wind speed at the station level.

On the basis of archival forecasts of the AROME operational model, the characteristics of vertical wind profiles in the valley for four points located in the valley bottom in a W–E cross section (i.e. Balice, TV tower, city centre, and Bulwarowa St.), for the two seasons, were examined at three levels, 50, 100 and 200 m a.g.l., and for every hour of the day. The analysis did not show significant differences between the seasons. For nearly 50 % of the cases, the velocity at 50 m a.g.l. in the valley did not exceed $4\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. Wind speed at levels 100 and 200 m a.g.l. did not exceed 10 and $12\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ for more than 90 % of the cases, respectively.

Wind direction forecasts at the three levels were used to analyse the frequency of significant wind direction change in the vertical profile (wind shear) between levels 50 and 100, 100 and 200 and 50 and 200 m a.g.l. The minimum value of significant wind direction change between two vertical levels was set to 20° on the basis of analyses. Wind shear studies were performed for diurnal (i.e. 06:00 to 17:00 UTC) and nocturnal (i.e. 18:00 to 05:00 UTC) periods. For the point representing the city centre and located close to the balloon sounding site, for both cold seasons, the percentage of wind shear which lasted more than 4 h (between levels 50 and 200 m a.g.l.) equalled 9.5 % and 31.9 % during daytime and nighttime, respectively. The values for the case study period reached 42 % and 52 %, and for the wind shear which lasted over 4 h it was 23.7 % and 46.2 %.

On the basis of the above comparisons, it is possible to conclude that on the days which belong to the case study period, wind speed was much lower than on average during both cold seasons, while wind shear occurred much more frequently.

4.2 Spatial and temporal PM_{10} concentrations' variability

The analysis of data on PM_{10} concentration from all monitoring points operated by NIEP and described in Sect. 3, from both cold periods analysed, was performed in order to determine to what extent the measurements of the PM_{10} vertical profile realized close to the city centre, in the western, narrow part of the valley, are representative of other areas of the city. First, significant differences were found between both of the analysed cold seasons: in the season 2019–2020, the mean concentrations were lower than in the previous cold season at all stations, except Bulwarowa St. The number of days with mean daily concentration $\leq 50\,\mu\mathrm{g\,m^{-3}}$ increased by as much as 15 % in Kurdwanów district and Dietla St., with a simultaneous decrease in the number of days with mean daily concentration 50–100 (−10 % in Kurdwanów district and −8 % in Dietla St.). The number of days with an average daily concentration $\geq 50\,\mu\mathrm{g\,m^{-3}}$ in the season 2019–2020 ranged between 35 and 63 for most of the stations except Krasińskiego St., located close to the balloon site, where the number of such days was equal to 101. In the season 2019–2020, days with a mean daily concentration of 100–150 $\mu\mathrm{g\,m^{-3}}$ occurred

at four stations only, Krasińskiego St.: 14 d, Bulwarowa St.: 7 d, Kurdwanów district: 4 d, and Złoty Róg St.: 3 d, while in 2018–2019, such high concentrations occurred almost at the same stations, but the numbers were significantly higher, e.g. 28 d in Krasińskiego St. and from 12 to 14 d in Złoty Róg St., Dietla St., and Kurdwanów district. The maximum PM_{10} hourly concentration reached 378 $\mu g\,m^{-3}$ in Dietla St. on 18 February 2019. Therefore, it can be stated that the western part of the city, located in the narrow part of the valley floor, experiences much worse air pollution concerning PM_{10} than the eastern part, located in the wide part of the valley. The vertical PM_{10} measurements can be then considered representative of the western part of the valley.

As weak winds prevailed during the case study periods, hourly PM_{10} concentrations were analysed for particular wind speed ranges, and wind measurements from Reymonta St. were used (i.e. representative of the western part of the city). Concerning high PM_{10} levels, which are the most dangerous for human health, the percentage of the cases with wind speeds below 1 $m\,s^{-1}$ (during both the cold seasons) when the concentration was higher than 100 $\mu g\,m^{-3}$ varied from 7.3 % (Wadów district), 10 %–11 % (Dietla St., Bulwarowa St. and Piastów district), 13.6 % at Złoty Róg St., to 15.3 % at Kurdwanów district and 25.7 % at Krasińskiego St. For cases $\geq 150\,\mu g\,m^{-3}$, the values varied from 0.7 %–0.8 % (Bulwarowa St., Piastów and Wadów district), 1.6 % at Dietla St., 1.9 % at Złoty Róg St., to 4.1 % at Kurdwanów district and 5.7 % at Krasińskiego St. The data show large differences in PM_{10} horizontal distribution within the city and a relatively high frequency of PM_{10} dangerous concentrations, as high as double the allowed mean daily level.

Figure A4 shows the correlation between PM_{10} concentrations at individual air pollution stations and the wind speed at Reymonta St. The logarithmic curves were fitted to the data.

Due to the fact that PM_{10} levels differ significantly between the two cold periods analysed (i.e. 2018–2019 and 2019–2020), PM_{10} data for the case study period were compared with the data for the whole season 2019–2020 only in order to check their representativeness for the season. During the case study period, hourly PM_{10} concentrations $\leq 50\,\mu g\,m^{-3}$ reached from 23 % for Krasińskiego St. to 50 %–60 % for the Dietla St., Piastów and Wadów districts, while during the whole cold season 2019–2020 they were much more frequent and varied from 57 % for Krasińskiego St. to over 80 % for the Dietla St., Piastów and Wadów districts. In parallel, values $\geq 150\,\mu g\,m^{-3}$ for most of the stations were up to 3 % (with a minimum in Dietla St. 0.4 %), but in Krasinskiego St. they reached 7 %, while for the whole season the highest value was 1.3 %. That means that the case studies represent not only the conditions with much lower wind speed than the seasonal average, but also the conditions with a much higher PM_{10} level than on average.

4.3 Vertical air temperature gradient

Based on the high-resolution forecasts of the AROME CMC 1 km model, an analysis of the vertical temperature gradient between the model level 50 and 220 m a.g.l. for the city centre, for the case study period, against the background data from two cold seasons, has been performed. The presence of a thermal inversion is an important factor which limits the PM_{10} dispersion conditions and therefore contributes to its high levels. The gradient values were calculated separately for the daytime (06:00–17:00 UTC) and nighttime (18:00–05:00 UTC), as the phenomenon is usually much more frequent during the nighttime than the daytime. The frequency of a gradient greater than 0.5 °C/100 m (i.e. thermal inversion) in the nighttime was rather similar in the case study period (48 %) and in the cold seasons (38 %), while during the daytime, the value for the case study period was much larger than for both seasons (32 % and 7 %, respectively). This means that during the study period, the inversions were much more frequent than on average in the cold season, which contributed to the much higher PM_{10} concentrations mentioned above.

The frequency of thermal inversion is linked to wind speed (Table A3). An analysis of the temperature gradient versus wind speed at 50 m a.g.l. was performed for the both cold seasons, jointly. The studies indicated that for wind speed $< 2\,m\,s^{-1}$ the frequency of the gradient greater than 0.5 °C/100 m was 45 %, and for wind speed 2–4 $m\,s^{-1}$ it decreased to 31 % of the cases. High PM_{10} concentrations in the study period were then the effect of joint impact of low wind speed and thermal inversion, generated by the city location in the concave land form.

4.4 Vertical profiles of PM_{10} concentration

There were three types of PM_{10} vertical profiles distinguished (Fig. 5):

- type I – almost constant value of PM_{10} concentration in the vertical profile (small fluctuations, weak decrease);
- type II – strong decrease in PM_{10} concentration in the vertical profile;
- type III – the occurrence of three layers of PM_{10} concentration: (1) constant concentration in the lower part of the profile, (2) transition layer above, and (3) the upper layer where a sudden drop in PM_{10} concentration is observed.

Out of 31 analysed days, type I was observed on 27 d, type II on 8 d and type III on 13 d. For 10 out of 31 d, two types of profiles were observed on 4 d and all three types on 6 d (Table A4). Occurrence of different profile types during a single day indicates significant fluctuations of meteorological conditions.

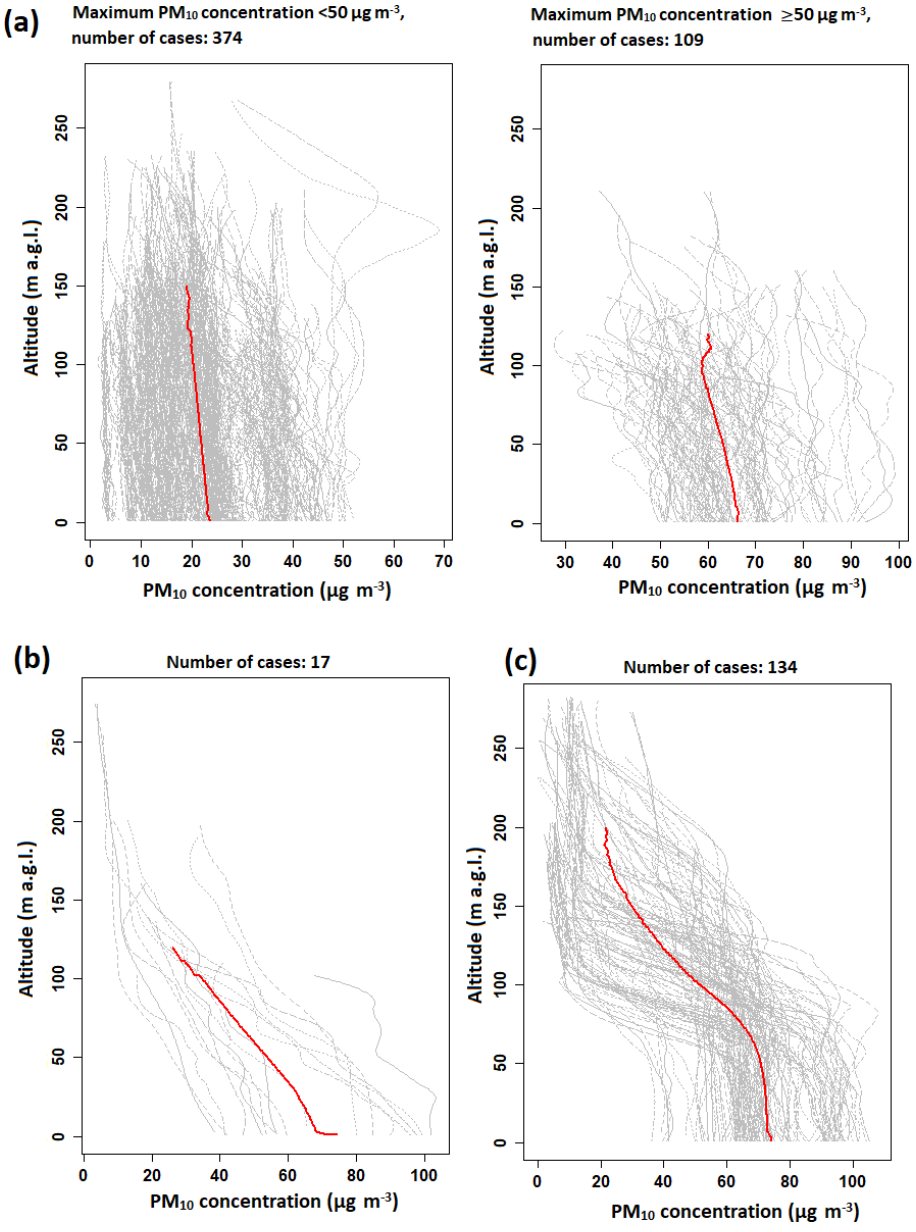


Figure 5. Classification of PM_{10} vertical profiles into the three main types: **(a)** type I (it is presented in two plots due to a wide range of PM_{10} concentration values); **(b)** type II; **(c)** type III. Explanations: grey lines – individual vertical profiles of PM_{10} concentration; red lines – mean profiles of a certain type.

Vertical profiles assigned to type III differ a lot in the position and thickness of the transition layer. The dominant pattern in Fig. 5c is characterized by a sudden drop in pollution at the valley top which is about 100 m a.g.l. The transition layer was further determined by using variables y_1 and y_2 estimated from the sigmoidal curve fitted to the data (Sect. 3.3).

Figure 6 presents characteristics of the transition layer for all selected vertical profiles.

It should be noted that the vertical profiles in type I could have been the lower part of profiles of type III; the low flight maximum altitude, associated with the occurrence of a strong wind, did not allow us to continue the measurements higher and verify the hypothesis.

4.5 Impact of relief and meteorological conditions on PM_{10} concentration vertical profiles

4.5.1 Type I

On 18 out of 27 d analysed, mechanical and thermal turbulence led to strong convection. However, the effect of mechanical turbulence was a quick increase in convection-layer

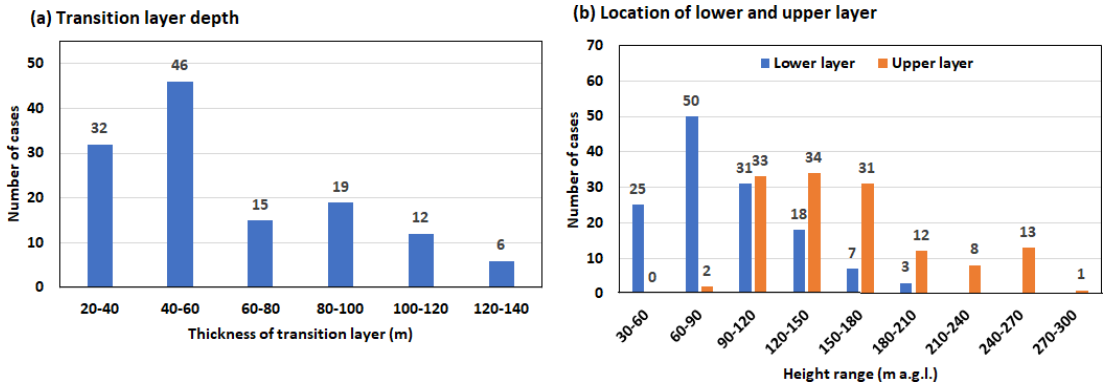


Figure 6. Characteristics of the transition layer in the vertical profiles of PM_{10} concentrations in type 3.

thickness during the day, followed by its sudden decrease in the evening, while thermal turbulence caused gradual development of the convection layer and its lower thickness. The upper limit of the convection layer was defined with the application of TKE profiles and reached 300–500 m a.g.l. The flights' heights on those days did not exceed those values, which was the reason for the almost constant PM_{10} concentration observed.

On 5 out of 27 d analysed, the convection layer was controlled by the thermal turbulence. Its thickness did not exceed 200 m a.g.l., and wind shear was observed above, but the flights reached only 150 m a.g.l. Therefore, the upper layer with – most probably – much lower PM_{10} concentrations could not be observed. Such a scenario is an example of a modification of the turbulence at the top of CBL, i.e. a reduction of vertical mixing efficiency by wind shear, presented e.g. in Rodier et al. (2017).

4.5.2 Type II

The sudden decrease in PM_{10} concentration with height in profile type II was an effect of two processes: an increase in pollutant emission near the ground and removal of the pollution from the upper layers. The latter was due to mechanical turbulence caused by the presence of the wind shear. The wind shear was the effect of an increase in wind speed in the vertical profile close to the valley top and significant wind direction change in the vertical profile starting from close to the ground layer caused by the complex topography impact (6 of 8 selected days). Sudden decrease in PM_{10} concentration at all selected days was observed at evening hours (on 17 December 2019, also at morning hours) after weakening of convection movements and wind speed close to the ground. During 1 d out of 8 d selected, the occurrence of turbulence was caused by the presence of mountain waves which strongly modified convection movements. The analysis of the flights showed that vertical distribution of PM_{10} concentration characterized by a significant decrease with height starting from close to the ground level was a short-time phenomenon which can occur during e.g. a momentary lack of convective movements or a passage of an atmospheric front.

The case study of 27 January 2020 is presented below as an example of the processes described above (Figs. 7–8). In the early morning hours until 09:00 UTC, there was a humid cold pool in the valley, and drier and warmer air moved over the valley from the west. Between 06:00 and 12:00 UTC, there was a gradual break of the inversion and a decrease in humidity in the profile observed at 50 and 100 m a.g.l. at the tower station (Fig. 7b, c). Until 12:00 UTC, the PM_{10} concentration at the ground stations did not change significantly (Fig. 7d); after 12:00 UTC an increase in PM_{10} concentration was visible in the vertical profile. The increased concentration of PM_{10} at Krasińskiego St. compared to other stations was maintained until 17:00 UTC. The difference in concentration between the ground-level measurement from the balloon point and Krasińskiego St. was in the range of 50–70 $\mu g\,m^{-3}$ for most of the time.

Figure 8 presents vertical profiles of wind shear direction and speed, calculated with the data from two neighbouring vertical levels, for the measurement period from 10:00 to 16:00 UTC on 27 January 2020. Wind speed components from the first 14 vertical levels (Table A1) from AROME model analysis were used in those calculations. Analysis of vertical profiles of wind shear for the period 10:00–13:00 UTC indicates that in the layer 120–150 m a.g.l., wind speed in the vertical profile increased significantly, and above this layer there was a sudden change in wind direction in the vertical profile. The height of local maximum of wind shear speed coincides with the maximum altitude of balloon flight (from 100 m a.g.l. at first flight to 150 m a.g.l. from the second to fifth flights).

Vertical profiles of TKE indicated that convection layer during this day reached up to 200–220 m a.g.l.; isolines of TKE equal to 0.01 and 0.04 $m^2\,s^{-2}$ are presented in Fig. 8e. Flights between 10:00 and 14:00 UTC indicated a constant PM_{10} concentration value in the profile up to 150 m a.g.l. Linear decrease in PM_{10} concentration above 150 m a.g.l.

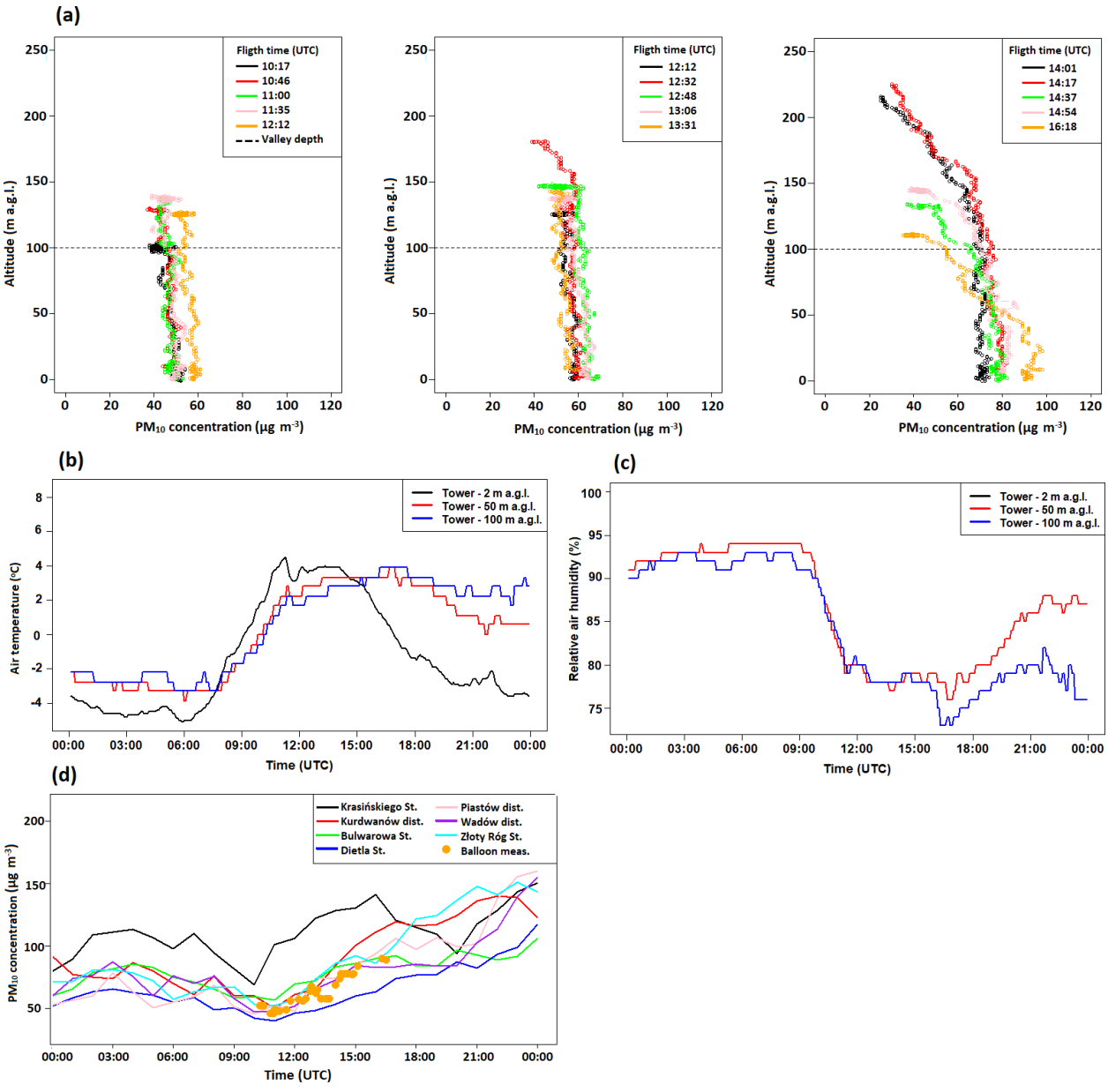


Figure 7. Vertical profiles of PM_{10} concentration **(a)**, vertical profiles of air temperature **(b)** and **(c)** relative air humidity from the TV tower and **(d)** hourly concentration of PM_{10} in air pollution from ground-level measurements during balloon soundings on 27 January 2020. Explanation: valley depth is the altitude of the hilltops surrounding the valley marked at 100 m a.g.l. with a dashed line in **(a)**.

was noticed at higher flights around 12:30 and 14:00–14:30 UTC. The consequence of the disappearance of the convection layer (which began at 13:00 UTC) and mechanical pollution removal from the layers above the valley was visible at flights after 14:30 UTC. The strongest decrease in the concentration in the vertical profile was observed during the last flight; the height of the ground layer with stable PM_{10} concentration did not exceed the mean height of the buildings in the city (30 m a.g.l.), and above this layer there was a linear decrease in PM_{10} concentration. The decrease in concentration in the layer up to 150 m a.g.l. was related to the occurrence of a wind shear (Fig. 8d).

During the period between 13:00 and 16:00 UTC, vertical profiles of wind shear speed (Fig. 8c) in the layer up to 300 m a.g.l. did not exceed 1 m s^{-1} for most of the cases, while wind shear direction changed significantly in layer from ground level up to 300 m a.g.l., with visible local peaks at selected levels.

During the night, there was a separation of the valley wind and topographically channeled airflow; i.e. the wind in the

valley weakened, and at the valley top the wind speed increased (Fig. 8e).

4.5.3 Type III

Type III of the PM_{10} concentration vertical profile was found on more than 40 % of measurement days (13 out of 31 d). The vertical wind profiles indicated that during most of the selected days a strong wind shear was observed close to the valley top (i.e. about 100 m a.g.l.) or at the upper layers. Wind shear occurred either in a thin layer (i.e. as a sudden change between two neighbouring vertical model levels, in a layer up to 50 m thick) or in a thick layer (100–200 m). The occurrence of the wind shear was also accompanied by an sudden increase in wind speed in the vertical profile (6 of 13 analysed days) or sudden change in wind direction in the vertical profile (3 of 13 analysed days), which was responsible for pollution removal from the upper layer. Wind direction observed at the lower layer was determined by the local topography (valley wind), whereas at the upper layer there was regional topographically channeled airflow. The separation of the two atmospheric layers by a strong wind shear for selected cases was reinforced by the advection of warmer air (on 8 d out of 13 analysed). In case of a cold pool occurrence in the valley (6 of 13 d), the vertical transport of air pollution was hindered by the thermal inversion intensification.

Data of 28 November 2019 were used as an example of profile type III. Vertical profiles of air humidity and air temperature measurements from the TV tower indicated the presence of a persistent ground thermal inversion intensified by warm and dry air advection from the south-west (Fig. 9a, b). On that day, foehn conditions were not met at Kasprowy Wierch and Balice stations; however, the cross section of the AROME CMC 1 km model indicated the occurrence of foehn in the south-western Western Carpathians (not shown). This phenomenon could partially contribute to the warm air advection from the south-west. Additionally, data from the air pollution measurement stations showed significant spatial variability of PM_{10} concentration in Kraków (Fig. 9e). The maximum hourly PM_{10} concentration difference between measurement points was equal to 170 $\mu g\,m^{-3}$. Ground measurements at the balloon site were similar to those from Piastów district, and differences between the balloon site and Krasińskiego St. were in the range from 89 to 107 $\mu g\,m^{-3}$.

Until 13:00–14:00 UTC on 28 November 2019, the AROME model predicted the occurrence of a hydraulic jump on the southern and south-western slopes of the highlands at a distance of 25–30 km from the city centre (upward air movement); this phenomenon has been presented in the SW–NE cross section (Fig. 9c–d, symbol HJ). The occurrence of hydraulic jump caused a weakening of the horizontal wind in the valley and the occurrence of a strong wind shear marked on the SW–NE cross section (Fig. 9c, marked by horizontal red line).

The height of the transition layer did not exceed the valley top, and the differences between the individual vertical PM_{10} concentration profiles were not significant (Fig. 10a, b). The height of the transition layer was mostly determined by the height of the convection layer (the maximum predicted height of the convection layer was equal to 100 m a.g.l. at 12:00 UTC); vertical profiles of wind shear speed between 10:00 and 13:00 UTC indicated the occurrence of a local maximum value above the convection layer at ca. 130 m a.g.l. (Fig. 10c, d). The limited range of the convection layer on 28 November 2019 was the result of high cloudiness during the daytime. After 13:00 UTC the wind shear speed in a layer up to 300 m a.g.l. decreased to 1–1.5 $m\,s^{-1}$, and the height of the local maximum decreased to 70–100 m a.g.l.

Similar situations with significant wind direction change in the vertical profile and weak wind speed were presented e.g. in Vergeiner (2004) and Li et al. (2012, 2015) for mountain valleys, during hydraulic jump occurrence. In the upper layer, wind direction is constant, while wind speed increases with height.

For the cases classified into group III, the occurrence of the transition layer was described by three parameters: half-way altitude (parameter e) and the altitude of the lower and upper transition layers (Fig. 6). Several meteorological factors were considered responsible for changes in those parameters. One of them was the height of the convection layer determined with the TKE vertical profile. It was checked whether predicted TKE for model vertical levels closest to the half-way altitude (below and above) decreased below 0.01 $m^2\,s^{-2}$. Another condition was whether between two model vertical levels closest to the model to half-way altitude (below and above) or for the two closest vertical levels above there was significant wind shear defined as wind shear speed $> 1.5\,m\,s^{-1}$ or whether vertical wind direction change between two neighbouring levels was greater than 20°. Both conditions for a vertical wind profile were analysed separately, and in case they were met, the height of the lower model layer from the two analysed ones was considered the final result.

For some cases, the conditions presented above occurred together at the same moment, in particular cases at the close altitude (e.g. TKE and wind shear occurrence on 6 d of 13 selected – 44 vertical profiles).

Figure 11 presents a comparison of altitude of half way for the PM_{10} vertical profile and predicted height of the convection layer (based on the TKE) and the layer at which strong wind shear was observed. For 41 of 134 PM_{10} vertical profiles, none of the conditions was met.

Analysis of results presented in Fig. 11 shows that for 60 vertical profiles of 134 analysed, an important factor in the S-shaped vertical PM_{10} profile was the height of the convection layer (10 measurement days). For 44 of 134 vertical profiles of the PM_{10} concentration, the altitude of wind shear speed higher than 1.5 $m\,s^{-1}$ was close to the height of half-way altitude for PM_{10} (6 measurement days), while for wind

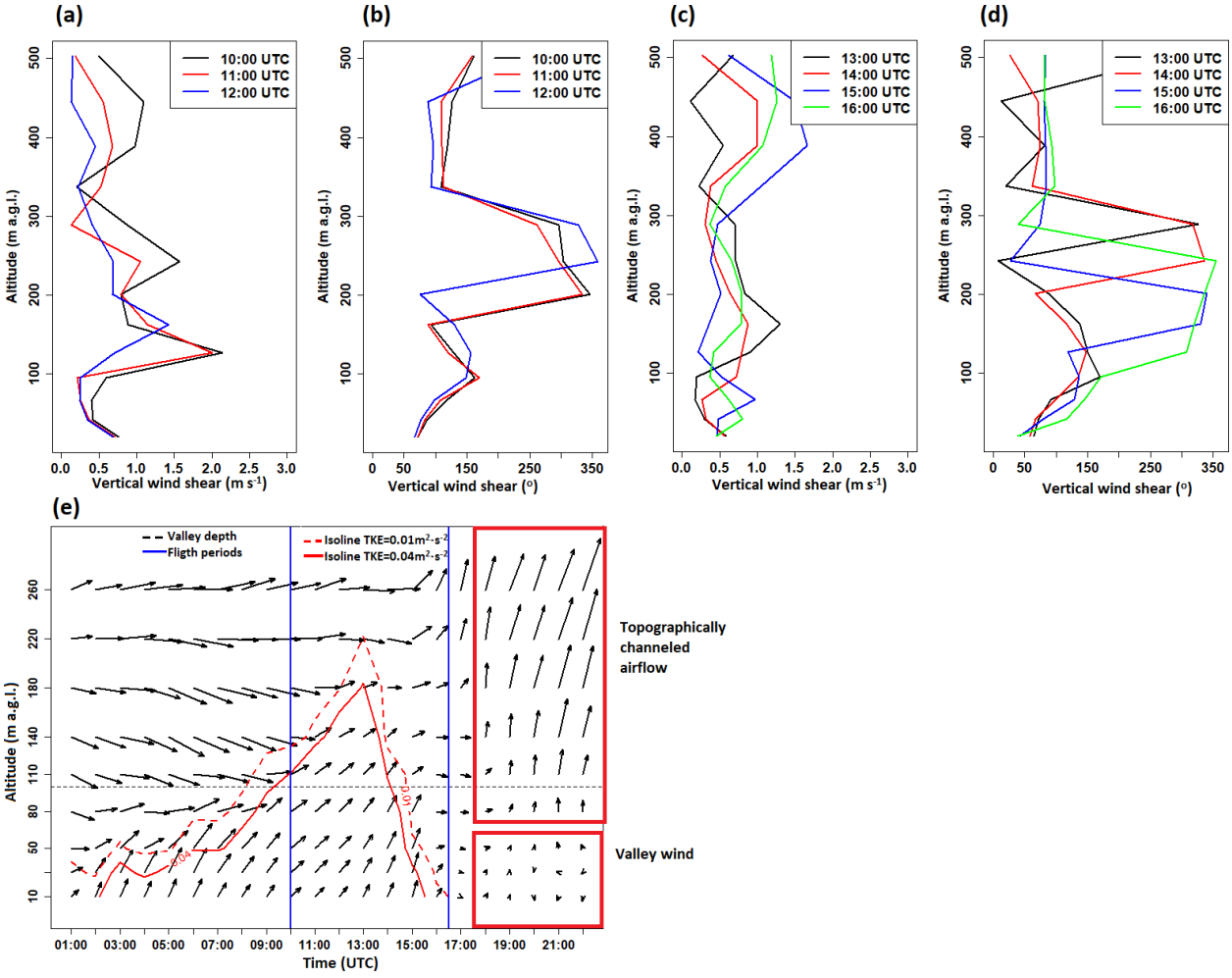


Figure 8. Vertical profiles of wind shear between 10:00 and 16:00 UTC, 27 January 2020: wind shear speed **(a, c)** and direction **(b, d)**. Wind profile forecast with added isolines of TKE equal to 0.01 and 0.04 $m^2\ s^{-2}$ for the point representing the city centre. Measurement period is marked with blue vertical lines. Explanation: valley depth is the altitude of the hilltops surrounding the valley marked at 100 m a.g.l. with a dashed line in **(e)**.

shear direction was observed for 68 vertical profiles (7 measurement days). Values of root mean square error and Pearson correlation coefficient are comparable between all three groups (correlation coefficient greater than 0.85); however, a Mann–Whitney U shows that samples where the dominant factor is wind shear direction median altitude is shifted in comparison with the observations (p value equal to 0.001).

Altitudes of wind shear occurrence connected with change in wind direction in the vertical profile were in most cases lower than the height of half way (50 of 66 cases), in contrast to the cases with strong wind shear speed, where in 55 % of the cases strong wind shear was predicted above the height of half-way altitude (24 of 44 cases). For the turbulent kinetic energy vertical profile, in 33 % of the analysed cases the height of half-way altitude was lower than convection-layer height.

5 Discussion

Studies presenting the complex thermal structure of the boundary layer (e.g. Wang et al., 2018; Xu et al., 2019) indicate that local pollutants are mostly trapped in the lowest layer. The occurrence of a multi-layer vertical structure in the boundary layer was noticed during the foehn periods, too, where warm air advection caused the intensification of the air temperature inversion and CAP and reduction of the available air volume for mixing the pollutants (e.g. sandwich foehn occurrence: Vergeiner, 2004; Drechsel and Mayr, 2008; Li et al., 2015). In the present paper, for the days with balloon flights, the occurrence of PM_{10} profile type III was connected with the advection of air masses from the south. Such an advection direction may be linked to the foehn wind occurrence in the Tatra Mountains. Therefore, we checked whether such advection is linked to high PM_{10} concentration

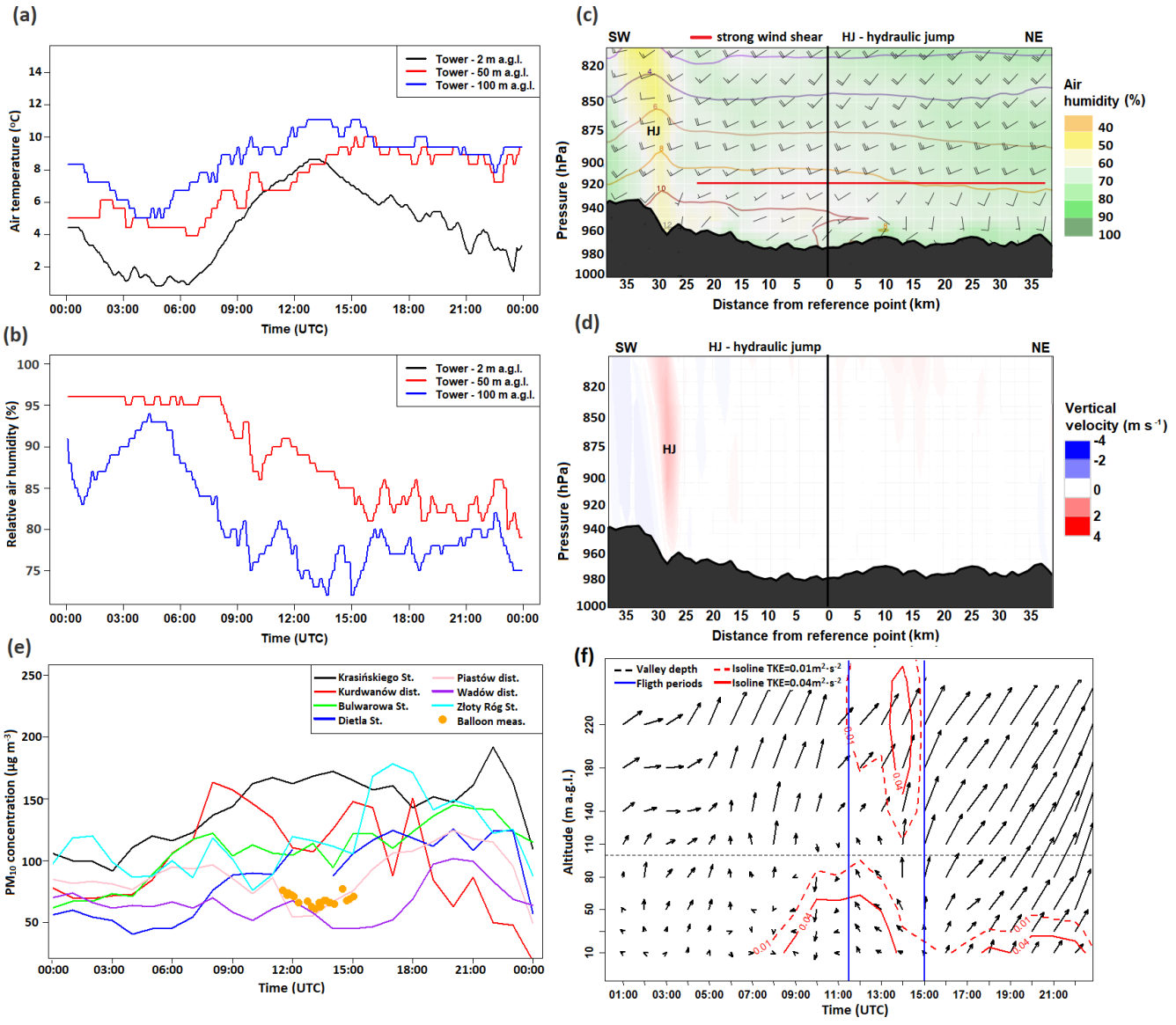


Figure 9. Vertical profiles of air temperature **(a)** and relative air humidity **(b)** from the TV tower on 28 November 2019; SW–NE cross section for the city centre of air temperature (contour lines), air humidity (background), and wind speed (in knots) and direction (graphical symbols) **(c)** and vertical velocity **(d)** at 11:00 UTC 28 November 2019; hourly concentration at air pollution stations on 28 November 2019 with added ground balloon measurements **(e)**; wind profile forecast with added isolines of TKE equal to 0.01 and 0.04 $m^2 s^{-2}$ for the city centre with a marked measurement campaign period by the blue vertical on 28 November 2019 **(f)**. Explanation: valley depth is the altitude of the hilltops surrounding the valley marked at 100 m a.g.l. with a dashed line at **(f)**; the red and blue colour scales at the cross section of vertical velocity in **(d)** indicate upward and downward movements, respectively.

differences between the measurement points within the city, especially between the western, narrow part of the valley and the eastern, wide part. For both cold seasons, cases of PM_{10} concentration differences $> 50\,\mu g\,m^{-3}$ which lasted at least 5 h constituted 10.9 % of the study period. For half of the cases, the dominating wind direction noted in Libertów was from the sector 130–270°. In both cold seasons, wind direction from the sector 130–270° was noted in 52.6 % of the cases, which shows that it is an important factor controlling PM_{10} spatial patterns, but the impact is diversified.

Research presenting the impact of PBL dynamics confirms that during convective conditions (mechanical and thermal turbulence) vertical distribution of PM concentrations is uniform (Strbova et al., 2017; Wang et al., 2018; Li et al., 2019). Mechanical turbulence can be caused by strong wind shear connected to low-level jet (LLJ) (Li et al., 2019), mountain waves (Zängl, 2003), hydraulic jump (Kishcha et al., 2017),

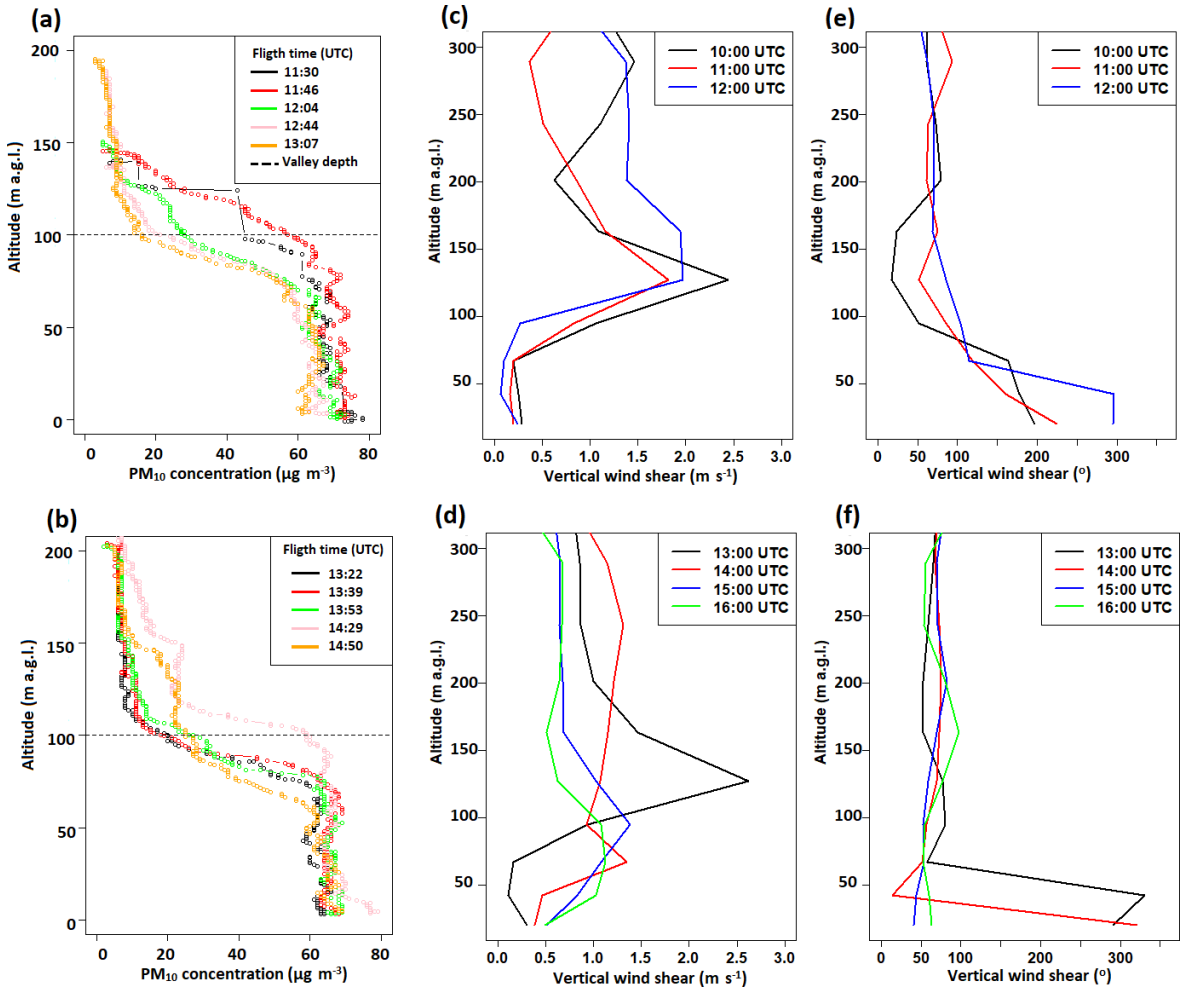


Figure 10. Vertical profiles of PM_{10} concentration **(a–b)** and vertical profiles of wind shear speed **(c–d)** and direction **(e–f)** on 28 November 2019. Explanation: valley depth is the altitude of the hilltops surrounding the valley marked at 100 m a.g.l. with a dashed line in **(a)** and **(b)**.

rotors (Kunin et al., 2019) or passage of an atmospheric front. In the present study, wind shear turned out to be the most important factor in terms of PM_{10} vertical profile modification. In the case of the study area under investigation, the wind shear is generated due to the relief impact, i.e. the presence of a large valley, blocked on one side by the hills. Studies presented in Sheridan (2019) indicate that the valley width is an important parameter affecting the interactions between CAP and air flow above the valley. For valleys whose depth exceeds the depth scale of the nocturnal stable boundary layer, processes related to daytime insolation may be not strong enough to break the cold-air pool.

The data used included both measurement and model data which allowed us to verify, as much as possible, the numerical weather predictions. Prognosis of e.g. wind field and TKE is highly dependent on the inclusion of various topographical features in the model formula. Local-scale phenomena like low-level jets, cold pool occurrence, and katabatic flows are often under-represented in the model analysis, so the verification with observations is needed.

The meteorological and PM_{10} data for the study periods were compared to the data for the whole of the two cold seasons, and it was found that they are representative of the situations with very low wind speed and higher than the usual air pollution. Therefore, the analyses' outcomes are valid for those periods within the cold season when the aerosanitary conditions are the worst. Additionally, the results obtained may be considered representative of cities located in large river valleys of central Europe and applied in the studies concerning the air quality there.

6 Conclusions

The results of our study present how the wind shear generated on a local scale by the diversified relief's impact can be a factor which might significantly modify the spatial pat-

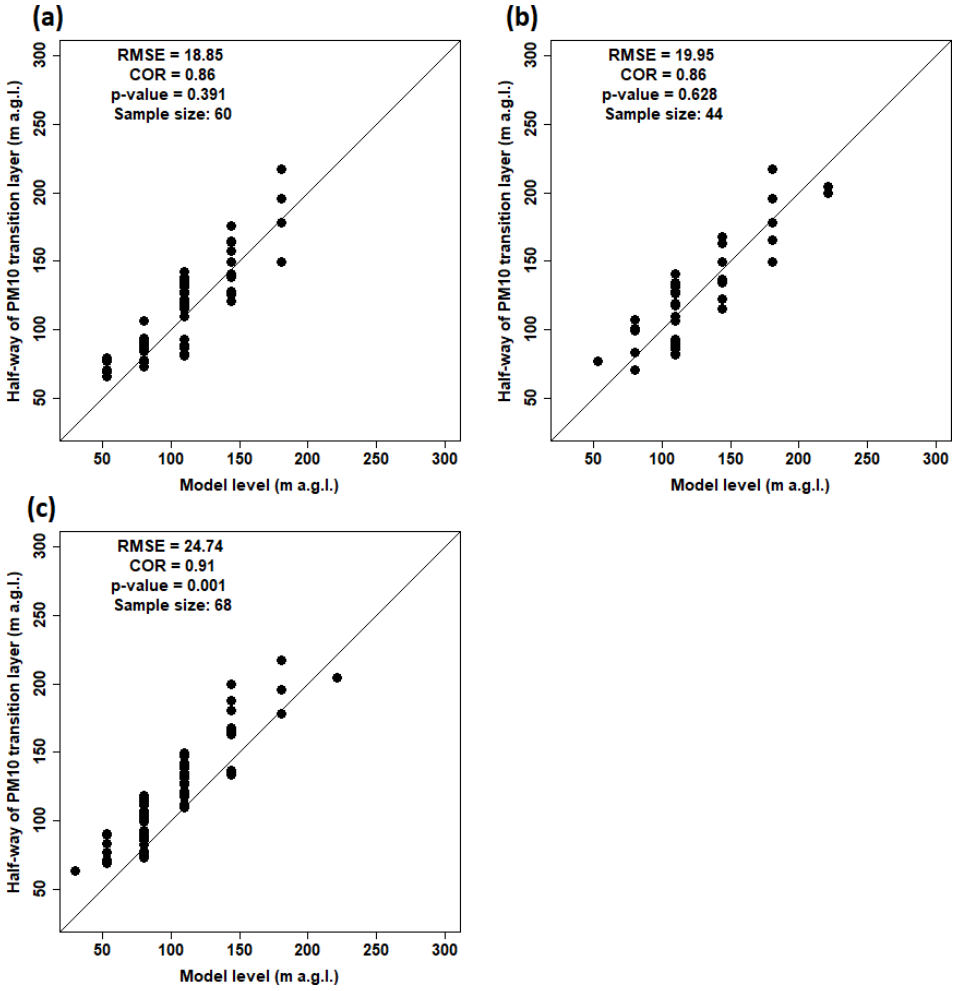


Figure 11. The observed height of half-way altitude of the PM_{10} concentration's transition layer and **(a)** predicted height of the convection layer, **(b)** the strong wind shear speed, and **(c)** wind shear direction. Explanations: RMSE: root mean square error, COR: Pearson correlation coefficient, p value: p value calculated with the Mann–Whitney U test.

tern of PM_{10} concentration. We focused mainly on the events characterized by high surface-level PM_{10} concentrations in the city centre, as such situations are the most dangerous and the most important from the point of view of the inhabitants' health. High PM_{10} concentrations are usually linked to low wind speed occurrence, and all PM_{10} concentration vertical profiles were obtained in such conditions due to safety regulations concerning the balloon operation. The flights' height depended on the height at which the wind speed was too high to continue the uplift. Vertical profiles of PM_{10} concentration are also strongly dependent on the thickness of the convective layer. We have distinguished three main types of PM_{10} concentration vertical profiles, with type II being the least numerous and observed sporadically, usually as an intermediate short-term form occurring during the development of either type I or type III. In fact, the air layer inside the valley with constant high PM_{10} values of vertical concentrations described as type I was usually found to be only a lowermost section of type III, but the whole profile could not be observed as the wind speed at higher levels was too high to continue the flight. Type III presents the situation where the impact of the wind shear on the PM_{10} concentration profile is not linked mainly to the change in wind speed, like in type I, but to the change in wind direction in the vertical profile; the wind speed had to remain low within the whole profile as otherwise the balloon flight could not be realized. In type III, the sudden decreases in PM_{10} concentrations above the layer with its high constant values are due to the advection of different air masses on a regional scale. The analysis of PM_{10} profiles from all flights allows us to distinguish three vertical zones of potential air pollution hazard within the valley (about 100 m deep) and the city of Kraków:

1. up to about 60 m a.g.l. – the zone where during periods of low wind speed, air pollution is potentially the highest and the duration of such high levels is the longest, i.e. the zone with the worst aerosanitary conditions;

2. about 60–100 m a.g.l. – transitional zone where the large decrease in PM_{10} levels with height is observed;

3. above 100–120 m a.g.l. – the zone where air quality is significantly better than in zone 1, either due to the increase in the wind speed or due to the wind direction change and advection of different, clean air masses

Further research is planned, including night balloon measurements during high PM_{10} concentration episodes. Additionally, we plan to determine the share of particles of various size fractions in the air pollution with the sensors where the light scattering method is applied.

Appendix A

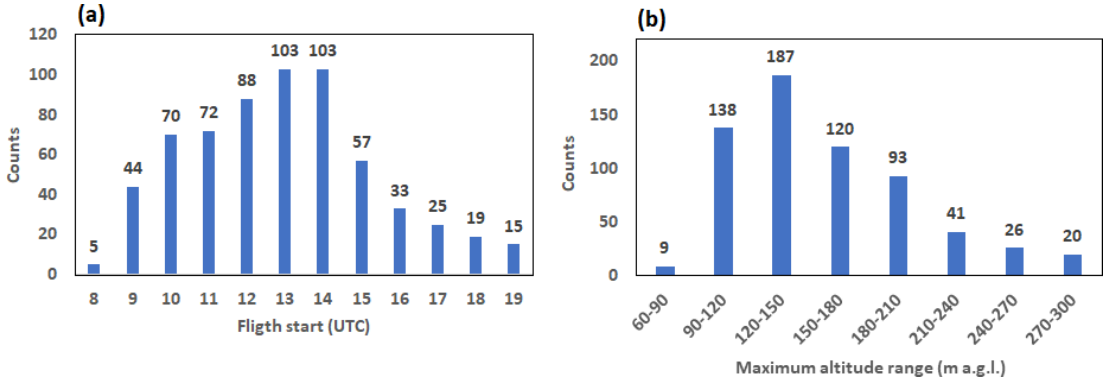


Figure A1. Balloon flight characteristics: **(a)** flight take-off; **(b)** maximum flight altitude.

Table A1. Height of the lowest 87 model vertical levels (v.l.s) up to 3 km of altitude, used in forecast.

No. of v.l.	Height of v.l. (km a.g.l.)	No. of v.l. (cont.)	Height of v.l. (km a.g.l.)
1	0.009	20	0.969
2	0.030	21	1.055
3	0.053	22	1.144
4	0.079	23	1.237
5	0.110	24	1.334
6	0.143	25	1.435
7	0.180	26	1.537
8	0.221	27	1.640
9	0.264	28	1.744
10	0.311	29	1.849
11	0.362	30	1.957
12	0.415	31	2.066
13	0.472	32	2.178
14	0.533	33	2.292
15	0.597	34	2.408
16	0.664	35	2.527
17	0.735	36	2.649
18	0.809	37	2.773
19	0.887	38	2.900

Table A2. Physics schemes used in the AROME CMC 1 km model.

Dynamics	Nonhydrostatic ALADIN (Benard et al., 2010)
Turbulence	Prognostic turbulent kinetic energy (TKE) combined with diagnostic mixing length (Cuxart et al., 2000; Bougeault and Lacarrere, 1989)
Radiation	Longwave Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) radiation scheme, Morcrette shortwave radiation scheme from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
Microphysics	Three-class parameterization (ICE3)
Shallow convection	Pergaud, J., Masson, V., Malardel, S., and Couvreux, F., 2009 (PMMC09) (Pergaud et al., 2009)
Deep convection	–
Clouds	Statistical cloud scheme
Surface scheme	SURFEX (Masson et al., 2013)

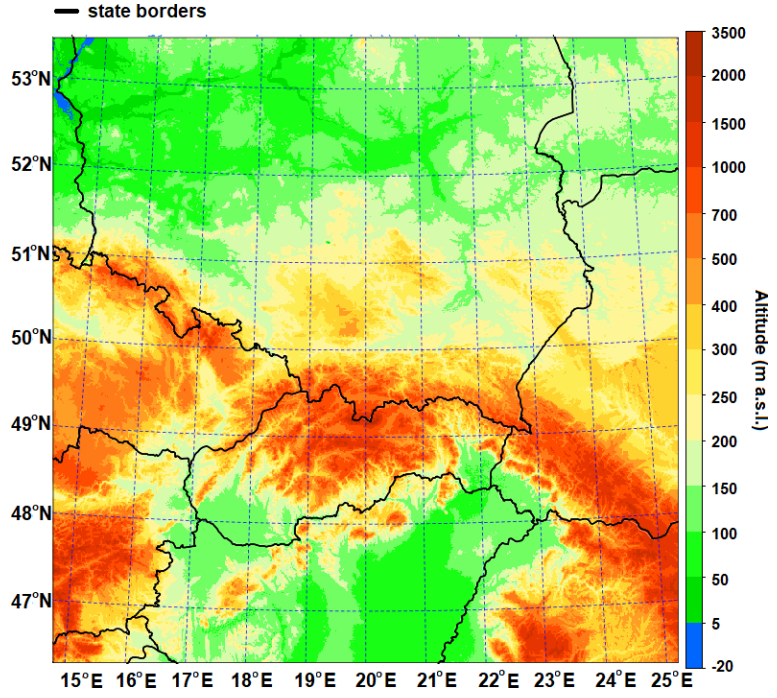


Figure A2. Orography map of the AROME model domain with resolution 1 km × 1 km.

Table A3. Distribution of the temperature gradient between levels 200 and 50 m a.g.l. depending on the wind speed at a height of 50 m a.g.l. for the city centre in two cold seasons 2018–2020 obtained from the AROME model forecast.

		Wind speed range at 50 m a.g.l. ($m\,s^{-1}$)					
		[0;2)	[2;4)	[4;6)	[6;8)	[8;10)	[10;20)
Air temperature gradient range between layers 200 and 50 m a.g.l. (°C/100 m)	[−1.5;−1.0)	371	649	689	437	171	61
	[−1.0;−0.5)	404	965	1065	900	352	171
	[−0.5;0)	244	634	429	145	23	4
	[0;0.5)	306	625	283	41	3	0
	[0.5;1)	322	445	112	6	1	0
	[1;1.5)	303	309	65	4	2	0
	[1.5;2)	193	190	34	7	0	0
	[2;5)	266	316	53	5	2	0
	[5;10)	2	31	0	0	0	0

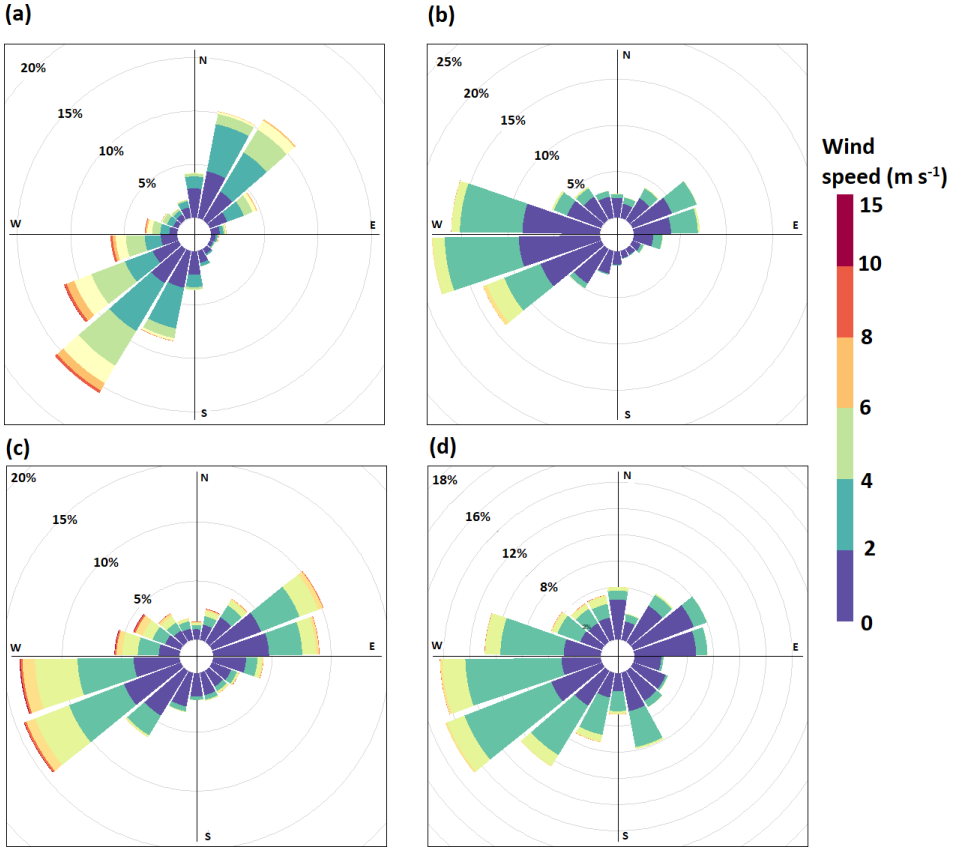


Figure A3. Wind rose for three stations located in the Balice valley **(a)**, Reymonta St. **(b)**, Igołomia **(c)** and one at the nearest hilltop stations Libertów **(d)** for cold seasons 2018–2020.

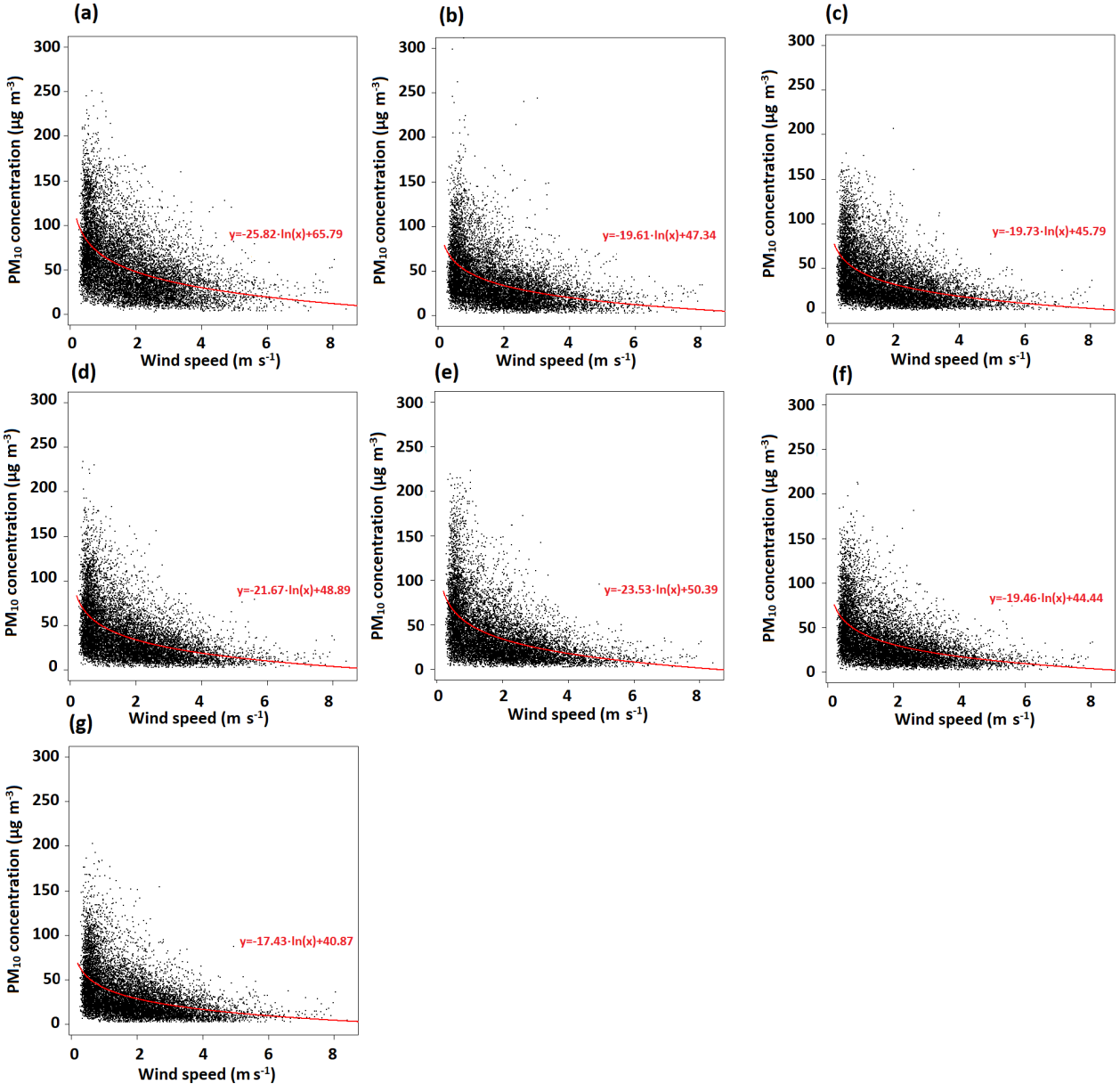


Figure A4. Analysis of hourly PM_{10} concentration at air pollution stations in Kraków compared to wind speed from Reymonta St. station: **(a)** Krasińkiego St., **(b)** Dietla St., **(c)** Bulwarowa St., **(d)** Złoty Róg St., **(e)** Kurdwanów district, **(f)** Piastów district, **(g)** Wadów district. To presented data is fitted the logarithmic curve, and in the lower-right corner is included the curve equation.

Table A4. List of the measurement campaign with the specified PM_{10} profile observed during the selected day.

	Type I	Type II	Type III
No.	27 d (11 d with PM_{10} maximum concentration above 50 µg m^{-3}, marked with text in bold)	8 d	13 d
1			28/11/2019
2	01/12/2019		
3	**05/12/2019**		
4	06/12/2019		
5	09/12/2019		
6	**11/12/2019**		
7			12/12/2019
8	13/12/2019	13/12/2019	13/12/2019
9		17/12/2019	17/12/2019
10	19/12/2019		19/12/2019
11	21/12/2019		
12	22/12/2019		
13	**02/01/2020**	02/01/2020	02/01/2020
14	**03/01/2020**		03/01/2020
15	06/01/2020		
16	07/01/2020		07/01/2020
17	**09/01/2020**		
18	12/01/2020		
19	13/01/2020		
20	**14/01/2020**	14/01/2020	14/01/2020
21	**16/01/2020**		16/01/2020
22	20/01/2020		
23	25/01/2020		
24	**26/01/2020**		
25	**27/01/2020**	27/01/2020	27/01/2020
26		28/01/2020	
27	15/02/2020	15/02/2020	15/02/2020
28	17/02/2020		
29	**20/02/2020**	20/02/2020	20/02/2020
30	01/03/2020		
31	03/03/2020		

Code availability. The model data were obtained with the meteorological model available upon request from the ACCORD consortium: http://www.umr-cnrm.fr/accord/ (ACCORD, 2021). The data were processed with MS Excel and R software (https://www.rdocumentation.org/packages/drc/versions/2.5-12/topics/drm, The R Foundation, 2021).

Data availability. The observational data and some prognostic data administered by the Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute (2021), are available at https://danepubliczne.imgw.pl. Data on PM_{10} concentrations from the measurement points of the National Inspectorate of Environmental Protection (2021) are available at https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives.

Measurement data acquired and administered by the AGH-University of Science and Technology and Jagiellonian University will be made available upon the request to Mirosław Zimnoch and Anita Bokwa, respectively.

Author contributions. All the authors conceptualized the study and worked on gathering data resources. PS and BB worked on model analyses, and PS and AB analyzed the other data. PS, AB, BB, and MZ wrote the original draft. PS prepared all the figures. All the authors reviewed and edited the paper. All the authors have given their approval to the final version of the paper.

Competing interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Disclaimer. Publisher's note: Copernicus Publications remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Acknowledgements. The authors wish to thank Balon Widokowy sp. z o.o. for providing a tethered balloon for the measurement of PM_{10} vertical profiles in Kraków.

Financial support. This research was partly funded by EU Project POWR.03.02.00-00-I004/16 (PS) and a Ministry of Science and Higher Education subsidy, project no. 16.16.220.842- B02.

Review statement. This paper was edited by Roya Bahreini and reviewed by Tadeusz Niedzwiedz and one anonymous referee.

References

ACCORD: A Consortium for COnvection-scale modelling Research and Development, Meteorological model ALADIN, available at: http://www.umr-cnrm.fr/accord, last access: 21 April 2021.

Benard, P., Vivoda, J., Masek, J., Smolikova, P., Yessad, K., Smith, C., Brozkova, R., and Geleyn, J. F.: Dynamical kernel of the Aladin-NH spectral limited-area model: Revised formulation and sensitivity experiments, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 136, 155–169, https://doi.org/10.1002/qj.522, 2010.

Bochenek, B. Sekuła, P., Jerczyński, M., Kolonko, M., Szczęch-Gajewska, M., Woyciechowska, J., and Stachura, G.: ALADIN in Poland, 30th ALADIN Wk and HIRLAM ASM 2020, Ljubljana, Slovenia,available at: http://www.umr-cnrm.fr/aladin/IMG/pdf/poster_poland.pdf (last access: 21 April 2021), 30 March–3 April 2020.

Bokwa, A.: Miejska wyspa ciepła na tle naturalnego zróżnicowania termicznego obszaru położonego we wklęsłej formie terenu (na przykładzie Krakowa) [Urban heat island against the background of natural thermal diversity of the area located in a concave terrain (on the example of Kraków city)], Prace Geograficzne IGiGP UJ, 122, 111–132, 2009.

Bokwa, A.: Wieloletnie zmiany struktury mezoklimatu miasta na przykładzie Krakowa [Long-term changes in the structure mesoclimate of the city on the example of Kraków city], IGiGP UJ, Kraków, 296 pp., 2010.

Bougeault, P. and Lacarrere, P.: Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model, Mon. Weather Rev., 117, 1872–1890, https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1872:pooiti>2.0.co;2, 1989.

Chief Inspectorate of Environmental Protection: Roczna ocena jakości powietrza w województwie Małopolskim. Raport wojewódzki za rok 2019 [Annual assessment of air quality in Lesser Poland region, Report for the year 2019], available at: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/rwms/publications/card/1163 (last access: 10 May 2021), 2020 (in Polish).

Cuxart, J., Bougeault, P., and Redelsperger, J. L.: A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 126, 1–30, https://doi.org/10.1002/qj.49712656202, 2000.

Drechsel, S. and Mayr, G. J.: Objective Forecasting of Foehn Winds for a Subgrid-Scale Alpine Valley, Weather Forecast., 23, 205–218, https://doi.org/10.1175/2007WAF2006021.1, 2008.

EEA: Air quality in Europe – 2020 report, available at: https://www.eea.europa.eu//publications/air-quality-in-europe-2020-report (last access: 10 May 2021), 2020.

Fedorovich, E. and Conzemius, R.: Effects of wind shear on the atmospheric convective boundary layer structure and evolution, Acta Geophys., 56, 114–141, https://doi.org/10.2478/s11600-007-0040-4, 2008.

Ferrero, L., Riccio, A., Ferrini, B. S., D'Angelo, L., Rovelli, G., Casati, M., Angelini, F., Barnaba, F., Gobbi, G. P., Cataldi, M., and Bolzacchini, E.: Satellite AOD conversion into ground PM_{10}, $PM_{2.5}$ and PM_1 over the Po valley (Milan, Italy) exploiting information on aerosol vertical profiles, chemistry, hygroscopicity and meteorology, Atmos. Pollut. Res., 10, 1895–1912, https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.08.003, 2019.

Franchini, M. and Mannucci, P. M.: Short-term effects of air pollution on cardiovascular diseases: outcomes and mechanisms, J. Thromb. Haemost., 5, 2169–2174, https://doi.org/10.1111/j.1538-7836.2007.02750.x, 2007.

Franchini, M. and Mannucci, P. M.: Thrombogenicity and cardiovascular effects of ambient air pollution, Blood, 118, 2405–2412, https://doi.org/10.1182/blood-2011-04-343111, 2011.

Giovannini, L., Ferrero, E., Karl, T., Rotach, M. W., Staquet, C., Castelli, S. T., and Zardi, D.: Atmospheric Pollutant Dispersion over Complex Terrain: Challenges and Needs for Improving Air Quality Measurements and Modeling, Atmosphere, 11, 32, https://doi.org/10.3390/atmos11060646, 2020.

Godłowska, J.: Wpływ warunków meteorologicznych na jakość powietrza w Krakowie. Badania porównawcze i próba podejścia modelowego [Influence of meteorological conditions on air quality in Kraków city. Comparative research and an attempt at a model approach], IMGW-PIB, Warszawa, 2019.

Godłowska, J., Hajto, M. J., and Tomaszewska, A. M.: Spatial analysis of air masses backward trajectories in order to identify distant sources of fine particulate matter emission, Archives of Environmental Protection, 41, 28–35, https://doi.org/10.1515/aep-2015-0015, 2015.

Han, S. Q., Hao, T. Y., Zhang, Y. F., Liu, J. L., Li, P. Y., Cai, Z. Y., Zhang, M., Wang, Q. L., and Zhang, H.: Vertical observation and analysis on rapid formation and evolutionary mechanisms of a prolonged haze episode over central-eastern China, Sci. Total Environ., 616, 135–146, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.278, 2018.

Hess, M.: Klimat Krakowa [Climate of Kraków], Folia Geogr. Ser. Geogr.-Phys., 8, 45–102, 1974.

Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute: Meteorological and hydrological data from the measurement stations in Poland, available at: https://danepubliczne.imgw.pl, last access: 21 April 2021.

Jeong, S. J.: The Impact of Air Pollution on Human Health in Suwon City, Asian Journal of Atmospheric Environment, 7–4, 227–233, https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.4.227, 2013.

Kishcha, P., Starobinets, B., and Alpert, P.: Modelling of foehn-induced extreme local dust pollution in the Dead Sea valley, in: Air Pollution Modeling and its Applications XXV, edited by: Mensink, C. and Kallos, G., Springer Proceedings in Complexity, Springer, Cham, 433–437, https://doi.org/10.1007/978-3-319-57645-9_68, 2017.

Kunin, P., Alpert, P., and Rostkier-Edelstein, D.: Investigation of sea-breeze/foehn in the Dead Sea valley employing high resolution WRF and observations, Atmos. Res., 229, 240–254, https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.06.012, 2019.

Li, J. W. and Han, Z. W.: Aerosol vertical distribution over east China from RIEMS-Chem simulation in comparison with CALIPSO measurements, Atmos. Environ., 143, 177–189, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.045, 2016.

Li, X., Xia, X. G., Xin, Y., Ma, Y. F., Yang, J., Li, J. L., and Yang, X. H.: An examination of boundary layer structure under the influence of the gap winds in Urumqi, China, during air pollution episode in winter, JAPCA J. Air Waste Ma., 62, 26–37, https://doi.org/10.1080/10473289.2011.617628, 2012.

Li, X., Xia, X., Wang, L., Cai, R., Zhao, L., Feng, Z., Ren, Q., and Zhao, K.: The role of foehn in the formation of heavy air pollution events in Urumqi, China, J. Geophys. Res.-Atmos., 120, 5371–5384, https://doi.org/10.1002/2014jd022778, 2015.

Li, X. L., Ma, Y. J., Wei, W., Zhang, Y. H., Liu, N. W., Hong, Y., and Wang, Y.: Vertical Distribution of Particulate Matter and its Relationship with Planetary Boundary Layer Structure in Shenyang, Northeast China, Aerosol Air Qual. Res., 19, 2464–2476, https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.06.0311, 2019.

Liu, C., Huang, J. P., Wang, Y. W., Tao, X. Y., Hu, C., Deng, L. C., Xu, J. P., Xiao, H. W., Luo, L., Xiao, H. Y., and Xiao, W.: Vertical distribution of $PM_{2.5}$ and interactions with the atmospheric boundary layer during the development stage of a heavy haze pollution event, Sci. Total Environ., 704, 135329, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135329, 2020.

Marynowski, L., Łupikasza, E., Dąbrowska-Zapart, K., Małarzewski, Ł., Niedźwiedź, T., and Simoneit, B. R. T.: Seasonal and vertical variability of saccharides and other organic tracers of PM_{10} in relation to weather conditions in an urban environment of Upper Silesia, Poland, Atmos. Environ., 242, 117849, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117849, 2020.

Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voldoire, A.: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, Geosci. Model Dev., 6, 929–960, https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013, 2013.

National Inspectorate of Environmental Protection: Data on air pollution in Poland, available at: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp, last access: 21 April 2021.

Pergaud, J., Masson, V., Malardel, S., and Couvreux, F.: A Parameterization of Dry Thermals and Shallow Cumuli for Mesoscale Numerical Weather Prediction, Bound.-Lay. Meteorol., 132, 83–106, https://doi.org/10.1007/s10546-009-9388-0, 2009.

Renard, J. B., Michoud, V., and Giacomoni, J.: Vertical Profiles of Pollution Particle Concentrations in the Boundary Layer above Paris (France) from the Optical Aerosol Counter LOAC Onboard a Touristic Balloon, Sensors, 20, 1111, https://doi.org/10.3390/s20041111, 2020.

Rodier, Q., Masson, V., Couvreux, F., and Paci, A.: Evaluation of a Buoyancy and Shear Based Mixing Length for a Turbulence Scheme, Front. Earth Sci., 5, 17, https://doi.org/10.3389/feart.2017.00065, 2017.

Samad, A., Vogt, U., Panta, A., and Uprety, D.: Vertical distribution of particulate matter, black carbon and ultra-fine particles in Stuttgart, Germany, Atmos. Pollut. Res., 11, 1441–1450, https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.05.017, 2020.

Sheridan, P. F.: Synoptic-flow interaction with valley cold-air pools and effects on cold-air pool persistence: Influence of valley size and atmospheric stability, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 145, 1636–1659, https://doi.org/10.1002/qj.3517, 2019.

Statista: PM_{10} emissions in the European Union (EU-28) in 2018, available at: https://www.statista.com/statistics/879414/pm10-particulate-matter-emission-contributions-european-union-eu-28/, last access: 10 May 2021.

Statistical Office in Kraków: Statistical yearbook of Kraków 2019, available at: https://krakow.stat.gov.pl/en/publications/statistical-yearbook/statistical-yearbook-of-krakow-2019,4,11.html (last access: 10 May 2021), 2019.

Strbova, K., Raclavska, H., and Bilek, J.: Impact of fugitive sources and meteorological parameters on vertical distribution of particulate matter over the industrial

agglomeration, J. Environ. Manage., 203, 1190–1198, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.001, 2017.

Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolíková, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., and Joly, A.: The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, Geosci. Model Dev., 11, 257–281, https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018, 2018.

The R Foundation: R software, available at: https://www.rdocumentation.org/packages/drc/versions/2.5-12/topics/drm, last access: 21 April 2021.

Thürkow, M., Kirchner, I., Kranenburg, R., Timmermans, R. M. A., and Schaap, M.: A multi-meteorological comparison for episodes of PM_{10} concentrations in the Berlin agglomeration area in Germany with the LOTOS-EUROS CTM, Atmos. Environ., 244, 117946, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117946, 2021.

Trompetter, W. J., Grange, S. K., Davy, P. K., and Ancelet, T.: Vertical and temporal variations of black carbon in New Zealand urban areas during winter, Atmos. Environ., 75, 179–187, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.036, 2013.

Ustrnul, Z.: Infulence of foehn winds on air-temperature and humidity in the Polish Carpathians, Theor. Appl. Climatol., 45, 43–47, https://doi.org/10.1007/bf00865992, 1992.

Vergeiner, J.: South foehn studies and a new foehn classification scheme in the Wipp and Inn valley, PhD thesis, Univ. of Innsbruck, Austria, 2004.

Voivodeship Inspectorate of Environmental Protection: Raport o stanie środowiska w województwie małopolskim w 2017 roku [Report about the state of the environment in the Małopolska Voivodeship in 2017], 2017, Kraków, available at: http://www.krakow.pios.gov.pl/Press/publikacje/raporty/raport17/raport2017.pdf (last access: 10 May 2021), 2017 (in Polish).

Wang, D. X., Stachlewska, I. S., Song, X. Q., Heese, B., and Nemuc, A.: Variability of the Boundary Layer Over an Urban Continental Site Based on 10 Years of Active Remote Sensing Observations in Warsaw, Remote Sensing, 12, 33, https://doi.org/10.3390/rs12020340, 2020.

Wang, H., Sun, Z. B., Li, H. Y., Gao, Y., Wu, J., and Cheng, T. T.: Vertical-distribution Characteristics of Atmospheric Aerosols under Different Thermodynamic Conditions in Beijing, Aerosol Air Qual. Res., 18, 2775–2787, https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0078, 2018.

Xu, Y. W., Zhu, B., Shi, S. S., and Huang, Y.: Two Inversion Layers and Their Impacts on $PM_{2.5}$ Concentration over the Yangtze River Delta, China, J. Appl. Meteorol. Clim., 58, 2349–2362, https://doi.org/10.1175/jamc-d-19-0008.1, 2019.

Zängl, G.: Deep and shallow south foehn in the region of Innsbruck: Typical features and semi-idelized numerical simulations, Meteorol. Atmos. Phys., 83, 237–261, https://doi.org/10.1007/s00703-002-0565-7, 2003.

Zhang, H. L., Wang, Y. G., Hu, J. L., Ying, Q., and Hu, X. M.: Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China, Environ. Res., 140, 242–254, https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.04.004, 2015.

Zhang, K., Wang, D. F., Bian, Q. G., Duan, Y. S., Zhao, M. F., Fei, D. N. A., Xiu, G. L., and Fu, Q. Y.: Tethered balloon-based particle number concentration, and size distribution vertical profiles within the lower troposphere of Shanghai, Atmos. Environ., 154, 141–150, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.025, 2017.

Zhao, S. P., Yu, Y., Qin, D. H., Yin, D. Y., Du, Z. H., Li, J. L., Dong, L. X., He, J. J., and Li, P.: Measurements of submicron particles vertical profiles by means of topographic relief in a typical valley city, China, Atmos. Environ., 199, 102–113, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.035, 2019.

Zhou, S., Wu, L., Guo, J., Chen, W., Wang, X., Zhao, J., Cheng, Y., Huang, Z., Zhang, J., Sun, Y., Fu, P., Jia, S., Tao, J., Chen, Y., and Kuang, J.: Measurement report: Vertical distribution of atmospheric particulate matter within the urban boundary layer in southern China – size-segregated chemical composition and secondary formation through cloud processing and heterogeneous reactions, Atmos. Chem. Phys., 20, 6435–6453, https://doi.org/10.5194/acp-20-6435-2020, 2020.

sustainability

MDPI

Article

Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography

Piotr Sekula [1,2,*], Zbigniew Ustrnul [2,3], Anita Bokwa [3], Bogdan Bochenek [2] and Miroslaw Zimnoch [1]

[1] Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH University of Science and Technology, 30-059 Kraków, Poland; zimnoch@agh.edu.pl
[2] Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute, IMGW-PIB, 01-673 Warszawa, Poland; zbigniew.ustrnul@imgw.pl (Z.U.); bogdan.bochenek@imgw.pl (B.B.)
[3] Institute of Geography and Spatial Management, Jagiellonian University, 30-387 Kraków, Poland; anita.bokwa@uj.edu.pl
* Correspondence: piotr.sekula@fis.agh.edu.pl; Tel.: +48-516-467-918

Abstract: This study presents the assessment of the quantitative influence of atmospheric circulation on the pollutant concentration in the area of Kraków, Southern Poland, for the period 2000–2020. The research has been realized with the application of different statistical parameters, synoptic meteorology tools, the Random Forests machine learning method, and multilinear regression analyses. Another aim of the research was to evaluate the types of atmospheric circulation classification methods used in studies on air pollution dispersion and to assess the possibility of their application in air quality management, including short-term PM_{10} daily forecasts. During the period analyzed, a significant decreasing trend of pollutants' concentrations and varying atmospheric circulation conditions was observed. To understand the relation between PM_{10} concentration and meteorological conditions and their significance, the Random Forests algorithm was applied. Observations from meteorological stations, air quality measurements and ERA-5 reanalysis were used. The meteorological database was used as an input to models that were trained to predict daily PM_{10} concentration and its day-to-day changes. This study made it possible to distinguish the dominant circulation types with the highest probability of occurrence of poor air quality or a significant improvement in air quality conditions. Apart from the parameters whose significant influence on air quality is well established (air temperature and wind speed at the ground and air temperature gradient), the key factor was also the gradient of relative air humidity and wind shear in the lowest troposphere. Partial dependence calculated with the use of the Random Forests model made it possible to better analyze the impact of individual meteorological parameters on the PM_{10} daily concentration. The analysis has shown that, for areas with a diversified topography, it is crucial to use the variability of the atmospheric circulation during the day to better forecast air quality.

Keywords: random forests; atmospheric circulation; air quality; machine learning; complex topography

check for updates

Citation: Sekula, P.; Ustrnul, Z.; Bokwa, A.; Bochenek, B.; Zimnoch, M. Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM_{10} in an Urban Area with Complex Topography. *Sustainability* **2022**, *14*, 3388. https://doi.org/10.3390/su14063388

Academic Editors: Weixin Yang, Guanghui Yuan and Yunpeng Yang

Received: 20 January 2022
Accepted: 10 March 2022
Published: 14 March 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The abundant air pollution with particulate matter (PM) is a serious environmental and social problem in many regions all over the world [1–4]. Exposure to ambient PM concentration with a diameter below 10 µm (PM_{10}) increases the possibility of preterm birth [5], deaths from respiratory disease [6] and also causes lung irritation, cellular damage, coughing asthma, and cardiovascular diseases [7]. High PM concentrations in urbanized areas are the consequence of the interaction of many factors, including anthropogenic and natural sources of air pollution, chemical and physical reactions between primary and secondary pollutants, and dispersion conditions determined by atmospheric circulation types, meteorological conditions, and meso- and microclimatic features of the analyzed area [1,8,9]. Numerous studies confirm that atmospheric circulation is an important factor determining the level of air pollution in the lower troposphere, especially in urbanized

and industrial areas, which are characterized by elevated pollution emissions [3,10–13]. The atmospheric circulation processes contribute not only to the dispersion of pollution but also to its transport over great distances from emission sources [14]. Previous research indicated that the duration of air pollution episodes is mainly influenced by the processes of atmospheric blocking and atmospheric stagnation, which contribute to the accumulation of pollutants near the ground, especially during wintertime periods [3,15,16]. Analyses of future climate change indicate that the occurrence of an increase in air stagnation cases is expected [17,18]. Studies performed for Thessaloniki showed that smog episodes can also occur often under weak flow conditions, with warm air advection, as a consequence of stabilization of the lower troposphere and limited vertical mixing [19]. A similar effect of reducing the available mixing volume caused by warm air advection occurs often in mountain valleys and is linked to foehn occurrence [20,21]. It is worth mentioning that similar local weather conditions can occur under very different rearrangements of the large-scale flow; therefore, there is a need to study the relations between unfavorable local pollutant dispersion conditions and large-scale atmospheric circulation, with the impact of particular environmental features.

The problem of the increased PM_{10} concentration level in the European Union is common for all the nations which are members; in 2018, the daily PM_{10} concentration limit (50 $\mu g \cdot m^{-3}$) was exceeded in numerous cities in Poland, Bulgaria, the Czech Republic, Croatia, Hungary, Italy and Slovenia [22]. In Poland, poor air quality is a problem, especially in southern regions, both in urban agglomerations and many small localities, where the highest number of days with exceedance of the daily limit of PM_{10} concentration on the national scale is noted [23]. The problem of air quality in Southern Poland also concerns the area of Kraków, the second largest city in Poland in terms of the number of inhabitants, where air pollution has been a serious and unsolved environmental and social problem for several decades [24–26]. In the Małopolska region, where Kraków is located, the main source of PM_{10} is the emission from the municipal and housing sector (78.9% of the annual emission), from transportation (5%), and from industry (7.8%). During recent decades, there have been many actions aimed to reduce local emissions of PM_{10} and SO_2 from different sectors. Those actions include liquidation of solid fuel boilers, thermal modernization of buildings, installation of renewable energy sources, modernization of public transport and heating networks or the expansion of bicycle routes. As a result, the air quality in the city has gradually improved, although the PM_{10} daily limits are still exceeded during the cold seasons [23]. In addition, on 1 September 2019, the prohibition of solid fuels usage in individual heating devices in Kraków was introduced, which could partially contribute to the reduction of PM concentration level during the cold season. The atmospheric circulation conditions play a crucial role in determining the air quality in the city, as it is located in the Wisła River valley, in an area of very diversified relief. The properties of planetary boundary layer (PBL) are strongly modified both by the relief and the synoptic situation, and so are the air pollution's dispersion conditions which in turn affect the concentration of pollutants. Studies of fog occurrence for Kraków city for the period from 1965 to 2015 indicated that fog occurred usually on days with non-advective anticyclonic types Ca and Ka or cyclonic and anticyclonic advection from sector S-SW (types SWa and Sc) according to Niedźwiedź classification [27]. This indicated that the majority of winter fogs at Kraków might be related to air pollution from heating during frosty anticyclonic winter weather. Research of long-term variability of the cloud for Kraków has shown that the greatest cloudiness and one of the smallest variabilities are associated with cyclonic situations involving northerly and northeasterly advection. The relationships between the cloudiness and atmospheric circulations were stronger during the cold half of the year than during the warm half, when the radiation factor plays a major role [28]. One of the situations when the influence of atmospheric circulation on air pollution dispersion is well visible is the occurrence of foehn winds, which can worsen or improve the air quality in the city [21].

High weather variability in Poland is associated with frequent movement of low and high-pressure systems [29]. Studies of circulation types for Kraków in the 20th century were

summarized by Z. Ustrnul [30]. Significant variation in the annual incidence of individual circulation types according to the Niedźwiedź classification was found; the most frequent were anticyclonic non-directional types (high-pressure center and anticyclonic wedge or ridge); they constituted 15% of all cases during the year. The second most common types were those with the advection of air masses from the western sector (SW-W-NW) (both during anticyclonic and cyclonic situations), with the frequency reaching a total of 40% during the year. The least frequent were the cyclonic types, with the advection of air from the North and the eastern sector. In the individual seasons (from spring to winter), there was quite large variability in dominant circulation types. A slight positive trend was observed for circulation types with air advection from the West. In the 20th century, circulation types were characterized by high inter-annual frequency variability and the absence of distinct, characteristic periods, with the prevalence of certain types.

Assessment of the role of atmospheric circulation on PM_{10} concentration level during a particular period is highly challenging because many factors including emission level, changeable weather conditions, microclimatic features and chemical and physical processes affect the air quality levels.

Recently, there has been a growing interest in the application of machine learning techniques in statistical analysis [31,32] and forecasting air quality over the wide temporal and spatial scale [33,34]. The most commonly used machine learning tools include Artificial Neural Network [35], Deep Neural Network, Extreme-Gradient Boosting [36] and Random Forests [33]. Machine learning techniques have been successfully applied to assess population exposure to poor air quality in metropolitan areas [33], downscaling of air pollutants at a higher resolution [37], and also meteorological normalization used in air quality trend analysis [31]. Random Forests, which is a machine learning method based on constructing decision trees, is widely used for regression and classification. One of the main advantages of this method, besides its being accurate and straightforward in implementation, is the simple and intuitive way of accessing variables that are important in the process of training the model in complex and nonlinear problems. The research was undertaken in order to assess the quantitative influence of atmospheric circulation on the pollutant concentration in the area of Kraków, and to compare the results for the study period mentioned with the research from earlier decades. The research was also aimed to evaluate two main groups of the classification methods of atmospheric circulation types' used in studies on air pollution dispersion (described in Section 2.5), and to assess the possibility of their application in air quality management. In our study, we were focused more on the interpretation of the importance of variables by the Random Forests technique than predictions of the model itself. Kraków is an adequate study area for such considerations as, on one hand, it is located in diversified environmental conditions, and on the other hand, relatively long series of air quality measurements are available. Two different classifications of atmospheric circulation were used in the present study: a manual classification by Niedźwiedź [29] and an automatic classification by Lityński [38,39]; those two different classifications were used with the aim of minimizing the risk of misinterpretation of the results, and both classification methods were widely used by different groups of researchers in studies of atmospheric types over Central Europe [14,40,41]. Previous studies concerning the influence of atmospheric circulation on air quality in Krakow, with the application of Niedźwiedź classification, have been summarized in the monograph by J. Godłowska [42]. The research indicated that during air masses advection from S-SW sector and non-directional circulation types (high-pressure center and anticyclonic wedge or ridge), wind speed near the ground was reduced, which in consequence could lead to the occurrence of a high-level PM_{10} concentration during the cold season. Studies of atmospheric stability in Kraków using SODAR for the period 1994–1999 showed that, for types with air masses advection from a direction between 135° and 225°, the anticyclonic wedge and the high-pressure center, the duration of elevated thermal inversions in the cold season was the longest.

Understanding the relationship between the pollutants' concentration and the atmospheric circulation, at the synoptic and local scale, is crucial for forecasting air pollution episodes and minimizing the negative impact of air pollution on the health of city residents and on the condition of the natural environment.

2. Material and Methods

Data used in the present study come from different sources and cover the period October 2000–September 2020 (additionally, the period October 2021–December 2021 was selected for operational tests of the predictive model). Data analyses were realized for two sub-periods: cold half-year (October–March) and warm half-year (April–September), owing to significant differences in air pollution emissions and concentrations, which have been observed in Kraków in those sub-periods. First, data sets are described, and their basic statistical features are shown, then the methods combining data from different data sets are presented. Air quality in Kraków was characterized with data on PM_{10} as the allowed concentrations of that pollutant are exceeded much more frequently than the concentrations of other pollutants. The authors are aware that the division of the year proposed above is only one of the options available, as, in particular years, the frequency of circulation types and meteorological conditions may change significantly; however, such a division was also used in other climatological studies [43,44].

2.1. Study Area

Kraków is the second largest city in Poland, located in the Małopolska (Lesser Poland) region, with an area of 326.8 km^2 and the number of inhabitants reaching almost 800,000 [45]. The Kraków agglomeration consists of the city itself and the highly populated towns and villages which surround it, and the total number of inhabitants is estimated to exceed 1 million. The city's area belongs to three different geographical regions and geological structures presented at Figure 1, i.e., the Polish Uplands, the Western Carpathians, and the basins of the Carpathian Foredeep in between. The central part of the city is located in the Wisła River valley, at an altitude of about 200 m a.s.l. In the western part of Kraków, the valley is as narrow as 1 km; however, in the eastern part of the city, the valley widens to about 10 km and there is a system of river terraces (Figure 1b). The hilltops bordering the city to the north and the south reach about 100 m above the river valley floor, similar to the hilltops in the western part of the valley which means that the city is located in a semi-concave landform (open only to the east) and sheltered from the prevailing western winds (Figure 1b). The local scale processes linked to the impact of relief include, for example, katabatic flows, cold air pool formation, frequent air temperature inversions, much lower wind speed in the valley floor than at the hilltops [46]. All the factors mentioned contribute to the poor natural ventilation of the city, and one of its consequences is the occurrence of high PM_{10} concentration levels, especially during heating seasons.

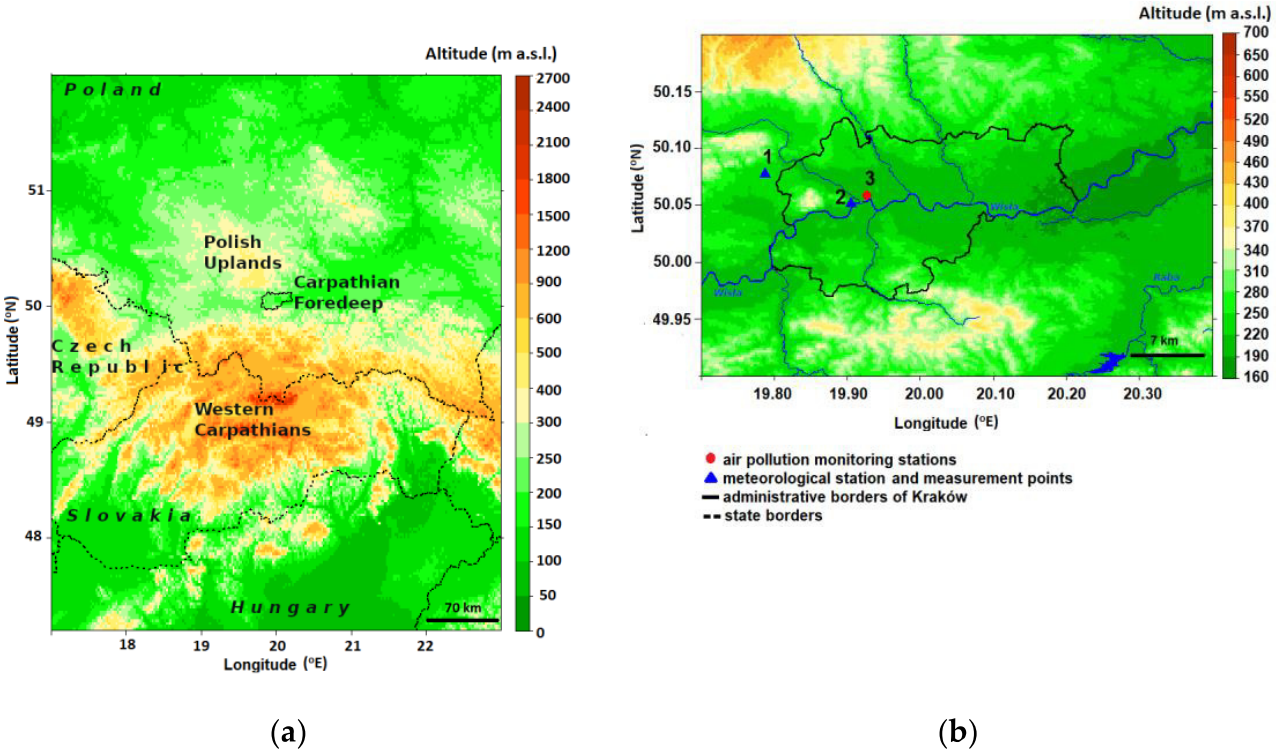


Figure 1. Location of the region studied: (**a**). in Central Europe, (**b**). at the junction of the Wisła River valley, Polish Uplands and the Western Carpathian Foothills. Numbers included in Figure 1b are described in Table 1.

Table 1. Location of meteorological and air quality stations in Kraków and its vicinities, and elements used in the study.

No.	Station	Lat N	Lon E	Altitude (m a.s.l.)	Manager of the Station	Landform	Parameters	Data Availability Period	Data Resolution
1	Balice	50.08	19.80	237	IMWM-NRI	Valley bottom	V, D, T, RH, C, PP	1960-currently	1 h, 3 h and 1 day
2	TV mast: 2 m a.g.l. 100 m a.g.l.	50.05	19.90	222 272 322	JU	Valley bottom	T	1.01.2010-currently	3 h
3	Krasińskiego St	50.06	19.93	207	NIEP	Valley bottom	PM_{10}	1.01.2000-currently	1 day

Explanations: V—wind speed ($m \cdot s^{-1}$), D—wind direction, T—air temperature (°C), RH—relative humidity (%), C—cloudiness (oktas), PP—atmospheric precipitation (mm), PM_{10}—mean daily PM_{10} concentration ($\mu g \cdot m^{-3}$).

2.2. Instrumental Meteorological Data

Weather data for Kraków were obtained from the meteorological station located in the Wisła River valley (Balice). The station is administered by the Institute of Meteorology and Water Management—National Research Institute (IMWM-NRI). Measurements of air temperature in the vertical profile of the valley were performed by the Jagiellonian University (JU) at the television mast of EMITEL company, located in the western part of the city (Bokwa, 2010). Measurements of meteorological parameters at the point administered by JU and IMWM-NRI were realized in accordance with WMO guidelines [47]. The location of measurement points and details on weather data used in the study are included in Figure 1 and Table 1. The measurements from the TV mast were crucial in the analysis of ground thermal stratification in the Wisła River valley at the local scale. These measurements were not available for the whole study period.

2.3. Atmospheric Reanalysis

In order to analyze the stratification of the lower troposphere for the period October 2000–September 2020, ERA5 reanalysis provided by European Center for Medium Range

Weather Forecasts [48] was used in this study. Air temperature, relative humidity and wind components data from pressure levels 975, 925 and 850 hPa were applied, at 00:00, 6:00, 12:00 and 18:00 UTC, respectively, for grid point representing Kraków (geographical coordinates 50° N and 20° E). The pressure level 1000 hPa was not used in the analysis owing to the fact that, in some cases, this level could be below the ground level.

2.4. Air Quality Measurements

Data on PM_{10} concentrations in Kraków come from the databases of the National Inspectorate of Environmental Protection (NIEP) [49]. The methodology for measuring PM_{10} concentration was realized in accordance with the guidelines of the European Parliament and of the Council included in Directive 2008/50/EC [50]. Daily data from the measurement point located in Krasińskiego St. for the period October 2000–September 2020 were used (Table 1). The measurement point is located in a street canyon, in the city center, at the bottom of the Wisła River valley, with a very busy municipal transportation route and intensive traffic. A comparison of mean daily PM_{10} concentration from Krasińskiego St. and two other air quality stations: Kurdwanów district and Bulwarowa St., located in the eastern and northern part of the city, for the common period 2010–2020 (3556 days), confirmed a high correlation between measurements from all those points. For the analysis of daily PM_{10} concentration the Pearson correlation coefficient was used, for three pairs of stations: Krasińskiego–Bulwarowa, Krasińskiego–Kurdwanów and Bulwarowa–Kurdwanów, where correlation coefficients were close to 0.93. The station in Krasińskiego St. is characterized by an increased level of daily PM_{10} concentration in comparison with other measurement points in Kraków during the year.

The period October 2000–September 2020 is suitable for showing the seasonal, long-term variability of the pollutants' concentration resulting from changes in the level of air pollutants emissions as well as fluctuations in circulation conditions.

Appendix A summarized air quality measurements used in this study, with special focus on the variability of PM_{10} daily concentration in cold and warm half-years, number of days with exceedance of selected concentration limits and deseasonalized trend observed in the multiyear period.

2.5. Atmospheric Circulation Classification

According to the suggestions of many authors [29,51–53], more than one classification of circulation types was used. Owing to the methodological approach, two classifications of circulation types have been chosen. Each of them represents a different group of atmospheric circulation classifications. Therefore, they differ essentially in many features and, above all, in the method of distinguishing individual types. The first classification included is the traditional, manual approach often used in Poland and developed by T. Niedźwiedź [29]. The second one is an objective classification according to Lityński's original concept [38]. Taking into account these 2 different classifications allowed for a more objective look at the impact of circulation and its changes in the analyzed 20-year period on the state of the atmosphere, including the concentration of pollution in the study area.

Classification by Lityński is based on an automatic approach, which may be considered, in simplified terms, as the objective one. In the literal sense, it is not like that, because it is based on arbitrarily imposed criteria; however, this approach is different from the manual and obviously subjective one proposed by Niedźwiedź. Both classifications are based on different input data sources. The division of Lityński uses numerical data (currently grid data), while the division of Niedźwiedź is based on the assessment of synoptic daily maps (charts). The spatial scale is also different in both classifications. The Niedźwiedź classification is a typical mesoscale one, while the Lityński classification characterizes the circulation on a larger scale. To sum up, both classifications have a different synoptic approach, and their application seems advisable.

Detailed information circulation classification characteristics for both approaches with analysis of multiyear trends for individual atmospheric patterns are summarized in Appendix B.

2.6. Atmospheric Stratification Determination

Data on air temperature and relative humidity provided by the European Center for Medium Range Weather Forecasts for atmospheric pressure levels 975, 925 and 850 hPa representing the point with geographical coordinates 50° N and 20° E were used to determine the presence of low (layer 975–925 hPa) or upper (925–850 hPa) inversion layers. The atmospheric stratification gradient was determined as the difference between the two nearest levels (layers 975–925 hPa and 925–850 hPa). Lower limits for the occurrence of air temperature inversion and air relative humidity inversion in the lower troposphere were set to 0 °C and 10%, respectively.

Additionally, with the aim of analyzing the near-ground thermal inversion layer, the measurements in the vertical profile (2 m to 100 m a.g.l.) obtained from the TV mast are used. The period of the day has been divided into two sub-periods of equal length:

- daytime period: from 6 to 17 UTC;
- nighttime period: from 18 to 5 UTC the next day.

The near-ground thermal gradient was calculated as the difference between lower and upper measurement points. The lower limit of the occurrence of thermal inversion between two levels of the TV mast was set equal to +1 °C. The condition was checked for each time period separately, and then summed up for day and night periods for individual days. Data for the TV mast station were available for the period from January 2010 to September 2020.

2.7. Data Analysis

The data set created to assess the influence of meteorological conditions on air quality includes:

- Meteorological observations from Balice synoptic station with 6-h resolution: air temperature, relative air humidity, wind speed and direction, cloudiness, the 6-h sum of atmospheric precipitation;
- air temperature, relative air humidity and wind speed and direction at three pressure levels obtained from ERA5 reanalysis (975, 925 and 850 hPa); differences between neighboring pressure levels of air temperature, relative air humidity, wind speed and wind direction (layers 975–925 hPa and 925–850 hPa) with 6-h resolution;
- mean daily PM_{10} concentration from previous day;
- difference of mean daily PM_{10} concentration between current day and previous day (used for determining PM_{10} decrease);
- day of week;
- atmospheric circulation types on a certain day according to Niedźwiedź and Lityński classification.

With the aim of investigating the relation between PM_{10} concentration and meteorological conditions, the Random Forests algorithm was used, which is an ensemble machine learning method based on constructing many decision trees. This method combines a large number of small decision trees into new predictors, and therefore is able to make a better prediction. By using this method, it is possible to assess which variables have the highest importance in machine learning. In our study, we compared results from multilinear regression with stepwise selection and the Random Forests method. Studies of variable selection for Random Forests models were conducted with use of the Boruta method available in package Pomona on GitHub repository [54,55]. In order to provide the best of hyperparametric values, repeated leave-group-out cross-validation (LGOCV) was used. The resampling method LGOCV was available in the function trainControl in the caret R package. For the multilinear regression model, the stepwise Akaike Information Criterion (AIC) algorithm was used [56], which is available in the function stepAIC in the MASS R

package. The meteorological database from Balice station and ERA-5 reanalysis and PM_{10} daily concentration at the previous day were used as an input to models that were trained to predict daily PM_{10} concentration and its day-to-day changes on a randomly sampled 75% of data. The remaining 25% was used to validate models. Two sets of input data, which differ in the time resolution of meteorological parameters listed above (6-h resolution data and daily averages obtained from 6-h resolution data), were used in the studies. This analysis aimed to answer the question of whether the increase of the temporal resolution of parameters describing weather conditions during the day would improve model accuracy. The hyperparameters tuning and selection of crucial variables was done separately for each Random Forests and multilinear regression model. The plots with variable importance are presented, for clarity only, for the most important parameters. With the aim of determining the partial relationship between daily averages of individual meteorological parameters and the level of the daily PM_{10} concentration, the optimized Random Forests model was used. Partial dependencies were obtained with use of the function partial_dependence available in the open-source package edarf in the R environment.

In both half-years, days with the worst air quality and days with a significant improvement of air quality in relation to the previous day were selected. That choice of this selection of analyses is due to the fact that such situations are important in terms of the inhabitants' health protection, but also for various environmental effects. In both groups of the cases selected, very high concentrations of PM_{10} occur, so the analyses should support the assessment of the atmospheric circulation and weather conditions which contribute to such situations. In the second group of cases, the analyses should additionally support the assessment of the conditions favorable for a sudden decrease of the PM_{10} concentrations, due to the change of the dispersion conditions. Owing to the fact that the distribution of PM_{10} daily concentration differs significantly between both half-years (see Figure 2), some criteria of the cases delimitation in both sub-periods differ, too.

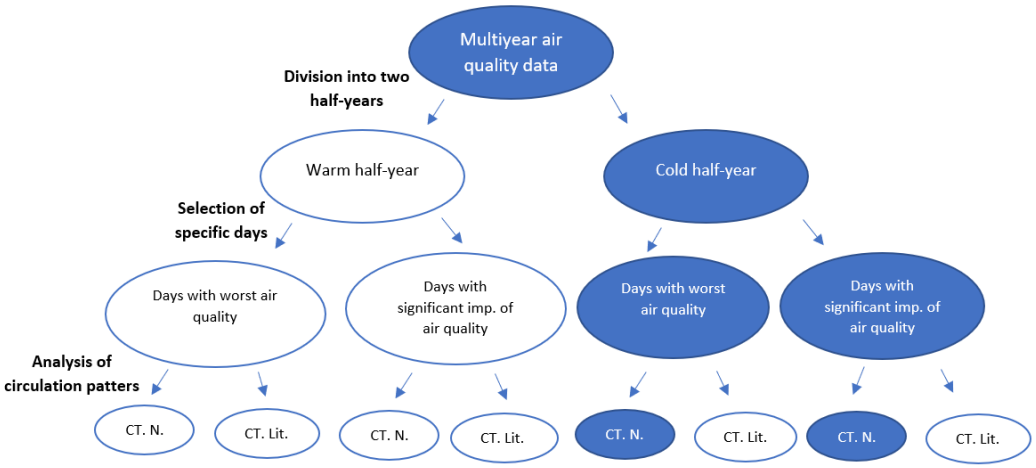


Figure 2. Procedure of data and analyses selection; elements with blue background represent research steps described in detail in the article. Explanation: CT. N.—atmospheric circulation types by Niedźwiedź; CT. Lit—atmospheric circulation types by Lityński.

The criteria used to distinguish the two groups of days are the following:

- Group 1: days with high PM_{10} concentration against the background of a particular half-year, which meet two conditions: daily PM_{10} concentration is greater than the upper quartile in the selected half-year (see Table A3) and greater than 50 or 40 $\mu g \cdot m^{-3}$ during cold or warm half-year, respectively. The number of days meeting the above conditions is 842 and 837 for cold and warm half-years, respectively.
- Group 2: days characterized by significant PM_{10} concentration decrease in relation to the previous day, which meet three conditions: the decrease is greater than 25% of the concentration on the previous day, the decrease of PM_{10} daily concentration is

equal at least to 20 or 10 $\mu g \cdot m^{-3}$, in cold or warm half-years, respectively, and days assigned to Group 1 are omitted. The number of days meeting the above conditions is 634 and 461 for cold and warm half-years, respectively.

With the aim of better understanding the role of atmospheric circulation and local topography on the weather conditions over the analyzed region the distribution of the daily meteorological parameters from Balice station and vertical profiles from ERA5 reanalysis have been analyzed for individual circulation types for cold and half-years separately.

In the next step, the types of atmospheric circulation were assigned to the days from both groups and half-years), and then weather conditions for particular atmospheric circulation types were analyzed. The meteorological parameters used in this part of the study were selected based on the parameter importance obtained from the machine learning analyses. Data used in the study include wind speed and air temperature near the ground, atmospheric precipitation, vertical gradient of air temperature and relative air humidity, air temperature, relative humidity and wind speed at pressure level 925 hPa and wind speed difference in layer between 925 and 975 hPa. The aim of that step was to see whether there are significant differences in weather conditions during a certain atmospheric circulation type occurring in the two groups of days described above and the remaining days.

Selection of half-year for further analyses.

Comprehensive research for both half-years indicated that the problem of air quality in the warm half-year is insignificant compared to the cold half-year. In the analyzed multi-year period, an average share of days with exceedance of the PM_{10} daily limit in warm half-year was twice as low as in the cold half-year (34% and 67%, respectively). Furthermore, during the period 2016–2020, the average share of days with exceedance of the PM_{10} daily limit in the warm half-year was equal to 14%, with the lowest values in 2017 and 2020 (8% and 2%, respectively). Days with exceedance of daily PM_{10} limit occurred mostly in April and September (early spring and early autumn periods), while in June-July such cases almost did not occur. Therefore, only the cold half-year has been described in detail in this paper.

Selection of atmospheric circulation classification.

The analysis of the influence of atmospheric circulation on the dispersion conditions and the level of PM_{10} concentration was performed for both circulation type classifications (Lityński and Niedźwiedź classifications) for two half-years with particular attention to selected days with the worst air quality and a significant improvement in air quality.

The aim of the research was to determine which circulation type classification better separates the circulation patterns that negatively affect dispersion conditions from the patterns, from those which positively influence the air quality in an urbanized valley. The analysis with the use of both circulation classifications for both half-years and for both groups showed similar dependencies. In order to determine which type of circulation classification is more appropriate for the analysis of air quality in the cold half-year, the Gini coefficient [57] was determined for Niedźwiedź classification (11 and 21 types) and for Lityński classification (27 types). The Gini coefficient has been widely used to measure the inequality among values of a frequency distribution [58,59], the value ranges from 0 to 1. The zero value of the Gini coefficient indicates full uniformity of the distribution. The zero value of the Gini coefficient indicates the perfect equality of the distribution, while the greater the Gini coefficient refers to the greater spread of the distribution. The value of the Gini coefficient was similar for the two Niedźwiedź classifications (0.346 and 0.347), a slightly lower value was obtained for the Lityński classification, equal to 0.338. Owing to this fact and for the better clarity of the article, the paper presents only the analysis for 11 types of Niedźwiedź classification. Similar studies concerning the relation between circulation type classifications and smog days, using Gini coefficient, were conducted in COST Action 733 for air pollution in winter in Polish urban areas [12]. The analysis of the Gini coefficient for individual cold half-years also showed that the variability variation in air quality for individual types of circulation was greater for the types of Niedźwiedź classification (11 and 21 types) than for the Lityński classification (maximum difference was

equal 0.037 and average difference equal to 0.010). An additional argument in favor of the selected circulation classification by Niedźwiedź is that it was designed to be most suitable for Southern Poland, while the Lityński circulation classification describes the atmospheric circulation in Central Europe [38].

Schematic representation of the scientific analysis has been presented in Figure 2.

3. Results

The analysis was focused on two groups of days determined for cold half-year:

- Group 1—days with the highest daily concentration; of PM_{10};
- Group 2—days with the greatest decrease day by day in the concentration of PM_{10}.

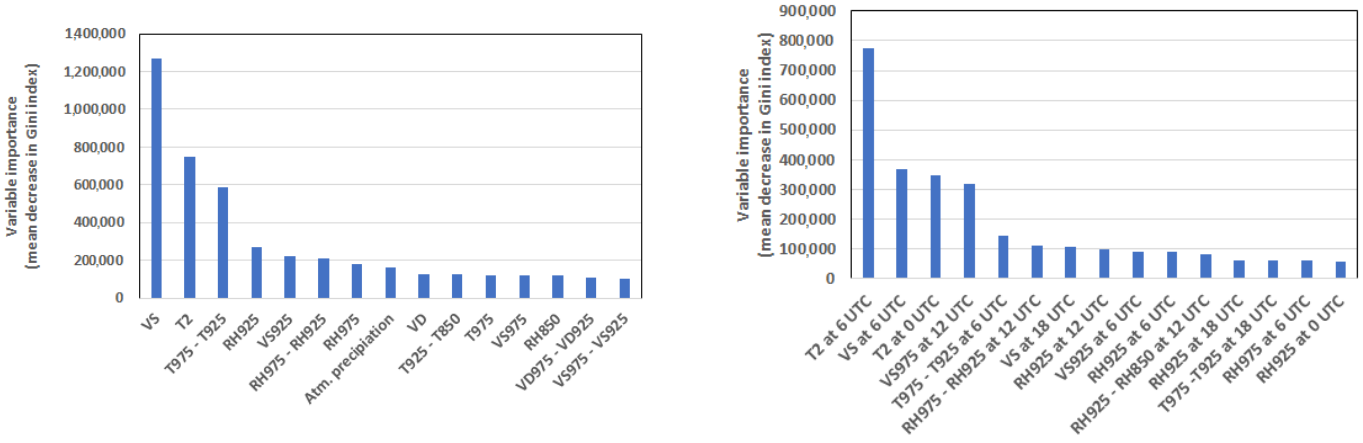
For both groups of days, the most frequent circulation types according to the Niedźwiedź classification were selected. Weather conditions during days from both groups were compared with remaining days for selected atmospheric circulation patterns.

With the aim of estimating the impact of individual meteorological parameters on air quality, the results of ensemble machine learning methods were used.

All the analyses of the influence of atmospheric circulation on air quality in the light of PM_{10} confirmed the significant role of circulation types. In the last 20 years, despite a significant reduction in emissions, which is the result of administrative pro-ecological activity, there are still serious smog episodes, when the average daily concentration of PM_{10} in the cold half-year period may exceed 100 $\mu g \cdot m^{-3}$. This, of course, applies to non-advective circulation types, although surprisingly high dust concentrations may also occur during the types from southerly advection. The results of the performed analyses, i.e., circulation type vs. PM_{10} concentration is included in the Appendix D.

Random Forests Analyses

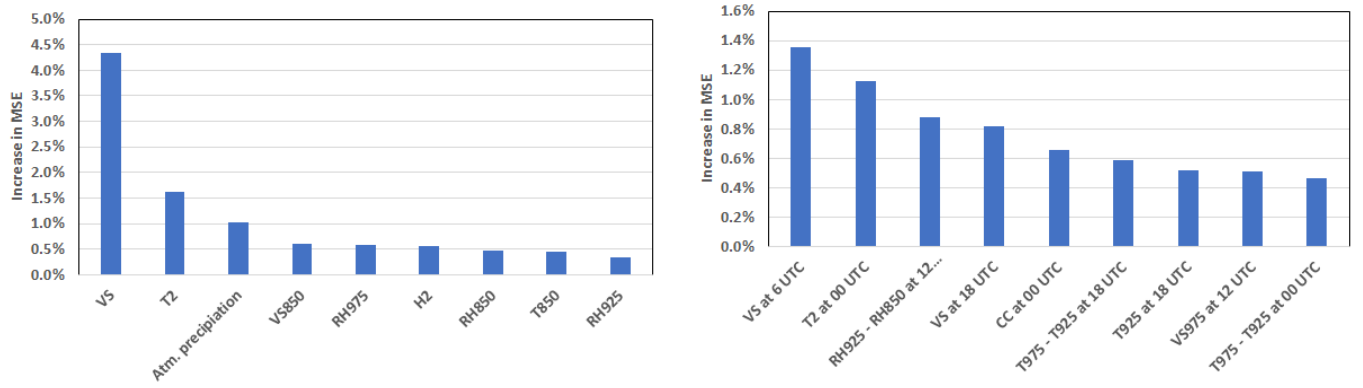
At the first step the Random Forests and multilinear regression models were built to predict daily PM_{10} concentration with the use of two different meteorological data resolution sets (6-h resolution and daily averages from 6-h resolution data). The Boruta variable selection method was applied for Random Forests models, and it showed that for the model which uses daily averages, the following parameters: daily cloudiness, wind direction changes in the layer between 925 hPa and 850 hPa and wind direction at 850 hPa were unnecessary. For the Random Forests model which uses meteorological parameters with 6-h resolution 28 of 111 selected variables were rejected by the Boruta method, including both circulation types, wind direction at 850 hPa, wind direction and wind speed change in layer between 925 and 850 hPa, relative air humidity at 2 m a.g.l. at 0, 12 and 18 UTC, wind direction at 925 hPa at 0, 6 and 18 UTC and day of week. The results of both Random Forests models were similar, the average value of mean absolute error (MAE) and root-mean square error (RMSE) for both models were equal 19.6 $\mu g \cdot m^{-3}$ and 26.9 $\mu g \cdot m^{-3}$, respectively. The Random Forests models analysis for specific measured PM_{10} concentration ranges 0–50 (25% testing data), 50–100 (40% testing data) and 100–200 (27% testing data) indicated that the RMSE error was equal respectively to 18, 20, and 32 $\mu g \cdot m^{-3}$. The group of observations with PM_{10} concentration exceeding 200 $\mu g \cdot m^{-3}$ was relatively small (5% testing data), and the RMSE for this group was the largest equal to 42 $\mu g \cdot m^{-3}$. An example plot presenting comparison observations with the Random Forests model forecast is included in Appendix C, Figure A6a). In Figure 3 the most important parameters affecting daily PM_{10} concentration are presented. Air quality on the previous day (PM_{10} daily concentration) was the most important parameter for both models. For the sake of clarity of Figure 3, this parameter was not presented in the chart owing to the large differences between the GINI Index for this parameter and the next one. The analysis of variable importance for both Random Forests models confirmed the similarity of the results. Apart from the parameters whose significant influence on air quality is well established (air temperature and wind speed at the ground and air temperature gradient), the key factor was also the gradient of relative air humidity and wind shear in the lowest troposphere (layer between 975 and 925 hPa; Figure 3a).



(**a**) (**b**)

Figure 3. Variable importance plots for Random Forests models trained to predict PM_{10} daily levels in Krasińskiego air quality station with use (**a**) daily averages (**b**) 6-h resolution of meteorological parameters in cold half-years. Explanation: T2—temperature at 2 m a.g.l.; VS—wind speed at 10 m a.g.l.; VD—wind direction at 10 m a.g.l.; RH975, RH925 and RH850—relative air humidity at 975, 925 and 850 hPa, respectively; T975, T925 and T850—air temperature at 975, 925 and 850 hPa; VS975 and VS925—wind speed at 975 and 925 hPa; VD975 and VD925—wind direction at 975 and 925 hPa.

With the aim of analyzing the significance of individual parameters concerning the model accuracy, tests by removing a single variable from the model were performed (Figure 4). These studies also confirmed that the most important parameter was the PM_{10} concentration level on the previous day. The lack of this variable in the model affected on MAE increased by almost 25% compared to the forecast results where all parameters were included.



(**a**) (**b**)

Figure 4. Increase in mean square error (MSE) of predicted PM_{10} daily levels by Random Forests models with use (**a**) daily averages (**b**) 6-h resolution of meteorological parameters in cold half-years. Explanation: T2—temperature at 2 m a.g.l.; VS—wind speed at 10 m a.g.l.; CC—cloudiness; RH975, RH925 and RH850—relative air humidity at 975, 925 and 850 hPa, respectively; T975, T925 and T850—air temperature at 975, 925 and 850 hPa; VS975—wind speed at 975 hPa.

Studies of multilinear regression for both data groups were done for the same teaching and testing sets. Variable criterion with use of Akaike algorithm showed that for data with daily averages of meteorological parameters, six variables were excluded in the analysis: relative air humidity at 2 m a.g.l., wind speed at three pressure levels (975 hPa, 925 hPa and 850 hPa), relative humidity gradient in layer between 925 and 850 hPa and relative

humidity at 850 hPa. The results obtained for multilinear models were slightly worse for the Random Forests model which used the same data set, RMSE and MAE for multilinear models were equal to 29 $\mu g \cdot m^{-3}$ and 21.4 $\mu g \cdot m^{-3}$, respectively. A comparison of results obtained from four Random Forests and multilinear regression models is presented in the Taylor diagram in Figure 5. The analysis of results presented at Figure 5 indicates that there are slight differences between the two model groups in Pearson correlation coefficient and standard deviation of predicted values. In the case of multilinear regression and meteorological parameters with 6-h resolution, the results of the multilinear model were close to the previous multilinear model. The application of the Akaike method to select the best parameters for the multilinear model caused a reduction of the parameters from 111 to 44 variables. The selection of crucial variables did not improve model performance, RMSE and MAE were equal to 29 $\mu g \cdot m^{-3}$ and 21.4 $\mu g \cdot m^{-3}$, respectively. In this case the application of the Random Forests model for numerous variables showed better results than multilinear regression. The comparison of observations with the multilinear model forecast with the use of daily averages of meteorological parameters presented at Figure A6b) in Appendix C indicates that the model underestimates PM_{10} daily concentration for values below 25 $\mu g \cdot m^{-3}$. In contrast, Random Forests models more often overestimate PM_{10} concentration than multilinear regression in the range between 0 and 50 $\mu g \cdot m^{-3}$ (Figure A7 in Appendix C).

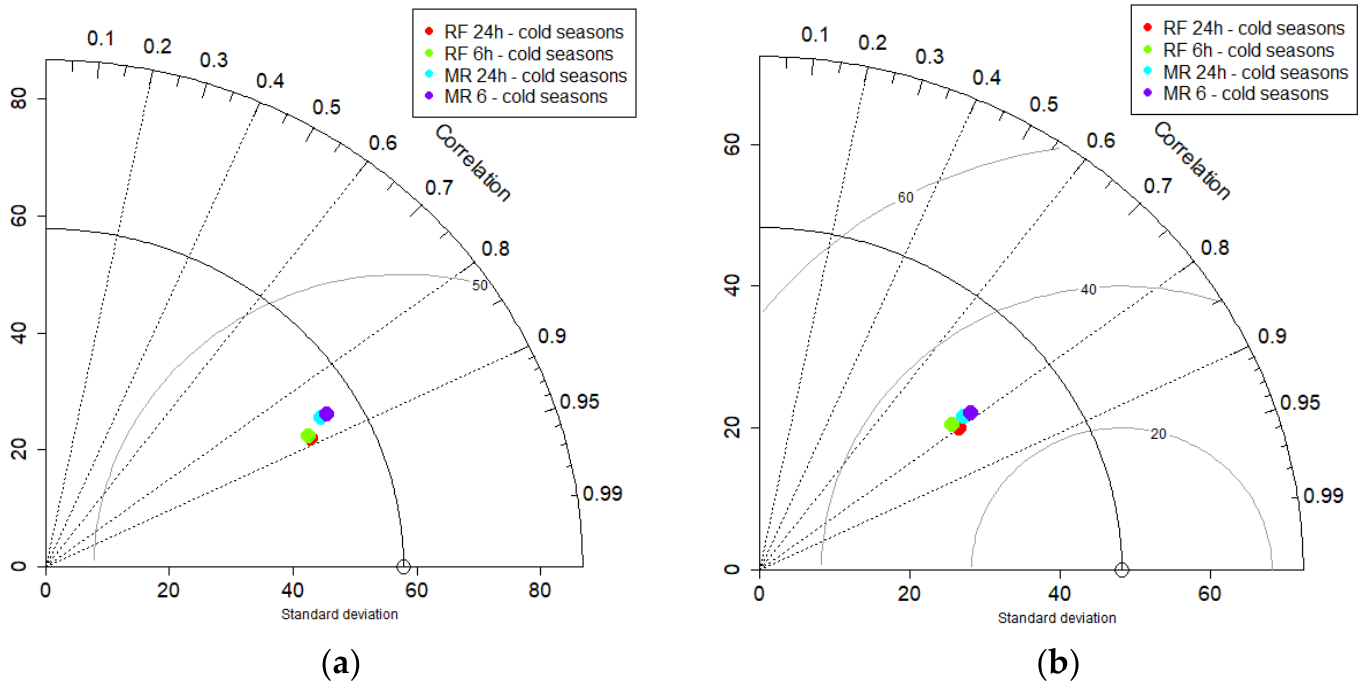
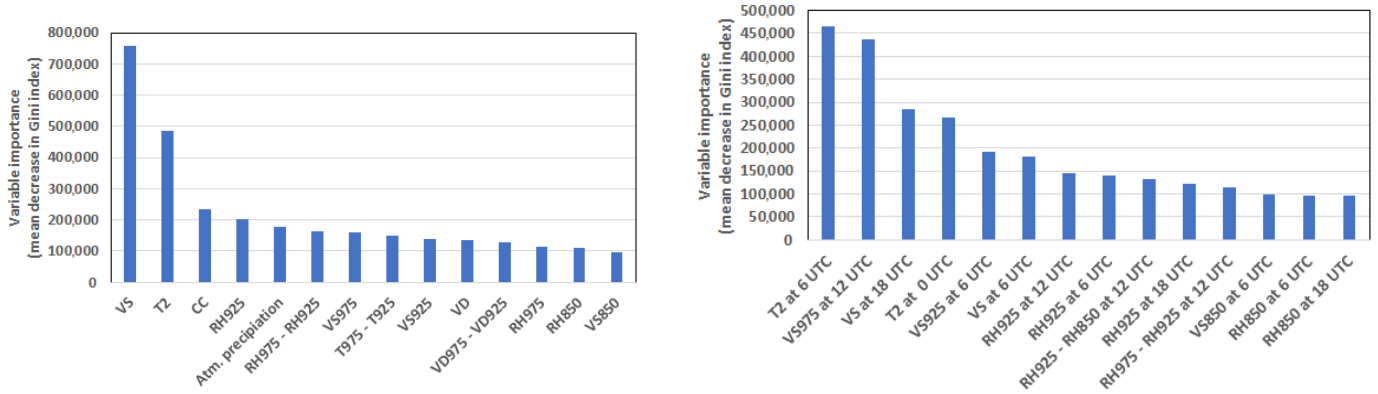


Figure 5. Taylor diagram for (**a**) predicted PM10 daily concentration and (**b**) day-to-day PM_{10} daily concentration changes for Random Forests (RF) and multilinear regression models (MR) in cold half-years.

In the second part, Random Forests and multilinear regression models were used to predict day-to-day changes of PM_{10} daily concentration. The same database as presented above was used in these studies, including measurements from the Balice station, ERA-5 reanalysis, two circulation types, day of the week, month, day of the year and PM_{10} daily concentration at the previous day. The analysis of Random Forests and multilinear regression models showed similar results, the values of RMSE and MAE were equal on average to 30 $\mu g \cdot m^{-3}$ and 20 $\mu g \cdot m^{-3}$, respectively. For this case hyperparameter tuning and parameter selection for Random Forests models did not significantly improve model accuracy (change of RMSE and MAE did not exceed 3%). It is worth to mentioning

that variable selection with the use of the Boruta method for the Random Forests model which uses data with 6-h resolution were reduced from 110 to 27 variables. An example plot presenting comparison observations of day-to-day changes with the Random Forests model forecast is included in Appendix C, Figure A8b). In the case of a multilinear linear regression model with the same data set, stepwise the Akaike method selected 46 variables from 110 available. Verification of four models presented with the use of a Taylor diagram in Figure 6b indicates that the differences between them are negligible; however, comparison of density curves for Random Forests and multilinear regression with observations indicates that also the Random Forests model often predicts day-to-day PM_{10} concentration changes in a range between −10 and 25 $\mu g \cdot m^{-3}$ (Figure A9 in Appendix C). For both models groups the most important parameter was the PM_{10} concentration level on the previous day. Figure 6 presents parameters importance for Random Forests models affecting day-to-day PM_{10} concentration changes.



(**a**) (**b**)

Figure 6. Variable importance plots for Random Forests models trained to predict PM_{10} daily levels in Krasińskiego air quality station with the use of: (**a**) daily averages, and (**b**) 6-h resolution of meteorological parameters in cold half-years.

Analyses of the importance of variables presented at Figure 6 showed that the most important parameters were air temperature and wind speed near the ground and at the closest pressure level 975 hPa. It is worth mentioning that relative air humidity and relative air humidity gradient were more crucial parameters than air temperature gradient in the layer between 975 and 925 hPa concerning the prediction of day-to-day PM_{10} changes (Figure 6a). Two additional sensitivity tests were performed. Firstly, one for the whole period, without dividing the data set into two half-years and another one with training the model with data from 2000 to 2015 and testing it with data from 2016 to 2020 (also without dividing data set into cold and warm half-years). In both cases we achieved a similar order of importance of parameters for both Random Forests models as in Figure 4, while scores were slightly improved, e.g., with a decrease of RMSE around by 7 $\mu g \cdot m^{-3}$ for both models. It can be explained by adding a warm half-year to the data set that is characterized by lower values of PM_{10} concentration level. Results obtained by multilinear linear regression models were slightly worse for both tests, mean differences between Random Forests models were equal to 3 $\mu g \cdot m^{-3}$ for RMSE. As mentioned before, the main motivation for using Random Forests was to determine which meteorological parameters should be considered for further analysis, but a comparison of the accuracy of our forecasts with similar models (both physical and based on machine learning) shows also the good predictive potential of such an approach [60–62].

The optimized Random Forests model built to predict daily PM_{10} concentration based on the daily averages presented above was used to analyze the partial relationship between individual meteorological parameters and the level of the PM_{10} daily concentration.

Figure 7 presents the partial dependence of predicted PM_{10} daily concentration for selected meteorological parameters. The plots show the value of the lower and upper quartiles in the analyzed cold half-years (dashed vertical lines). Detailed analysis of the daily thermal gradient between 925 and 975 hPa, has shown that predicted PM_{10} concentration did not differ significantly for the positive values of vertical gradients (the number of such days in all analyzed cold half-years did not exceed 25%—Figure 7b). For the range of the daily gradient values between −3 °C and 0 °C in the layer between 925 and 975 hPa, the influence of this parameter on the daily value of the PM_{10} concentration increases significantly. During the days without absence of the elevated inversion in the layer between 850 and 925 hPa, the predicted value of PM_{10} concentration was close to the minimum value (low statistical importance). When the daily temperature gradient in the layer between 850 and 925 hPa decreases below −3 °C, a significant increase in the predicted pollutant concentration can be observed. The plots of the dependence of the air humidity at the ground (Figure 7d) and at the pressure level of 925 hPa (Figure 7e) on predicted PM_{10} concentration has shown a different relationship. For the days when daily relative humidity of 2 m a.g.l. exceeds 80%, there is a linear increase of the predicted daily PM_{10} concentration. On the other hand, with a decrease in relative humidity at the height of 925 hPa the predicted PM_{10} concentration increases. The plots of predicted PM_{10} concentration from the relative humidity gradient in the layer between 925 and 975 hPa have shown gradual deterioration of air quality with the decrease of humidity gradient in the range of from 0 to −25%. The relationship between the average daily wind speed at 10 m a.g.l and predicted air pollution level presented at Figure 7g indicates a strong decrease of PM_{10} concentration for the wind speed in the range from 0 up to 5 $m \cdot s^{-1}$; above this value the increase of wind speed did not significantly improve the air quality in the city. The relationship between the vertical wind shear in the layer between 925 and 975 hPa and the pollution concentration is presented in Figure 7h,i. When wind shear increases wind speed in the vertical profile, the crucial point is the exceedance of 5 $m \cdot s^{-1}$. For such situations the increase in the speed difference between layer 925 and 975 hPa does not significantly improve the air quality. When the wind shear is associated with a significant change in the wind direction between the level of 925 and 975 hPa, an increase in the difference in wind directions negatively affects the predicted air quality in the valley.

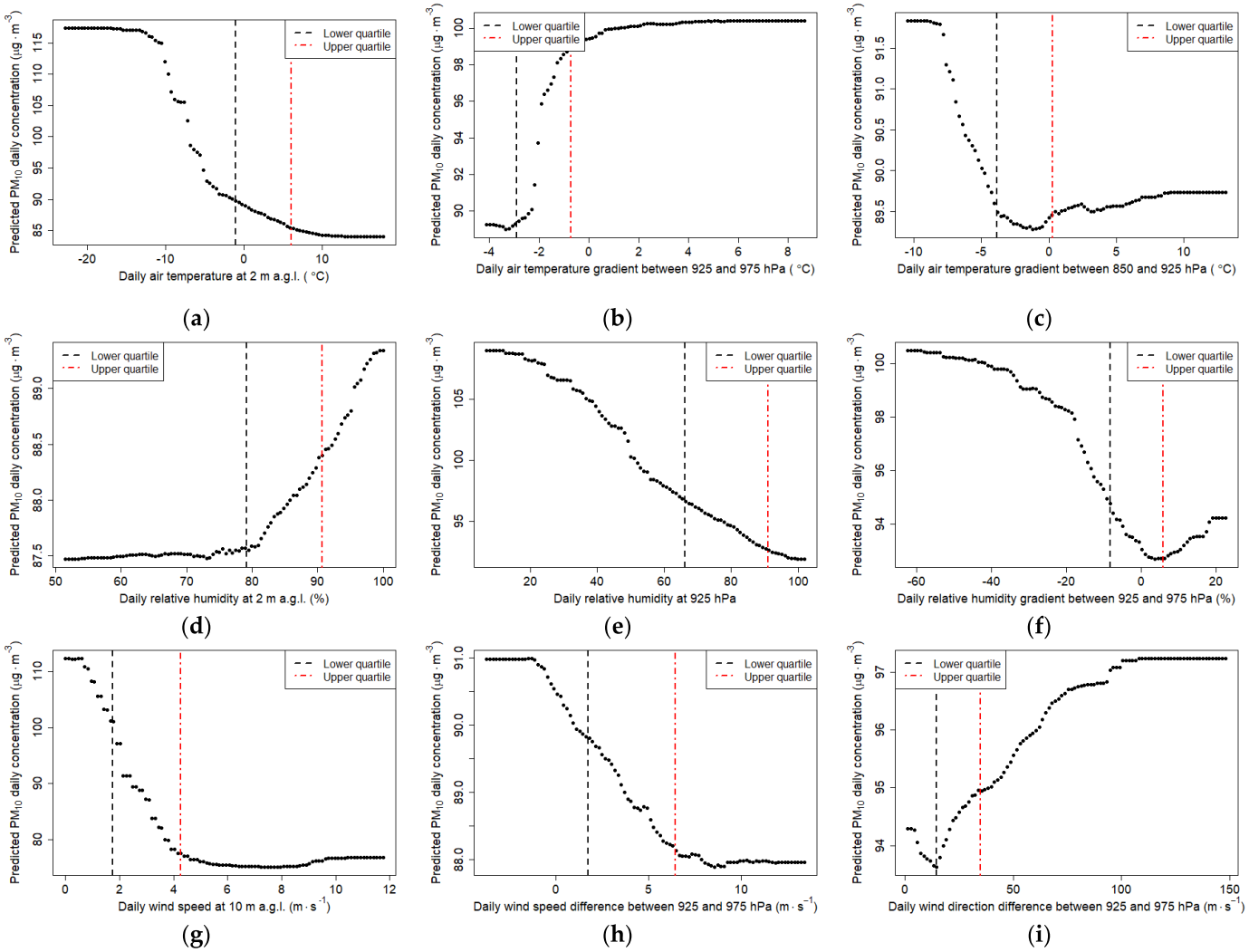


Figure 7. Partial dependence plots of daily (**a**) air temperature at 2 m a.g.l., (**b**) air temperature gradient between 925 and 975 hPa, (**c**) air temperature gradient between 925 and 975 hPa, (**d**) relative humidity at 2 m a.g.l., (**e**) relative humidity at 925 hPa, (**f**) relative humidity gradient between 925 and 975 hPa, (**g**) wind speed at 10 m a.g.l., (**h**) wind speed difference between 925 and 975 hPa and (**i**) wind direction difference between 925 and 975 hPa for the cold half-year obtained from Random Forests model. Subfigures present lower and upper quartiles of selected parameters in the cold half-years.

4. Discussion

The statistical analysis of the impact if meteorological conditions and atmospheric circulation types on air quality in Kraków with the use of machine learning methods made possible an objective selection of crucial parameters influencing the pollutant concentration level. In the studies presented, we have compared results from multilinear regression and the Random Forests method to predict daily PM_{10} concentration and its day-to-day changes for two sets of input data which differed in the temporal resolution of meteorological parameters. The application of 6-h resolution meteorological data in comparison with daily averages to predict daily PM_{10} concentration and its day-to-day changes showed similar results for both methods. This confirms the statement that the use of daily averages of meteorological parameters is sufficient to predict PM_{10} daily concentration a day ahead. Studies of the importance of variables' in predicting PM_{10} day-to-day changes the with the use of 6-h resolution data indicated that the number of crucial parameters was significantly lower than for predicting PM_{10} daily concentration for the Random Forests model (equal to 27 from 111 possible variables). It is also worth mentioning that in the case of predicting

PM_{10} concentration with the use of numerous variables (6-h data resolution), the multilinear regression model significantly reduced the number of variables while the Random Forests model selected more variables as important. Analyses of model performance showed that for this case Random Forests results were better than for multilinear regression models.

Additional tests with the use of measurements from October 2000 to September 2020 were carried out to estimate the impact of changes in meteorology and emissions during the recent cold season (October 2021 to December 2021). Eight different sets of training data were prepared for tests for Random Forests models and multilinear regression models (sets of two temporal resolutions: 6-h and daily averages; data for cold half-years only and for both half-years; training data for period from October 2000 to September 2020 and from January 2015 to September 2020). Analysis of the shorter period for model training was done to answer the question how models' performance is affected. An analysis of Taylor diagram plots (Figure A10 in Appendix C) indicated that the multilinear regression models had a higher standard deviation than the observations, indicating an excessively high variability of predicted PM_{10} concentration. The results obtained from Random Forests models were closer to the observations than the results from linear regression models (lower value of RMSE and standard deviation closer to the observation's). Secondly, using shorter periods for model training showed better results (lower RMSE and lower overestimation of PM_{10} concentration), however in individual smog episodes PM_{10} daily concentration was underestimated in comparison with forecasts using a longer training data set (Figure A11 in Appendix C). Analysis of the time course of predicted PM_{10} concentration showed that the multilinear model in some cases overestimated the PM_{10} decrease, while the Random Forests model performed better.

The conducted experimental studies (based on data from 2021) have shown that such analyses should take into account the circular data with greater resolution than the daily one. Considering only one type of circulation for the whole day does not make it possible to take into account the dynamics of circulation changes, which is particularly high over Central Europe in winter. On the basis of the existing classifications, especially the local one, a method of assessing the atmospheric circulation should be developed, taking into account the daily course (at least with 3 h resolution).

Furthermore, more detailed analysis of the importance of individual parameters on PM_{10} daily concentration level was available with the use of the Random Forests model. The results obtained were used in further analysis to investigate the dispersion of selected parameters for individual types of circulation.

The study on the influence of atmospheric circulation patterns on air quality made it possible to distinguish the dominant circulation types during which the probability of occurrence of poor air quality (Group 1) and a significant improvement in air quality conditions (Group 2) was the highest. Days with the high PM_{10} concentration at cold half-year, occurred mostly during the advection of air masses from the S-SW sector, non-directional anticyclonic situations (Ca + Ka type) and also anticyclonic situations with air advection from the W-NW sector. Such days were characterized by lower wind speed and air temperature at ground level and greater stability of the atmosphere during the day and night periods in comparison with days not assigned to both special groups (remaining days). According to the Mann–Whitney U test, the distribution of daily sums of precipitation was similar for dominant circulation types for days in Group 1 and remaining days, but the frequency of precipitation was lower for days in Group 1. Furthermore, during the daytime for days with high PM_{10} concentration, a local minimum of relative air humidity at level 925 hPa occurred frequently. The partial dependence of meteorological parameters obtained from the Random Forests model has also confirmed the negative effect of strong negative relative humidity gradient in layers between 925 and 975 hPa on air quality. In this case, advection of dry air masses at a height of 925 hPa, especially frequent for the S + SWa and W + NWa types, contributed to the increase in the stability of the atmosphere in the valley and resulted in a longer persistence of humid cold air pool. During the winter, when foehn wind occurs, there is often the advection of warm and dry air masses above

the analyzed region [63]. Additionally, previous studies pointed out that circulation types S + SWa, Ca + Ka enhance the occurrence of fog in Kraków which confirms the poor air pollution dispersion conditions linked to those circulation types [64]; the occurrence of haze and fog episodes is studied widely in different parts of the world in the context of air pollution control [65].

The second case studied consisted of days characterized by a significant improvement of air quality (Group 2). A significant reduction in the PM_{10} daily concentration occurred mostly for three circulation patterns (air advection from W-NW sector and cyclonic type with differentiated air advection—Cc + Bc type). These days were characterized by increased wind speed and a greater share of days with precipitation in comparison with remaining days. Atmospheric stratification (relative air humidity and air temperature gradient) was similar for dominant circulation patterns for days assigned to Group 2 and to remaining days. Near-ground temperature inversion for days in Group 2 during daytime almost did not occur, which was confirmed by local measurements and ERA5 reanalysis. It is also worth mentioning that during these days, the local maximum of relative air humidity in the layer 925 hPa during daytime occurred frequently.

Days with anticyclonic conditions with air advection from the W-NW sector are characterized by changeable weather conditions, which contributed to improvement or deterioration of air quality conditions during the cold half-year. The improvement is observed when air masses could penetrate into the valley and remove the cold air pool, while deterioration can be seen when air masses pass over the valley. Studies conducted over the region of the Dead Sea Valley using a high resolution WRF model [66] indicated that foehn wind intrusion into the valley depends on synoptic and mesoscale conditions which affect the vertical structure of the lower troposphere. For the cases with a high stable layer over the Dead Sea Valley, the foehn reached the valley floor, while during a low stable layer, it did not.

Studies of air quality in cold and warm half-years have shown that weak wind speed is one of the most important factors which deteriorates air quality. Owing to this fact circulation patterns which are characterized by weak wind speed, caused by the interaction of local orography (air advection from S-SW and W-NW sectors) and also atmospheric stagnation were the most important (non-advective types with anticyclonic situation, according to Niedźwiedź: type Ca + Ka). The high importance of wind speed on air quality was confirmed by numerous previous studies [3,67,68]; however, studies of the partial dependence of meteorological individual parameters for daily PM_{10} level showed nonlinear dependency [31].

Furthermore, studies of individual meteorological parameters have shown that vertical wind shear can worsen but also improve air quality in the valley. An increase of wind speed difference between the layers 925 and 975 hPa had a positive impact on air quality. On the other hand, strong wind shear associated with a change of the wind direction in vertical profile affects the deterioration of air quality by reducing the height of the mixing layer during the daytime. The study of the PM_{10} concentration vertical profiles in Kraków presented in the work of Sekula et al. 2021 [69] indicate that this phenomenon often occurs at the valley bottom height (approx. 100 m a.g.l.). During the cold half-year, poor dispersive conditions are more frequent than in the warm half-year, which in combination with high rates of emission from the residential sector led to accumulation of pollutants inside PBL. Analysis of the deseasonalized multiyear PM_{10} trend has shown that in the decade 2011–2020 a negative trend was observed which may be linked to the positive trend of air temperature.

According to the Random Forests model, adding a vertical gradient between neighboring pressure fields improved the quality of the PM_{10} level forecast. Other studies concerning application of machine learning methods in air quality forecasting confirmed that meteorological parameters like, wind speed, air temperature, relative air humidity and atmospheric precipitation were important factors affecting air quality [70]; however, studies of the effect of atmospheric precipitation on the concentration of particulate matter showed

that it mainly washes out coarse particles while having little effect on fine particles [71]. Attention should also be paid to the representation of the atmospheric stability in the machine learning models; in this research we can distinguish two approaches: the application of planetary boundary layer height [31,72] or a more complex one with the application of meteorological conditions at different atmospheric pressure levels [73]. Owing to the fact that the estimation of planetary boundary layer height in numerical atmospheric models still requires validation and further development [74,75] we would like to suggest applying vertical profiles of atmosphere rather than PBL height in studies.

5. Conclusions

The analysis of air quality conditions in the multiyear period has proved that wind speed, air temperature, atmospheric stability connected to relative humidity gradient and air temperature gradient at lower troposphere and the occurrence of precipitation significantly influences pollutant concentrations. Apart from the non-directional anticyclonic conditions which affect air stagnation, air advection from the S-SW sector, strongly modified by local topography, has usually caused an increase of PM_{10} levels in the study area. Studies have shown that for the region analyzed the direction of air advection and its intensity is of greater importance than the type of pressure system concerning the impact on PM_{10} levels. Certain types of circulation can be indicated as significant both in terms of improving the dispersion of pollution and its deterioration; this is the result of the modification of large-scale processes by orography and near-ground atmospheric conditions. For example, air masses advection from the W-NW sector may strengthen near-ground thermal inversion and reduce wind speed in the valley, but it can also break thermal inversion in the valley and topographically channel the air flow. Research has indicated that particular types of circulation may affect the deterioration of air quality conditions in the cold half-year. During these circulation types lasting for a few or several days, a continuous increase of air pollution can be observed. Sometimes it leads to extremely high values of PM_{10} concentrations (e.g., types S-SW, W + NWa).

The analysis of the number of days with PM_{10} levels exceeding the daily limit in the study period showed that the emission reduction contributed to a significant improvement in the air quality in the city; however, the occurrence of days with poor air quality in the future is very likely due to the strong influence of meteorological conditions on that element. The number of days with low thermal inversion in the 975–925 hPa layer in a cold half-year turned out to be particularly important. Significant factors influencing the improvement of air quality in the cold half-year were the occurrence of longer rainfall (rainfall during the day and night), high daily wind speed in the valley and negative air temperature gradient.

One of the limitations in the studies presented above is the assignment of a single circulation type to the whole day; on days when an atmospheric front or the pressure center passes over a certain area, the meteorological conditions may change significantly during the day. Therefore, for the detailed analysis of atmospheric circulation, the daily fluctuations of circulation conditions should be taken into account. Currently, studies on application of the Convolutional Neural Network in automatic classification of atmospheric circulation according to the Niedźwiedź classification with the use of ERA5 reanalysis are conducted in our research group. The first results obtained are promising, however some model optimizations are still necessary.

Analysis of hourly PM_{10} concentration data and meteorological parameters with the use of cross correlation function have shown the occurrence of delayed time response of PM_{10} concentration level in the city to the change in meteorological conditions. For instance, at Krasińskiego station, the delayed time response obtained for the PM_{10} level for the wind speed, wind gusts, air temperature, as well as the ground thermal gradient was equal to 2 h; however, it should be mentioned here that air quality in the city may vary significantly on spatial and temporal scale as it was presented in other studies [8].

Further research on the intra-city spatial dependency from meteorological parameters and circulation patterns is necessary from the point of view of habitability and health risk.

Previous studies indicated that each technique of circulation patterns classification has some limitations e.g., there is a problem of equally sized classes, separation of different types, seasonal or inter-annual variability of a class frequency. In the case of the subjective classifications, there are high inter-annual variability and larger long-term trends of the frequencies of the types' in comparison to the automated circulation classification methods; however, subjective classification includes important expert knowledge concerning analyzed geographical regions, which is difficult to formulate in precise rules for automated classification methods [52]. In conclusion the authors would suggest using local circulation classification methods in studies for different regions, owing to the effect of topography on modifications of atmosphere dynamics; however, because of the obvious limitations of the use of manual approaches, connected to their subjective nature, it seems that the best solution would be to use a local subjective classification of circulation types, which could be automated. Such approaches are known in the literature, although, they were applied in larger spatial scales [51].

Owing to the fact that machine learning methods create great opportunities in air quality studies, further development works are planned using the Random Forests method to analyze and forecast air quality on a larger spatial scale (e.g., cities in Central Europe) by supplementing the model with additional data such as land cover, topography, and turbulence parameters, as well as the results from operational forecasts of numerical air quality models to improve model accuracy. The further step in air quality studies will be an application of multi-step time series forecasting to model daily cycle of air pollution but also to predict daily pollution levels for three days ahead by using weather forecast and air pollution levels on the current day [75,76]. The next direction of development of the current research focuses on the analysis of spatial and temporal variability of pollution for large cities using data from air quality stations as well as non-governmental air quality systems. The first tests of using convolutional neural networks to determine air pollution level with respect to circulation patterns over larger domains are very promising, and so it is also planned to further investigate those methods.

Author Contributions: Conceptualization, P.S., Z.U., A.B. and M.Z.; methodology, P.S., Z.U. and A.B.; software, P.S. and B.B.; validation, P.S. and B.B.; formal analysis, P.S.; investigation, P.S., A.B., Z.U., B.B. and M.Z.; resources, P.S., Z.U., A.B. and B.B.; data curation, P.S. and B.B.; writing—original draft preparation, P.S.; writing—review and editing, P.S, B.B., Z.U., M.Z. and A.B.; visualization, P.S. and B.B.; supervision, P.S.; project administration, P.S.; funding acquisition, Z.U., M.Z. and B.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research has been partly supported by the EU Project POWR.03.02.00-00-I004/16 (PS). This work was (partially) supported by the AGH UST statutory tasks No. 11.11.220.01/1 within subsidy of the Ministry of Science and Higher Education.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Publicly available datasets were analyzed in this study. This data can be found here: Chief Inspectorate for Environmental Protection (CIEP). Available online: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives (accessed on 8 March 2022). Calendar of circulation types. Available online: http://www.kk.wnoz.us.edu.pl/nauka/kalendarz-typow-cyrkulacji/ (accessed on 8 March 2022). Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute. Available online: https://danepubliczne.imgw.pl/datastore (accessed on 8 March 2022).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

Appendix A

Air quality data analysis with measurements from station at Krasińskiego St. has shown significant differences in the distribution of the daily PM_{10} concentration during warm and cold half-years. The multiannual trend of the number of days with exceedance of limit 50, 100, and 200 $\mu g \cdot m^{-3}$ were calculated for cold and warm half-year separately. The period covered from October 2000 to September 2020. For a selected number of days a linear curve was fitted by using the Theil-Sen estimator [77] provided in the RobustLinearReg R package was fitted [78]. The number of days with an exceedance of the daily pollution level (equal to 50 $\mu g \cdot m^{-3}$) is characterized by a decreasing trend equal to −5.33 days/year for the warm half-year (R-squared was equal to 0.51), while for the cold half-year the number of days with exceedance of 50 $\mu g \cdot m^{-3}$ has no positive or negative multiyear trend (Figure A1a,b). During the cold half-years in the period 2000–2020 there was a visible negative trend of the number of days with exceedance of limit 100 $\mu g \cdot m^{-3}$ equal to −2.31 days/year with R-squared equal to 0.23. In the study period, there are visible fluctuations in the number of days with exceedance of the daily PM_{10} limit, during warm and cold half-years (Figure A1c,d), which clearly indicates the impact of weather conditions on the frequency of smog episodes.

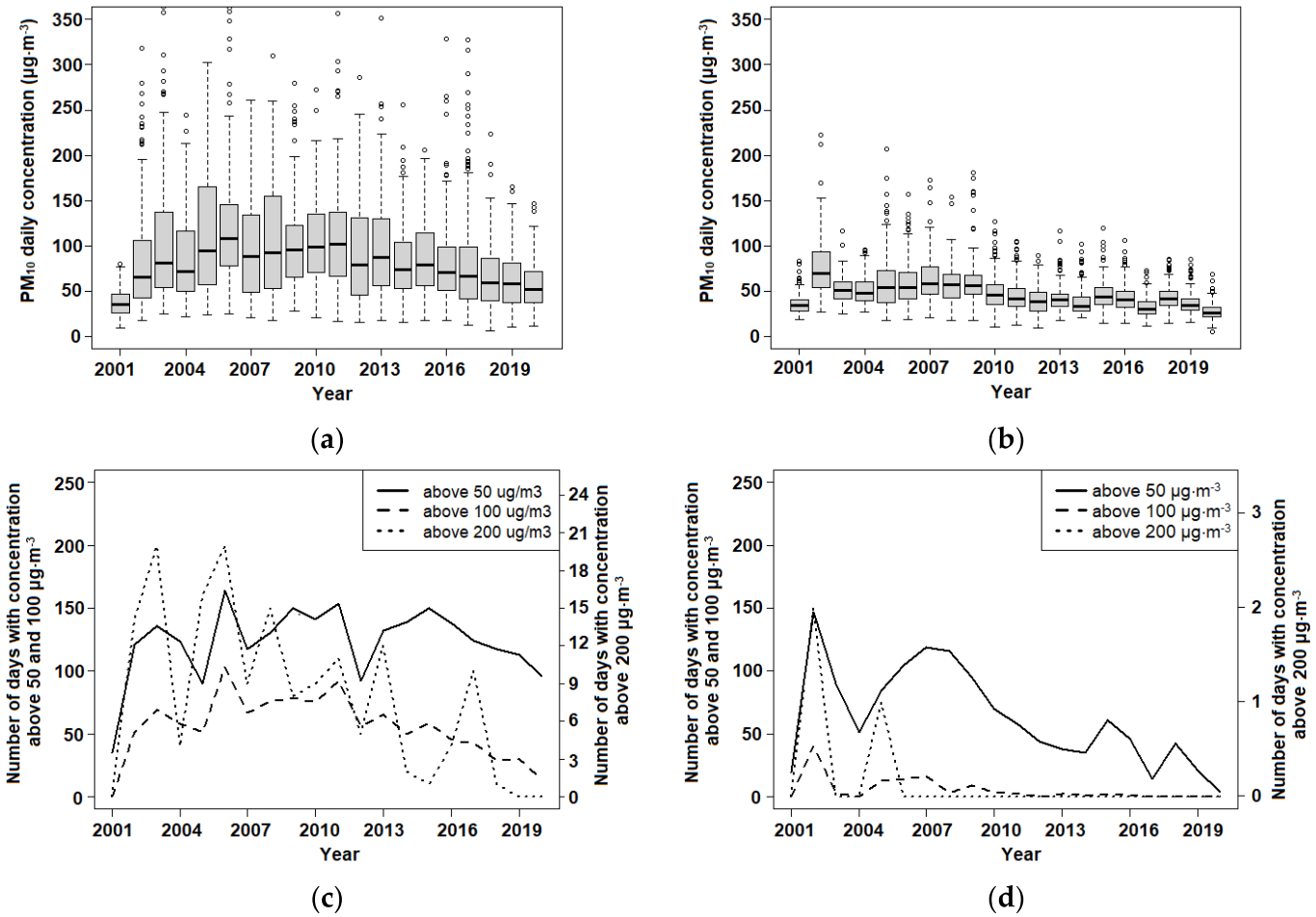


Figure A1. Distribution of daily PM_{10} concentration at the Krasińskiego station in the cold (**a**) and warm half-year (**b**), and the number of days with exceedance of limit 50, 100 and 200 $\mu g \cdot m^{-3}$ in the cold (**c**) and warm (**d**) half-year in the period 2000–2020.

In an effort to better analyze the multiannual trend in the period from October 2000 to September 2020 of the PM_{10} concentration, the Theil-Sen estimator with the switched option of seasonal trend decomposition using loess was used (Figure A2). By default, the values of the averaging period and autocorrelation were used, equal to month and the 95% confidence level. The function used for this calculation was provided by the openair R package [79]. Analysis has shown that during the analyzed period there is a negative trend equal to -1.94 $\mu g \cdot m^{-3}$/year. In the study period 2000–2020, the months of January 2001 and 2006 differ significantly from the entire study period. This situation was caused by anomalies of air temperature at 2 m a.g.l. (Figure A3) and atmospheric stability in the layer between 975 and 925 hPa (not shown in the article). Detailed analysis of the multiyear trend of PM_{10} has shown that stronger negative trend of PM_{10} concentration occurred during the period 2011–2019 than for 2002–2010, equal to -2.54 $\mu g \cdot m^{-3}$/year and -0.64 $\mu g \cdot m^{-3}$/year, respectively. For the same sub-periods, air temperature trends also differ significantly, in the period 2011–2019 the trend was equal to 0.21 °C/year, while for the earlier period amounted to -0.07 °C/year. On the other hand, analysis of the deseasonalized air temperature gradient in the layer between 975 and 925 hPa and daily wind speed at 10 m a.g.l. did not show any significant trends throughout the multiannual period (not shown in the article). The significant positive trend in air temperature in the last decade may be a crucial factor in determining PM_{10} emission in the cold half-years. Studies of warm temperature extremes for Central Europe in the period 1950–2020 have shown a positive trend of intensity and frequency of hot events during winter periods [80].

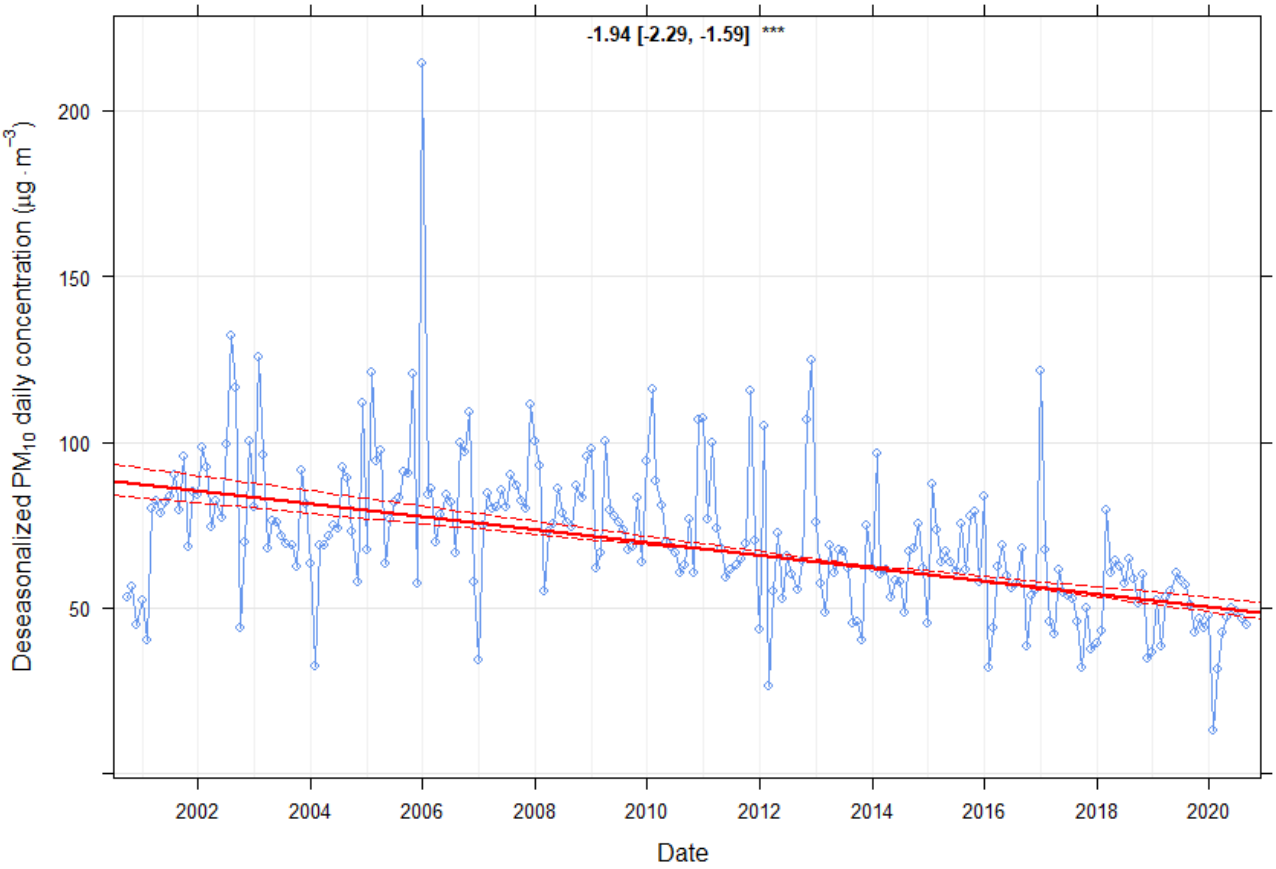


Figure A2. Deseasonalized multiyear trend of PM_{10} daily concentration in period from October 2000 to September 2020. *** indicates that the obtained trends are significant to the levels 0.001.

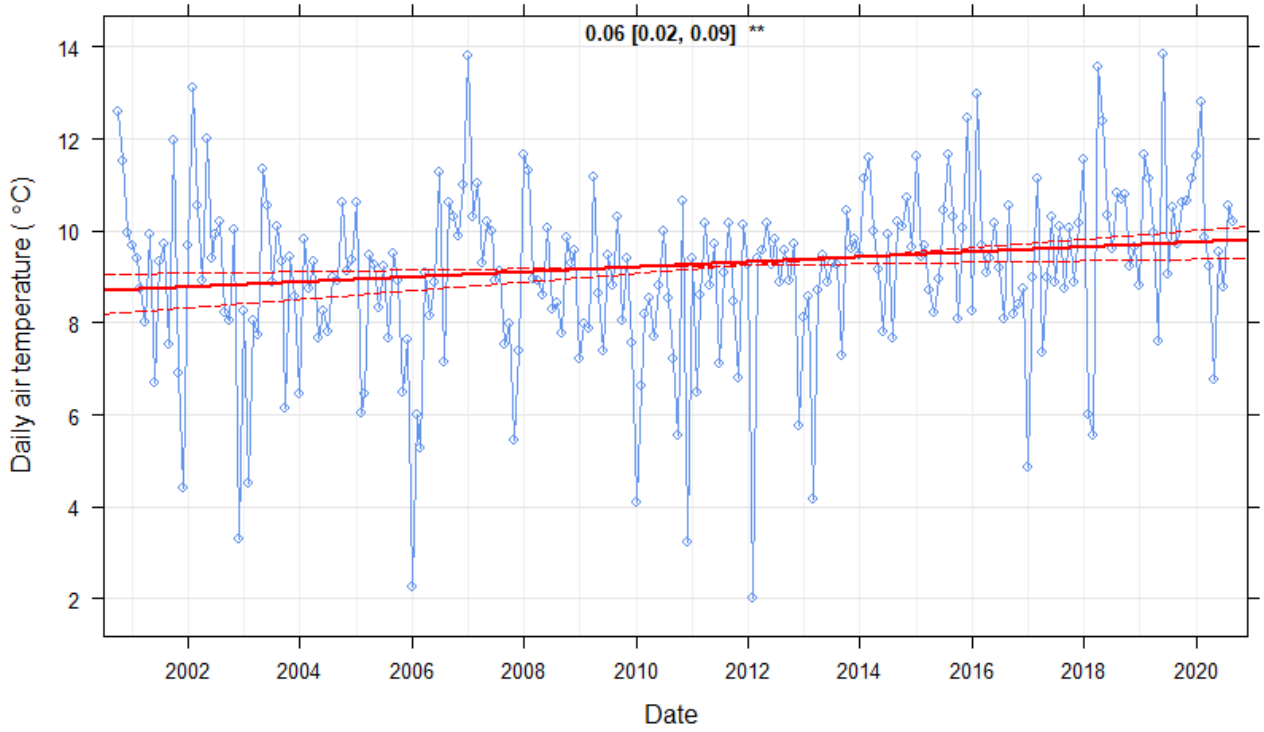


Figure A3. Deseasonalized multiyear trend of air temperature at 2 m a.g.l. in period from October 2000 to September 2020. ** indicates that the obtained trends are significant to the levels 0.01.

Appendix B

Appendix B.1 Niedźwiedź Circulation Classification

The classification of circulation types for Southern Poland [81] is available for the period from September 1873 to the present day. The classification was based on the typology of atmospheric circulation developed by Lamb [82] for the British Isles, with some modifications, especially regarding nonadvection situations. On the basis of synoptic maps of Europe, the direction of air mass movement (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) and the type of baric system (a—anticyclonic situation, c—cyclonic situation) were determined. Finally, 16 types of atmospheric circulation were distinguished. In addition, there are two non-advectional types: Ca—high-pressure center and Ka—anticyclonic wedge or ridge, and two cyclonic types of differentiated air advection: Cc—low pressure center and Bc—cyclonic troughs. The aric col and low-gradient situations, which are difficult to classify, are marked with the letter "x". Thus, the entire classification includes 21 types (10 anticyclonic types, 10 cyclonic types and one indefinite type). By combining adjacent types, a shortened version is also obtained for 11 situations (N + NEa or c; E + SEa or c; S + SWa or c; W + NWa or c; Ca + Ka, Cc + Bc, x), which is useful in studies of periods shorter than 30 years [29].

Due to the fact that the study period covers 20 years, the classification version with 11 types of circulation was used, in order to increase the size of samples and obtain more reliable statistical results. For the analyzed period from October 2000 to September 2020 the multiannual trend was determined for warm and cold half-years, respectively, for each of 11 Niedźwiedź circulation types (Table A1 in Appendix B). During each half-year, the number of days with a specific circulation type were determined. At the next step, linear curves were fitted for each circulation type by using the Theil-Sen estimator from RobustLinearReg R package. Analysis has shown that the strongest negative trend was observed for type Ca + Ka during the warm and cold half-year, and it was equal to −0.73 and −0.60 days/half-year, respectively. Studies of 21 Niedźwiedź circulation types has shown that a strong negative trend was observed for type Ca + Ka was caused by decrease of number of days with anticyclonic wedge or ridge situation (type Ka), for which the

trend was equal −0.76 and −0.57 days/half-year, for cold and half-years, respectively (not shown in the article). During the cold half-year multiyear trend of circulation types S + SWa and N + NEc was equal to 0.27 and 0.21 days/half-year, while for circulation type S + SWc the multiyear trend was negative (equal to −0.2 days/half-year). For the warm half-year, the trend of cyclonic conditions with air masses advection from sectors N–NE, S–SW was positive equal to 0.44 and 0.26 days/half-year, respectively. On the other hand, multiyear trend of W + NWc and Cc + Bc types in warm half-years were negative and equal to −0.50 and −0.33 days/half-year, respectively. The total frequency of particular atmospheric circulation types in the period October 2000–September 2020 in warm and cold half-years is presented in Figure A4 in Appendix B.

During the warm half-year, the shares of nonadvection anticyclonic types (Ca + Ka) and cyclonic types with differentiated air advection (Cc + Bc) are the highest and equal to 15% and 16%, respectively. Air advection from the W–NW sector during cyclonic and anticyclonic situations occurs often, and comprises 23% of all cases.

The cold half-year period differs significantly from the warm one; the share of air advection from the SW-NW sector (cyclonic and anticyclonic types) is greater by 15% in cold half-year than in the warm one. Parallel, the share of cyclonic types with differentiated air advection during the cold half-year is lower by 6% compared to the warm half-year.

Table A1. Multiyear trend of 11 atmospheric circulations according to Niedźwiedź classification in warm and cold half-years in period from October 2000 to September 2020.

Circulation Type	Cold Half-Year		Warm Half-Year	
	Trend (Day/Half-Year)	R-Squared	Trend (Day/Half-Year)	R-Squared
N + NEa	−0.09	0.01	0.19	0.06
E + SEa	0.10	0.01	0.13	0.02
S + SWa	0.27	0.07	0.13	0.04
W + NWa	0.00	0.00	0.17	0.02
Ca + Ka	−0.60	0.23	−0.73	0.35
N + NEc	0.21	0.02	0.44	0.12
E + SEc	0.15	0.02	0.00	0.00
S + SWc	−0.20	0.02	0.26	0.12
W + NWc	0.00	0.00	−0.50	0.16
Cc + Bc	0.16	0.04	−0.33	0.17
x	0.12	0.06	0.00	0.00

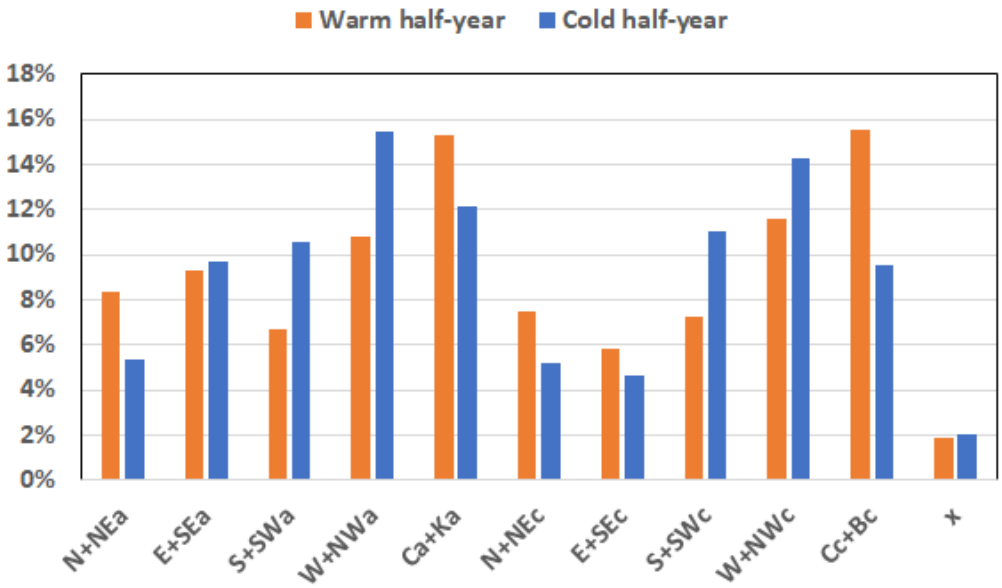


Figure A4. Frequency of Niedźwiedź circulation types during the period October 2000—September 2020 in warm and cold half-year.

Appendix B.2 Lityński Circulation Classification

One of the classifications of atmospheric circulation types widely applied in Poland is the threshold-based method proposed by J. Lityński. Lityński developed his objective classification to be applied to Poland and Central Europe [38,53]. Synoptic types were defined using the following indicators: zonal (Ws), latitudinal (Wp) and Warsaw air pressure (Cp) using sea-level synoptic maps over an area defined as 40–65 °N and 0–53 °E. The Ws indicator was derived using a formula for an average longitudinal component of the geostrophic wind. A conversion of this formula was used to determine the latitudinal circulation indicator [38]. The direction of air advection and the type and strength of the pressure systems were determined on a frequency distribution of the Ws, Wp and Cp indicator values and using a three-class equal-probability system. The thresholds employed to calculate the Wp, Ws and Cp indices change from month to month, which results in flattening the seasonal cycle of the occurrence of circulation types [38]. The resulting air advection type was described by three numeric parameters: Wp, Ws and Cp. The following symbols were used to denote the Ws indicator: E (eastern) for most negative values, 0 for near-zero values and W (western) for most positive values. Similarly, the Wp indicator was denoted by the symbols: N (northern) for most negative values, 0 for near-zero values and S (southern) for most positive values. Cp air pressure classes were marked: C (cyclonic), 0—near-zero and A (anticyclonic). These circulation type symbols were combined with the Wp and Ws indicators class symbols, and finally, one of the three Cp air pressure class symbols were added. Lityński distinguished 27 circulation types, three non-advective types (symbol Oo, Oc, Oa) and 8 directional types (with 3 types, cyclonic, anticyclonic and intermediate type, known as the near-zero type). It is worth to note that Litynski's classification system, as one of the scalable methods, is part of the COST 733 classifications catalogue [83]. In the current artile, the Lityński classification has been used with modifications introduced by Krystyna Pianko-Kluczyńska [63]. Recent studies confirm the high level of comparability in the course of circulation indices according to the classifications of Niedźwiedź and Lityński [29].

Figure A5 in Appendix B presents the frequency of Lityński circulation types during the warm and cold half-year of the study period. For the analyzed period from October 2000 to September 2020, the multiannual trend was determined for warm and cold half-years, respectively, for 27 Lityński atmospheric circulation types. During each half-year, the numbers of days with a specific type of circulation were determined. In the next

step, for each circulation type, linear curves were fitted by using the Theil-Sen estimator from the RobustLinearReg R package. Detailed analysis has pointed out that during the warm half-year share of circulation types Ec and Wa have the strongest negative trend equal to −0.25 and −0.21 days/half-year, respectively. F°or the type Oa in the warm half-year, the strongest positive trend equal to 0.25 days/half-year was observed. During the cold half-year share of types NEa and Sc are characterized by the strongest negative trend equal to −0.22 and −0.25 days/half-year, respectively. On the other hand, for SEo, SWc, Wa and NWa positive trend equal on average 0.28 days/half-year was observed. Detailed information on individual circulation types during the cold and warm half-year in the period from October 2000 to September 2020 was included in Appendix B, Table A2. In comparison with warm half-year, during cold half-year there is a visible decrease of air advection from the NE direction, with a significant increase of air advection from the SW direction. It is worth noting that the share of cyclonic types with air advection from the W–NW sector is greater during the cold season, whereas anticyclonic types with air advection from the same direction have a lower frequency in comparison with warm half-year.

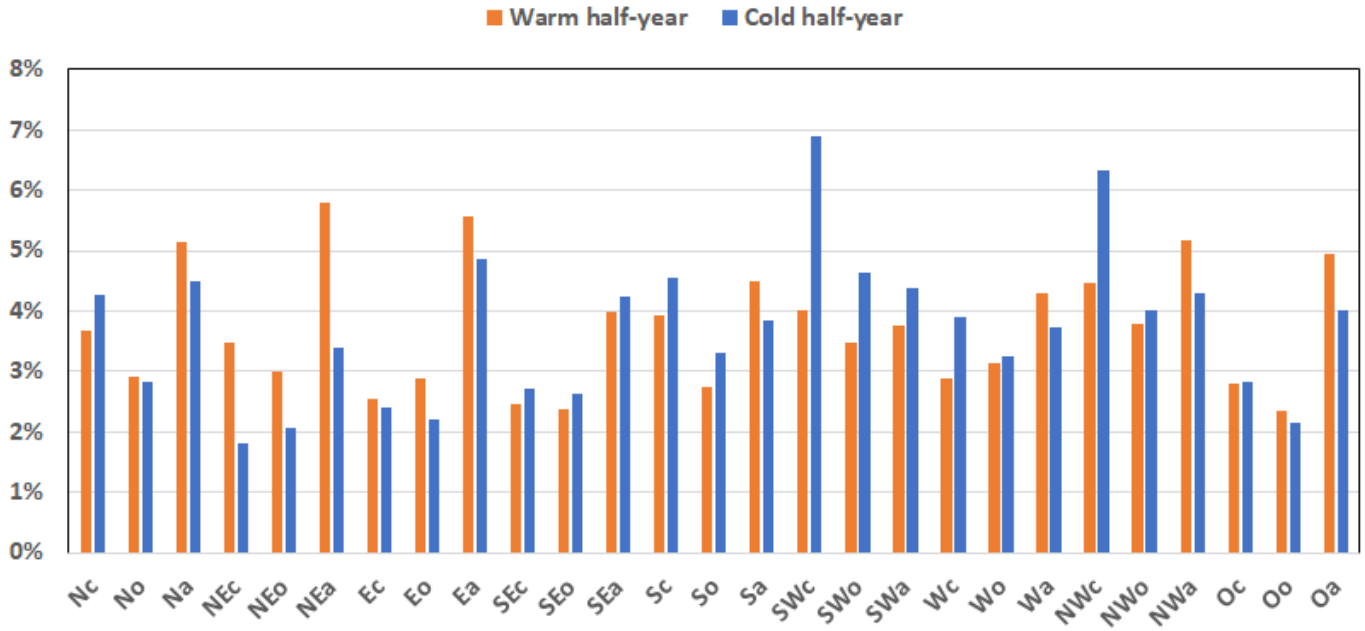


Figure A5. Frequency of Lityński circulation types during the period October 2000—September 2020 in warm and cold half-year.

Table A2. Multiyear trend of 27 atmospheric circulations according to Lityński classification in warm and cold half-years in period from October 2000 to September 2020.

Circulation Type	Cold Half-Year		Warm Half-Year	
	Trend (Day/Half-Year)	R-Squared	Trend (Day/Half-Year)	R-Squared
Nc	−0.13	0.15	0.00	0.00
No	−0.07	0.03	0.20	0.27
Na	−0.04	0.00	−0.09	0.00
NEc	−0.03	0.00	0.00	0.00
NEo	−0.11	0.07	0.08	0.04
NEa	−0.22	0.12	0.00	0.00

Table A2. *Cont.*

Circulation Type	Cold Half-Year		Warm Half-Year	
	Trend (Day/Half-Year)	R-Squared	Trend (Day/Half-Year)	R-Squared
Ec	0.00	0.00	−0.25	0.18
Eo	0.00	0.00	0.13	0.03
Ea	0.00	0.00	−0.13	0.07
SEc	0.11	0.04	0.00	0.00
SEo	0.25	0.13	0.00	0.00
SEa	0.00	0.00	0.00	0.00
Sc	−0.25	0.06	−0.11	0.02
So	0.00	0.00	−0.08	0.04
Sa	0.00	0.00	0.00	0.00
SWc	0.26	0.08	−0.18	0.10
SWo	0.00	0.00	−0.11	0.13
SWa	0.00	0.00	0.08	0.00
Wc	0.00	0.00	0.13	0.07
Wo	0.00	0.00	−0.10	0.05
Wa	0.27	0.13	−0.21	0.14
NWc	0.00	0.00	−0.13	0.03
NWo	0.14	0.08	0.00	0.02
NWa	0.37	0.17	0.18	0.13
Oc	−0.12	0.04	−0.08	0.00
Oo	0.00	0.00	0.11	0.03
Oa	−0.19	0.11	0.25	0.13

Appendix C

Table A3. Height of PM_{10} daily concentration upper quartile in warm and cold half-years.

Year	Cold Half-Year ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Warm Half-Year ($\mu g \cdot m^{-3}$)
2001	47	41
2002	106	94
2003	137	60
2004	116	60
2005	162	73
2006	145	71
2007	134	77
2008	155	69
2009	123	67
2010	135	57
2011	137	53
2012	131	49
2013	130	47
2014	103	43
2015	115	54
2016	99	50
2017	99	38

Table A3. *Cont.*

Year	Cold Half-Year (μg·m^{-3})	Warm Half-Year (μg·m^{-3})
2018	87	50
2019	82	42
2020	71	32

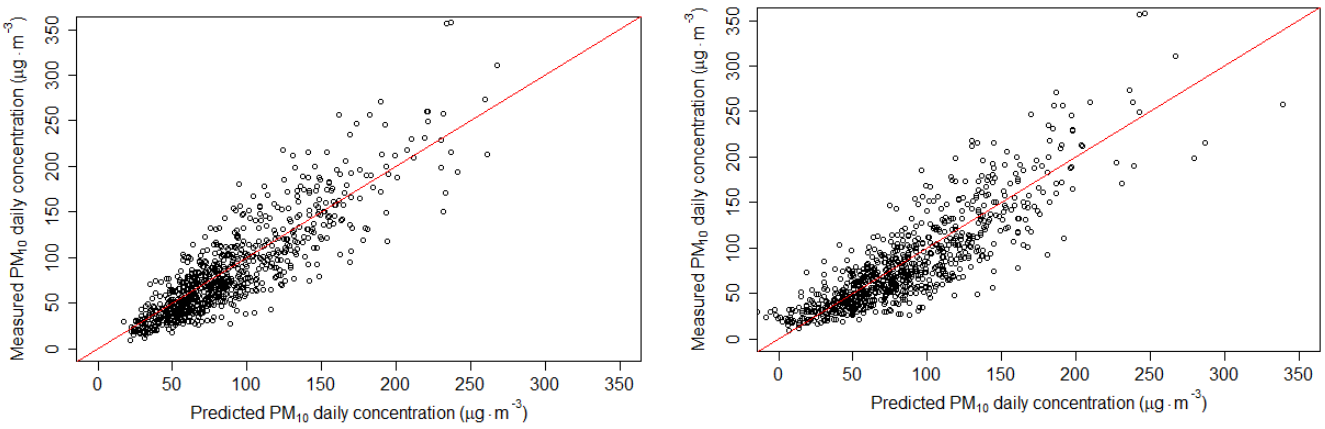


Figure A6. Scatterplot of predicted versus observed PM_{10} daily concentration (**a**) for Random Forests model and (**b**) multilinear regression model with daily meteorological parameters for the cold half-years.

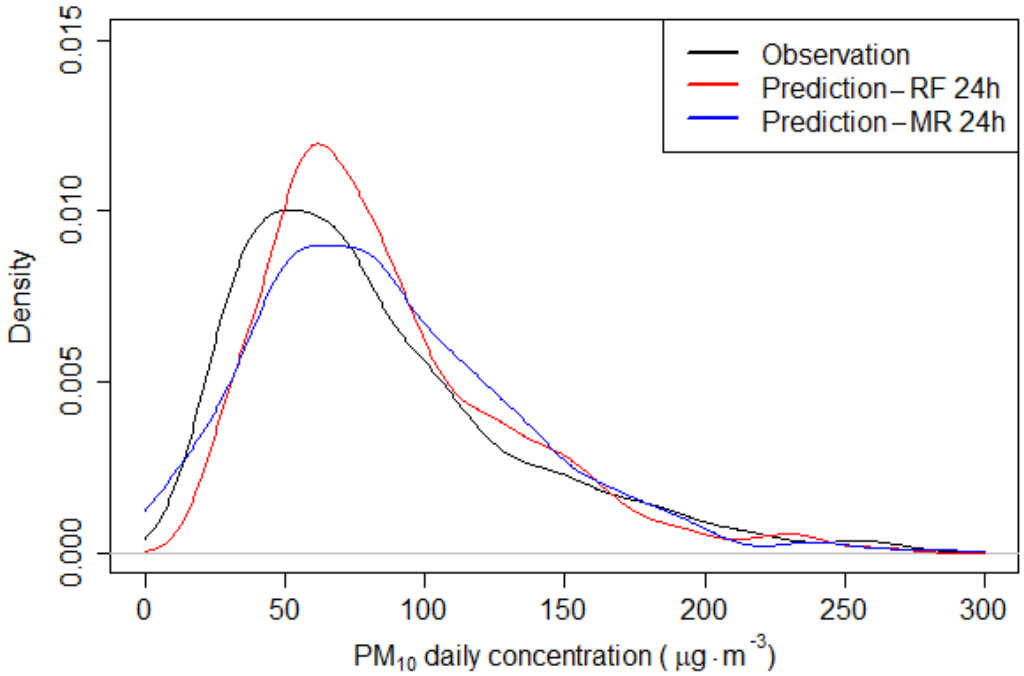
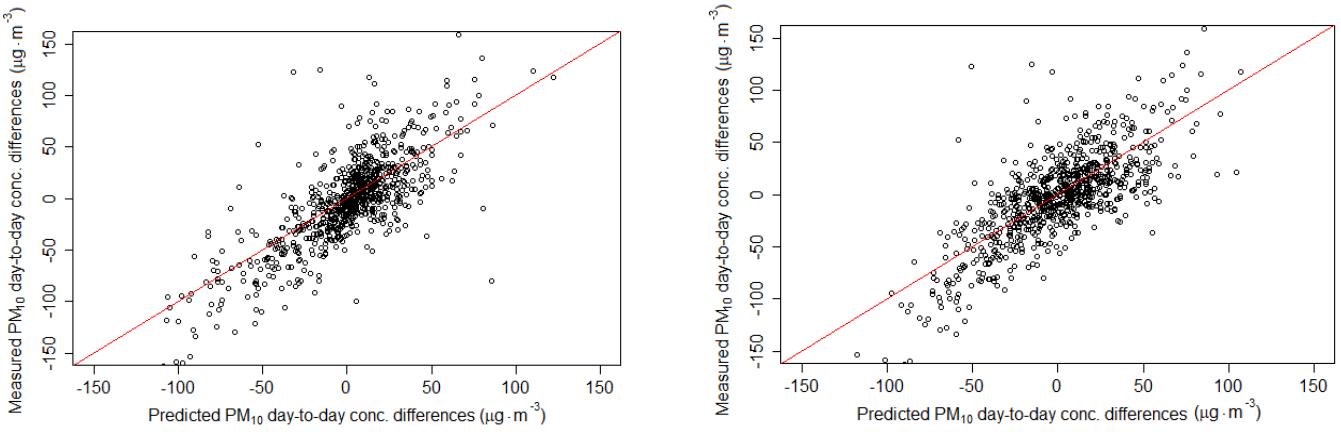


Figure A7. Density plot observed and predicted PM_{10} daily concentration for Random Forests (RF) and multilinear regression (MR) model with daily meteorological parameters for the cold half-years.



(**a**) (**b**)

Figure A8. Scatterplot of predicted versus observed PM_{10} day-to-day concentration changes (**a**) for Random Forests model and (**b**) multilinear regression model with daily meteorological parameters for the cold half-years.

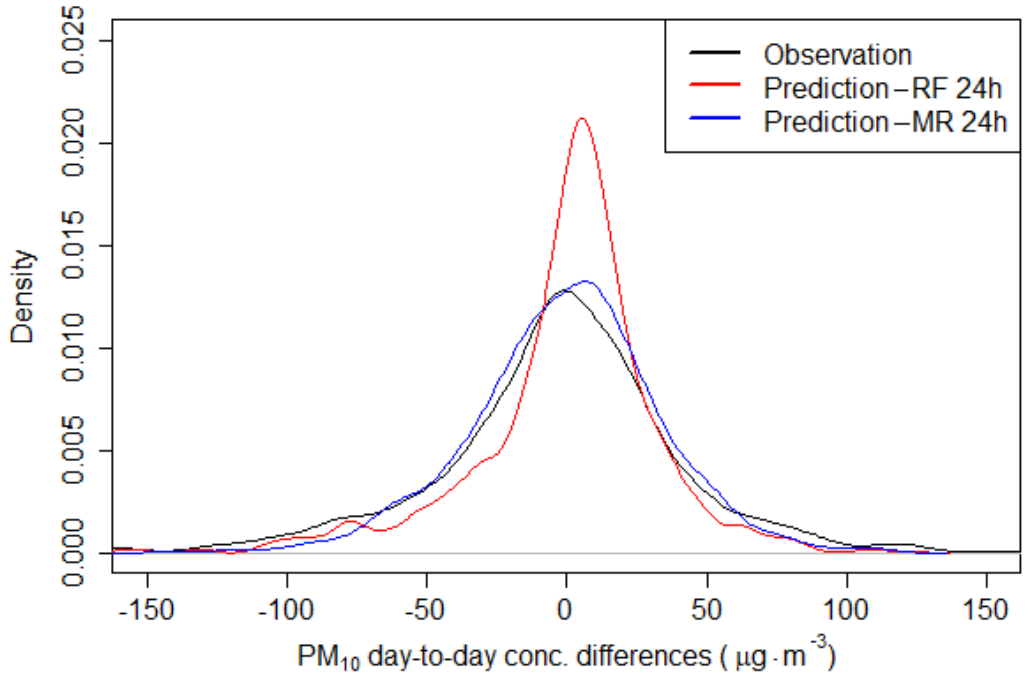


Figure A9. Density plot observed and predicted PM_{10} day-to-day concentration changes for Random Forests (RF) and multilinear regression (MR) models which use daily meteorological parameters for the cold half-years.

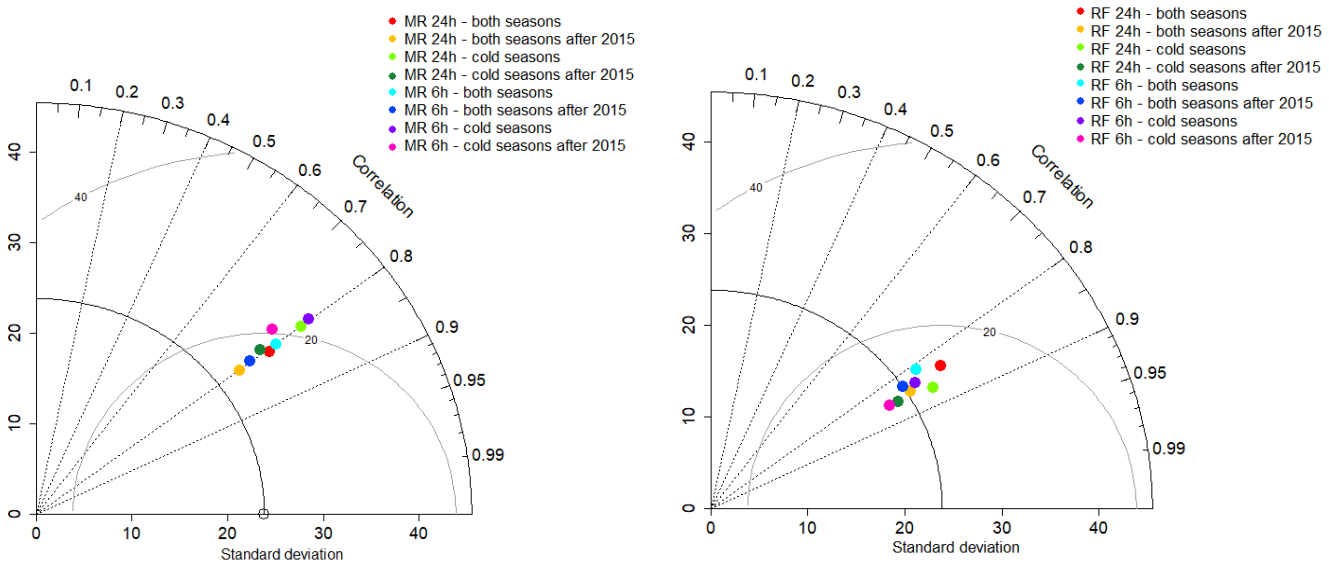


Figure A10. Taylor diagram plots of predicted PM_{10} daily concentration for the period between October 2021 and December 2021 for (**a**) multilinear regression models and (**b**) Random Forests models for different training data sets.

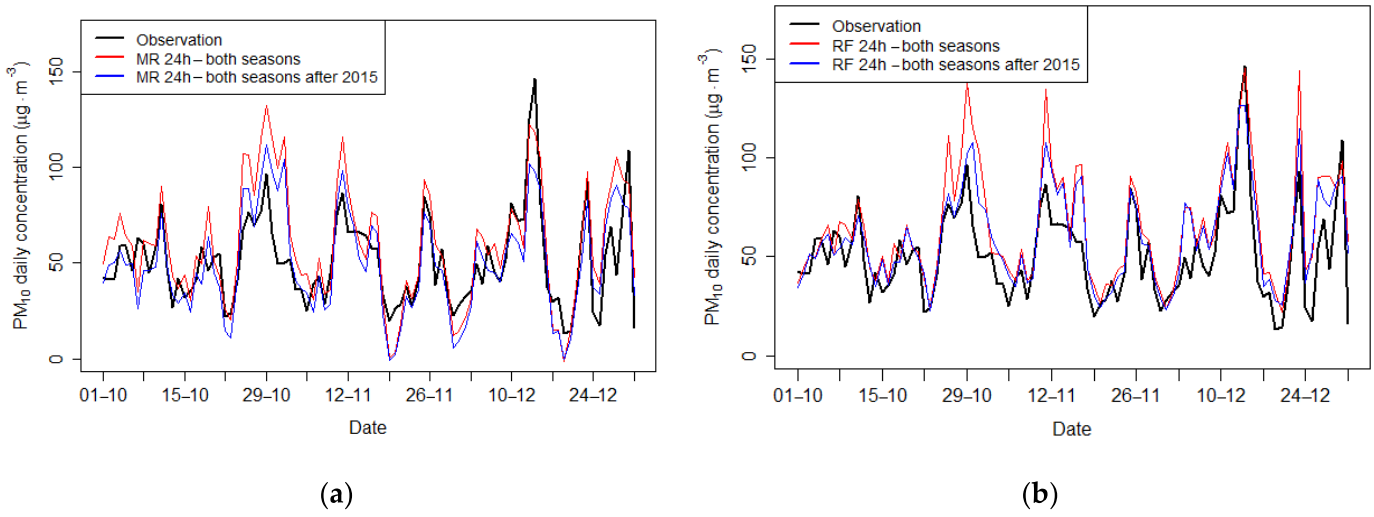


Figure A11. Time course of observed and predicted PM_{10} daily concentration for period between October 2021 and December 2021 for (**a**) multilinear regression models and (**b**) Random Forests models with use of daily averages of meteorological data for both half-years for two different training periods.

Appendix D

Weather Conditions in Relation to the Circulation Types

The following section describes the distribution of the selected meteorological parameters for 11 Niedźwiedź classification types during the cold half-years in the analyzed period. Studies of daily wind speed for the cold half-year have shown that the lowest wind speed occurs during the advection from sector S–SW which is caused by the local topography (surrounded by highlands from the South, North and West—see Figure 1b). The weak wind in the valley was also frequent at stagnant anticyclonic situations (type Ca + Ka). The conditional probability of the occurrence of a daily wind speed below 1 $m \cdot s^{-1}$ was

the highest for the circulation types S + SWa and Ca + Ka, slightly above 30%. For the other types, except for the S + SWc and W + NWa types, the conditional probability did not exceed 5% (for the S + SWc and W + NWa types equal 14% and 10%, respectively). The highest average value of the daily speed was determined for the type of circulation W + NWc, equal to 5 $m \cdot s^{-1}$.

The analysis of the mean daily cloudiness for the individual circulation types pointed out that the greatest variability of this parameter occurred for the types S + SWa, Ca + Ka and E + SEa (interquartile ranges were greater than 4 oktas). On the other hand, the lowest variability of daily cloudiness was observed for cyclonic types with advection from sectors E–SE and W–NW, as well as for low-pressure center and cyclonic troughs (interquartile range for these types ranged from 0.7 to 1.6 oktas). The conditional probability of a day with daily cloudiness not exceeding 2 oktas was the highest for the circulation types S + SWa and Ca + Ka, equal to 28% and 26%, respectively. The results obtained are consistent with the research of a longer multiyear period [28].

The median of the daily sum of precipitation differs significantly for cyclonic and anticyclonic conditions; for anticyclonic types, the value did not exceed 1 mm/day. The highest value of the median daily precipitation was determined for the types Cc + Bc and E + SEc, equal to 2.5 mm/day. The percentage of days with daily precipitation above 0.1 mm/day was the lowest for anticyclonic types S + SWa and Ca + Ka, equal to 16% and 18%, respectively. For cyclonic types, except for the type S + SWc, the share of days with precipitation in the cold half-years was greater than 70%. A significantly lower share of days with precipitation for the S + SWc type equal to 53% is related to the orographic barrier of the Western Carpathians, which as a result affects the air temperature and the humidity of the air masses and spatial distribution of the atmospheric precipitation [76].

The distribution of the daily relative humidity at the ground level in the cold half-years is similar for most circulation types, except types N + NEc, E + SEc, Cc + Bc and x for which a higher daily humidity was observed. For the selected circulation types, the lower quartile of daily relative humidity ranged from 83% to 87%, while the average value of the lower quartile for the remaining types is equal to 78%.

Analysis of the daily air temperature showed that the largest interquartile range was measured for Ca + Ka and E + SEa types. It should also be noted that for the selected types the value of the lower quartile was the smallest, equal to −4.6 and −3.9 °C, for the types E + SEa and Ca + Ka, respectively. Low values of the daily air temperature for the Ca + Ka type are associated with strong radiative cooling of the surface with the cloudless sky. For days with anticyclonic condition with advection from sector E-SE, in most cases, the analyzed region is under the influence of a strong high-pressure center developed over the area of Eastern Europe and then moved into the West. For this circulation type, advection of polar continental air masses dominates (more than 75% of the cases). On the other hand, the highest values of the median daily air temperature occurred for the types Cc + Bc, W + NWc and S + SWc, equal to 3.9, 4.2 and 4.4 °C, respectively.

The analysis of the vertical profiles obtained from the ERA5 reanalysis indicated that the relative air humidity at pressure levels 925 and 850 hPa strongly depends on the direction of advection, during the day and nighttime periods. The air masses moving from the S-SW sector (for cyclonic and anticyclonic conditions) are characterized by much lower relative humidity than for the other types of circulation (the median value of relative humidity at 925 hPa at 12 UTC for both types were equal to 58 and 67%, respectively, while for the others it was within the range from 77% to 95%). Significant fluctuations in relative air humidity were also observed for stagnant anticyclonic situations (Ca + Ka) and anticyclonic conditions with advection from the W-NW sector at 0 UTC in the pressure level 850 hPa.

It should also be mentioned that for days with advection from the S–SW sector during the daytime and nighttime period, a strong decrease in relative humidity is visible in the layer 975–925 hPa. During the night, at 0 UTC, the median of relative humidity gradient

between the levels 925 and 975 hPa for the selected types was lower than −13%, while for the remaining types, the humidity gradient varied between −5% and 4%.

During the day with advection from sector S–SW, a higher relative humidity gradient was observed compared to the remaining circulation types in the layer 925–850 hPa.

Analysis of air temperature at pressure levels 975, 925, and 850 hPa indicated that during the daytime air temperature at the height of 925 hPa is significantly higher for days with advection from the S-SW direction, than for the other types.

The median of the vertical temperature gradient in the layer 925–975 hPa during the night was the highest with the advection from the S–SW sector. During the day, the largest share of days with a positive vertical gradient was observed for the type S + SWa, equal to 30%. The statistically significant share of days with low thermal inversion was also observed for the types E + SEa and Ca + Ka, close to 16%.

Taking into account the distribution of all meteorological parameters for 11 Niedźwiedź classification types, the types Ca + Ka and S + SW (cyclonic and anticyclonic situation) are potentially the most important circulation patterns affecting the deterioration of air quality in the city. For the selected types, weaker wind speed at the ground level, higher frequency of thermal inversions, and stronger negative gradient of relative air humidity were observed in comparison with the remaining circulation patterns. The analysis also showed that the type E + SEa type can have a significant impact on air quality due to the occurrence of low daily air temperatures for this type of circulation.

Group 1: days with the highest PM_{10} concentration.

Table A4 presents the conditional probability of the occurrence of high PM_{10} mean daily concentration for individual types of atmospheric circulation during cold half-year, in the period 2000–2020, according to the Niedźwiedź classification.

Among the 11 types of circulation, only 5 types had the frequency greater than 10% in the cold half-year (S + SWa, W + NWa, Ca + Ka, S + SWc and W + NWc; Figure A4 in Appendix B). The worst air pollution conditions, that is, situations with the highest conditional probability of occurrence of high PM_{10} concentration in Kraków were almost the same: S + SWa (0.52), S + SWc and Ca + Ka (almost 0.4), and W + NWa (0.2), indicating that situations with air advection from the western sector, regardless of the baric center type, have less impact on the deterioration of air quality in the city than other types of circulation most frequent.

The highest number of days with PM_{10} concentration greater than the upper quartile in a cold half-year and exceeding daily limit value of PM_{10} occurred in December and January (162 and 195 days, respectively); the number of cases in November, February and March was similar: 140 days on average. The smallest number of such days was observed in October: 65 days.

Table A4. Conditional probability of the occurrence of high PM_{10} concentration during particular atmospheric circulation types during the cold half-year according to Niedźwiedź classification, number of days with selected circulation type and the number of days with high PM_{10} concentration for individual circulation types in the period 2000–2020.

Circulation Type	Conditional Probability	Number of Days with High PM_{10} Concentration	Total Number of Days in Cold Half-Year
N + NEa	0.06	12	196
E + SEa	0.14	50	354
S + SWa	0.52	202	386
W + NWa	0.20	114	562
Ca + Ka	0.39	171	441

Table A4. *Cont.*

Circulation Type	Conditional Probability	Number of Days with High PM_{10} Concentration	Total Number of Days in Cold Half-Year
N + NEc	0.14	26	190
E + SEc	0.12	21	170
S + SWc	0.37	149	403
W + NWc	0.04	22	521
Cc + Bc	0.14	49	348
x	0.35	26	74
Total number of days		842	3645

Figures A12 and A13 present the weather conditions from the Balice synoptic station for each circulation type in division into three groups: days with high PM_{10} concentration (Group 1), days with a significant improvement of air quality (Group 2) and remaining days. Comparison of wind conditions for days assigned to Group 1 with the remaining days for four dominant circulation types (boxplots in blue frames in Figure A12a) has shown that these days are characterized by the weakest daily wind speed in the cold half-year. The Mann–Whitney U test calculated for days assigned to Group 1 and the remaining days for wind speed also confirmed that both groups differ statistically significantly for the four circulation types (p-value did not exceed 0.002; Table A5); however, it should be noted that wind speed distribution for circulation patterns S + SWa, S + SWc, and Ca + Ka did not differ significantly between the days from Group 1 and remaining days (the maximum difference of median and upper quartile was equal to 0.2 $m \cdot s^{-1}$ and 0.7 $m \cdot s^{-1}$, respectively). During the anticyclonic conditions with air advection from W–NW sector (type W + NWa) differences of wind speed distribution between days from Group 1 and remaining days were the highest from all four selected patterns (maximum difference of median and upper quartile was equal to 1.2 $m \cdot s^{-1}$ and 1.6 $m \cdot s^{-1}$, respectively). Studies of daily air temperature have shown that for days with high PM_{10} concentration for four selected patterns was lower than for the remaining days, the difference of median values ranged from 1.2 °C for type S + SWa to 3.3 °C for type Ca + Ka. It is also worth mentioning that the lowest daily air temperatures occurred for type Ca + Ka, which was partly related to small cloudiness during these days.

Detailed analysis of atmospheric precipitation showed that for anticyclonic conditions (types S + SWa, Ca + Ka, and W + NWa), the share of days with precipitation greater than 0.1 mm/day did not exceed 17% of all days in Group 1, and, moreover, precipitation occurred mostly at nighttime period (more than 90% of all cases). The median and upper quartile values of daily precipitation for these types of circulation were equal on average 0.6 mm and 1.6 mm, respectively. For the remaining days, the share of days with precipitation for types S + SWa and Ca + Ka were similar to days in Group 1 (differences below 10%), while for types W + NWa and S + SWc, the share of days with precipitation was higher compared to days from Group 1 by 25% and 14%, respectively. The Mann–Whitney U test has proven that the distribution of the sum of precipitation for all four types of circulation was similar for days assigned to Group 1 and for the remaining days.

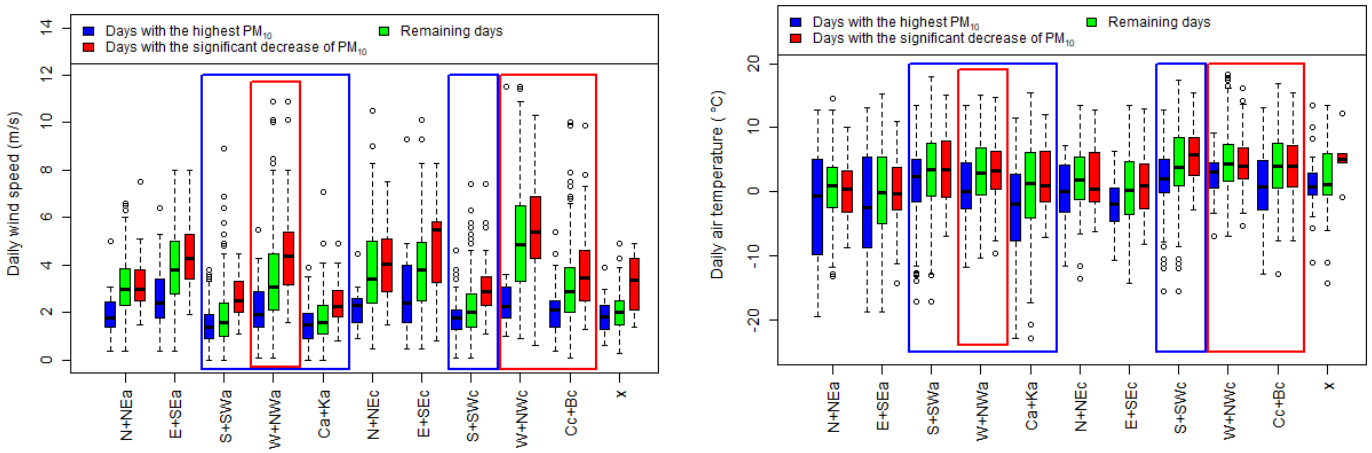


Figure A12. Boxplots of daily (**a**) wind speed and (**b**) air temperature for days with the highest PM_{10} concentration (Group 1), days with a significant decrease of PM_{10} (Group 2) and remaining days at cold half-year for 11 circulation types of Niedźwiedź classification for synoptic station Balice. The red and blue frames at subfigures a and b cover the dominant types of circulation in Group 1 and 2, respectively.

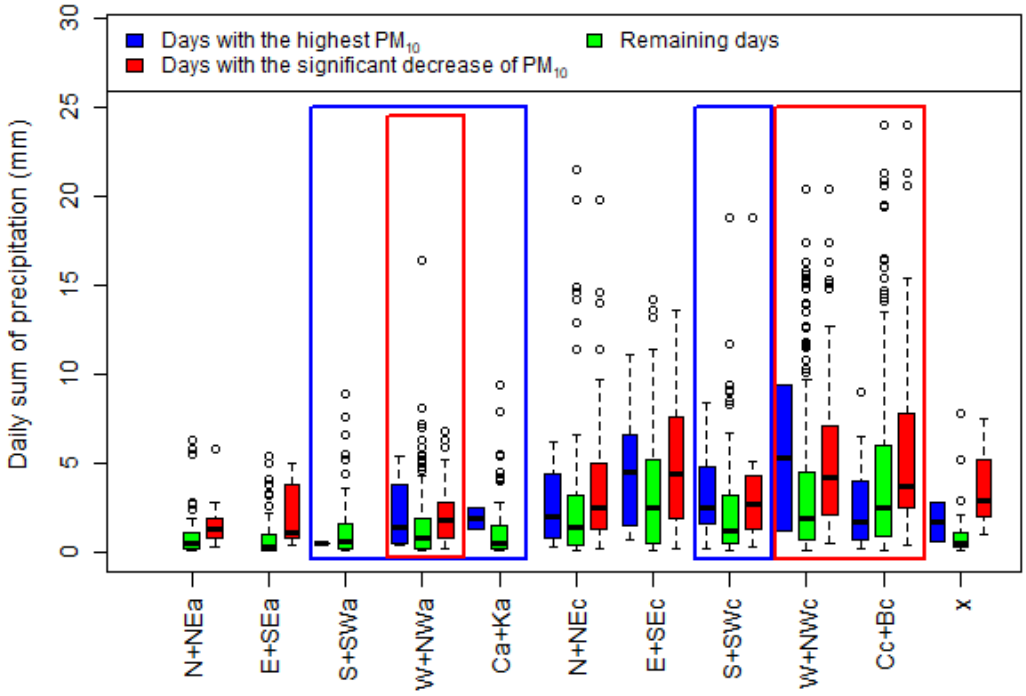


Figure A13. Boxplots of daily atmospheric precipitation for days with the highest PM_{10} concentration, days with a significant decrease of PM_{10} and remaining days during cold half-year for 11 circulation types of Niedźwiedź classification for synoptic station Balice. The red and blue frames cover the dominant types of circulation in both groups of days.

Table A5. A *p*-value calculated with the Mann–Whitney U test between days assigned to Group 1 and remaining days in cold half-year calculated for daily wind speed, air temperature and atmospheric precipitation for four selected Niedźwiedź circulation types.

Circulation Type	Wind Speed	Air Temp.	Precipitation
S + SWa	0.000	0.000	0.736
W + NWa	0.000	0.000	0.813
Ca + Ka	0.002	0.000	0.486
S + SWc	0.000	0.000	0.748

The duration of near-ground thermal inversion for selected circulation patterns for days with the highest PM_{10} concentration, days with significant improvement of air quality and remaining days for day (from 6 to 17 UTC) and nighttime (from 18 to 5 UTC on the next day) were presented at Figure A14. For this purpose, air temperature measurements from the TV mast from two altitudes (2 and 100 m a.g.l.) were used. The lower limit of the occurrence of thermal inversion was set equal to +1 °C. The results presented in Figure A14 show that duration of thermal inversion at day is longer by 3–6 h for days in Group 1 compared to the remaining days for 3 of 4 selected circulation patterns (S + SWa, W + NWa, S + SWc). Furthermore, during days with air advection from sector S-SW (cyclonic and anticyclonic conditions), thermal inversion in special cases persisted for the whole daytime.

The duration of thermal inversion at night for days from Group 1 was the longest for days with circulation type S + SWa. For types S + SWc and W + NWa in most cases, the duration of thermal inversion was greater than 6 h.

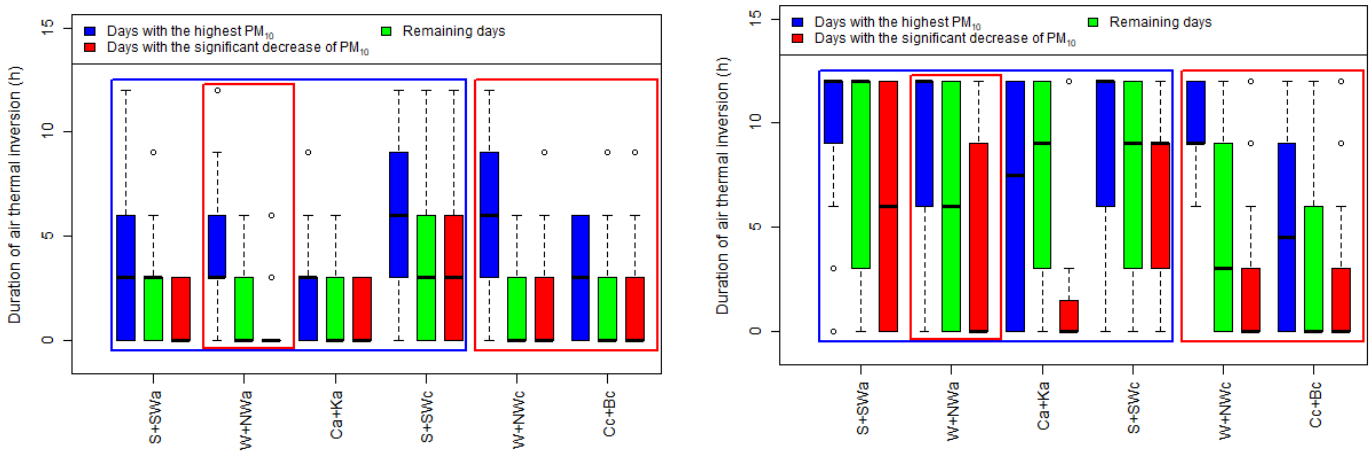


Figure A14. Boxplots of air temperature near-ground inversion duration during daytime (**a**) and nighttime (**b**) according to the data from TV mast for selected Niedźwiedź circulation types for days with the highest PM_{10} concentration (Group 1), days with significant decrease of PM_{10} (Group 2) and remaining days during cold half-year in the period 2010–2020. The red and blue frames at subfigures a and b cover the dominant types of circulation in Group 1 and 2, respectively.

ERA5 reanalysis was used to analyze atmospheric stratification in the lower troposphere, in the first approach only thermal stratification was analyzed; however, the Random Forests machine learning methods presented in the previous subsection have pointed out that air humidity stratification and vertical wind profile were also crucial factors; therefore, the analysis has been extended. Boxplots of the air temperature and relative air humidity gradient for selected circulation types have been presented in Figures A15 and A16. Analysis of the air temperature gradient in the layer 925–975 hPa has shown that atmospheric

stability was stronger during night (00:00 UTC current day) and day (12:00 UTC) for all selected circulation types for days in Group 1 than for remaining days (Figure A15a,b, boxplots in blue frames). The differences in the median temperature gradient in the layer 975–925 hPa during the daytime ranged from 1 °C for type S + SWc to 2.5 °C for type S + SWa. On average, for more than 25% of days in Group 1, for four dominant circulation patterns, the temperature gradient in the layer 925–975 hPa was positive during the daytime. In the upper layer (850–925 hPa), the differences in thermal stratification between days assigned to Group 1 and the remaining days were not significant. The highest share of upper thermal inversion during the day for days assigned to Group 1 occurred for Ca + Ka type (56%); for the remaining types of circulation, the frequency of upper inversion was in the range from 39% to 43%.

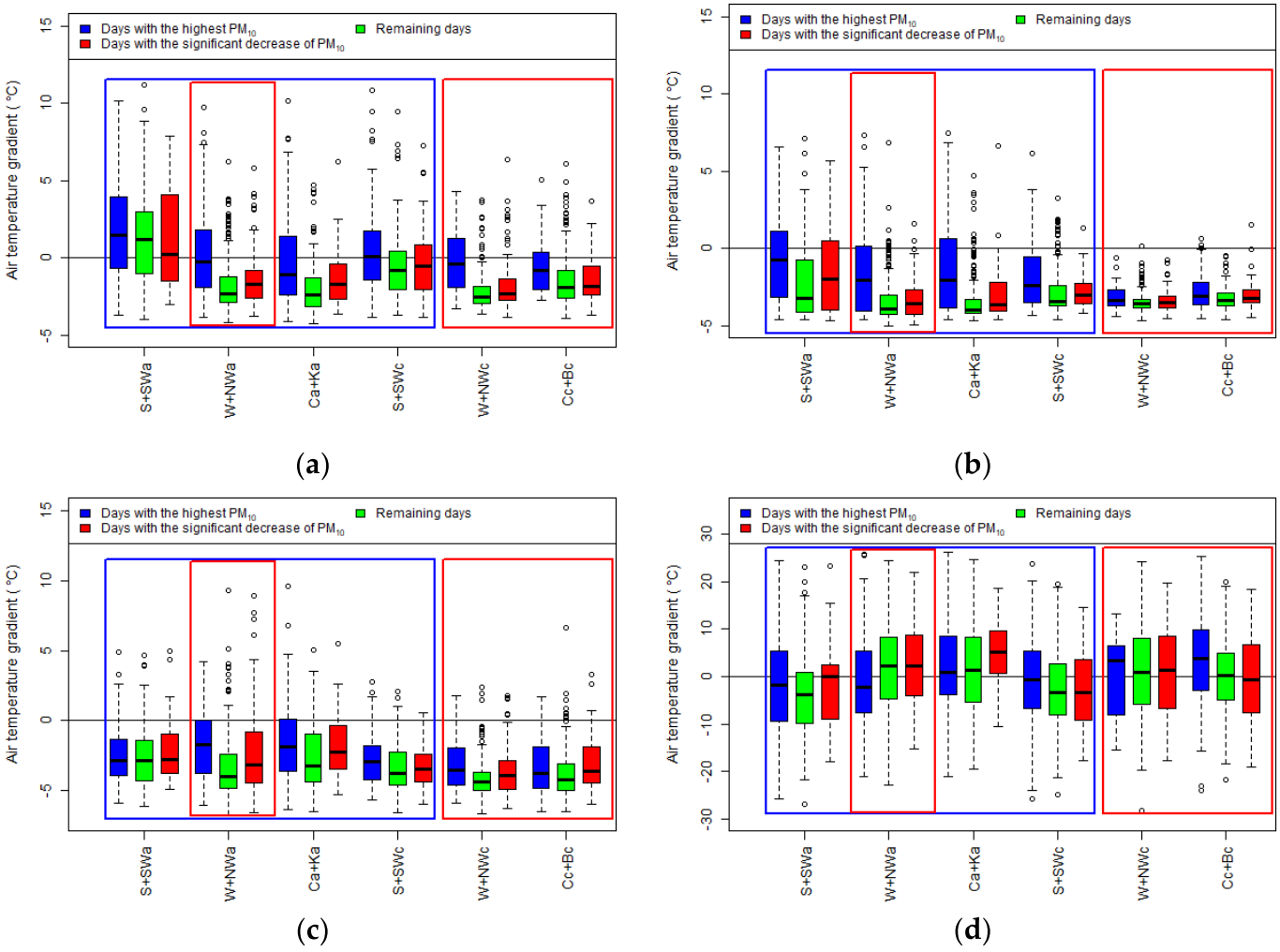


Figure A15. Boxplot of air temperature gradient for selected circulation types for days with high PM_{10} concentration (Group 1), days with significant improvement of air quality (Group 2) and remaining days at cold half-year for layer 925–975 hPa at 00:00 UTC (**a**) and 12:00 UTC (**b**) and for layer 850–925 hPa at 00:00 UTC (**c**) and 12:00 UTC (**d**) from ERA5 reanalysis data for Kraków city.

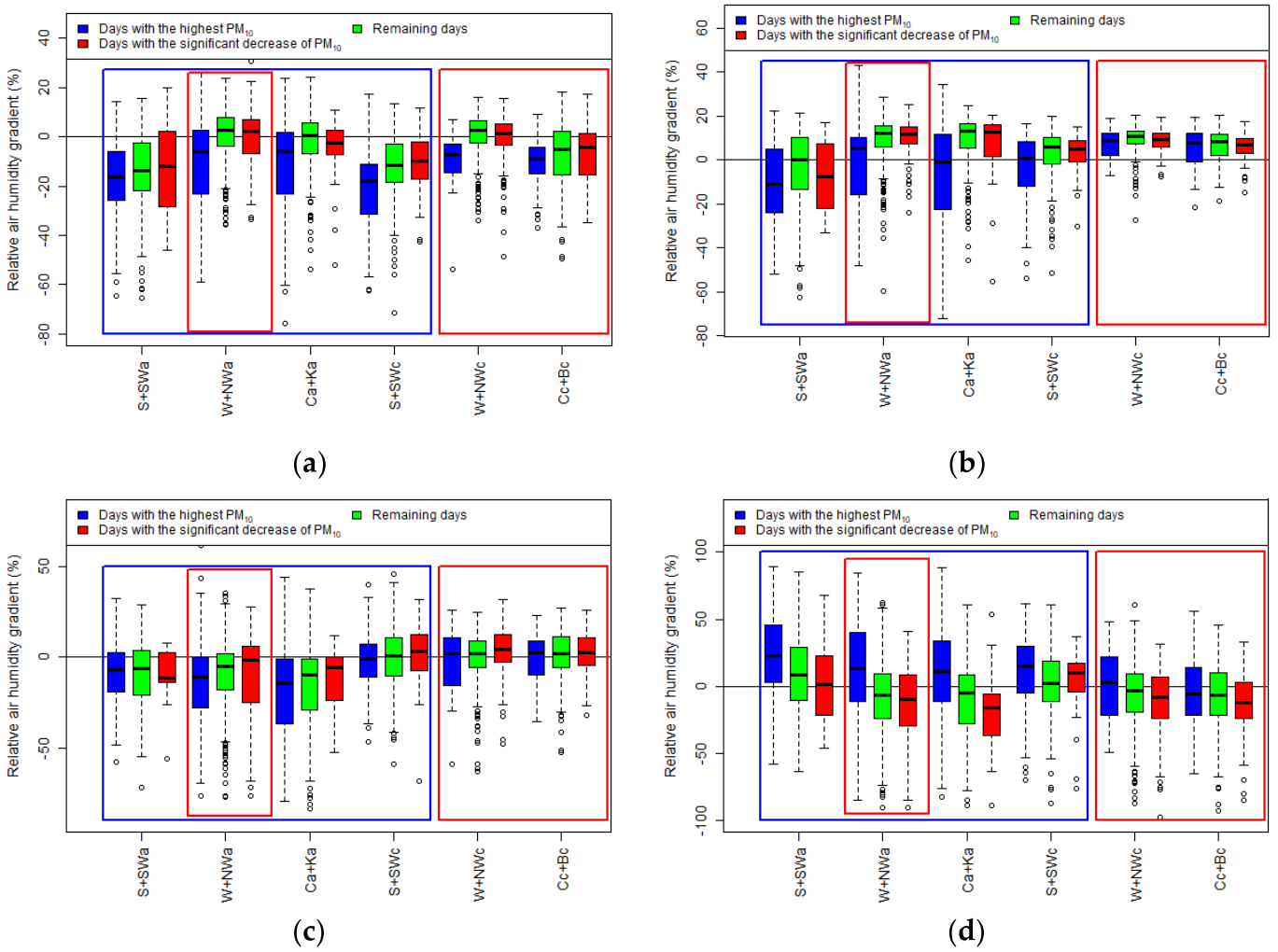


Figure A16. Boxplot of relative air humidity gradient for selected circulation types for days with high PM_{10} concentration (Group 1), days with significant improvement of air quality (Group 2), and remaining days at cold half-year for layer 925–975 hPa at 00:00 UTC (**a**) and 12:00 UTC (**b**) and for layer 850–925 hPa at 00:00 UTC (**c**) and 12:00 UTC (**d**) current day from ERA5 reanalysis data for Kraków city.

Air humidity stratification during days assigned to Group 1 presented for four types of circulation during the nighttime is characterized by a stronger decrease of humidity in layer 925–975 than during the remaining days. Furthermore, during the day, for days with high PM_{10} concentration, local minimum of relative air humidity at the level of 925 hPa occurred frequently.

The number of cases in which relative air humidity in the 925–975 hPa layer was lower than in the neighboring layer (975- 850 hPa) by at least 10%, ranging from 18% for the S + SWc to 43% for S + SWa type. The percentage of such cases during the day and night for days with high levels of PM_{10} and days not assigned to both special groups is presented in Table A6.

Table A6. Frequency of days with a minimum of air relative humidity at 925–975 hPa during daytime and nighttime for days with high PM_{10} concentration and remaining days for selected Niedźwiedź circulation types.

Circulation Type	Days with the Highest PM_{10} Concentration (%)		Remaining Days (%)	
	00:00 UTC	12:00 UTC	00:00 UTC	12:00 UTC
S + SWa	5	44	8	19
W + NWa	4	25	2	4
Ca + Ka	4	33	4	5
S + SWc	15	18	16	10

Analysis of relative air humidity at the level of 925 hPa for days assigned for Group 1 indicated that for the types S + SWa, W + NWa and Ca + Ka median values were significantly lower during the day and night in comparison with the days not assigned for both groups (the greatest difference in medians equal to 25% during day and night was observed for type W + NWa). Furthermore, for the days in Group 1 with circulation type W + NWa and Ca + Ka, the distribution of relative humidity was characterized by a significantly wider interquartile range than for the remaining days. The average daily value of the interquartile range for both selected types was equal 41% and 23% for days in Group 1 and remaining days, respectively. In the case of the circulation type S + SWc, the relative humidity distribution was similar for both groups of days (Group 1 and the remaining days). The relative humidity distribution at the level of 925 hPa for selected types of circulation was presented in Figure A17a). Analysis of the air temperature distribution at the level of 925 hPa for selected circulation types showed no significant differences for days assigned to Group 1 and the remaining days (Figure A17b). The study of the wind speed distribution at the level of 925 hPa for four types of circulation pointed out that the differences of this parameter between days in Group 1 and the remaining days are lower during the day than at night. The greatest differences of the wind speed distribution between days in Group 1 and remaining days at night were observed for W + NWa and S + SWc types. The median values of wind speed at night for days assigned to Group 1 were lower by 3.3 $m \cdot s^{-1}$ and 2.3 $m \cdot s^{-1}$ for W + NWa and S + SWc, respectively (not shown in the article). Furthermore, the analysis of the wind speed difference in layer between 925 and 975 hPa indicated that in the nighttime the wind shear was significantly weaker for the W + NWa and S + SWc types, while in the daytime period the distribution was similar or slightly higher than for the remaining days. For the Ca + Ka type, wind shear was the lowest among the four distinguished circulation types.

Group 2: days with highest decrease of PM_{10} concentration.

The second Group of days selected in the cold half-year consists of days during which a significant decrease in daily PM_{10} concentration occurred in comparison with the previous day. Table A7 presents the conditional probability of the occurrence in a large decrease of PM_{10} concentration for individual types of atmospheric circulation, the number of days with a particular type of circulation and number of days with a significant decrease in PM_{10} concentration for individual types of circulation.

The significant improvement of the dispersion conditions occurred mostly with air advection from the W–NW sector at cyclonic and anticyclonic conditions and nonadvection cyclonic types (Cc + Bc). It is worth mentioning that during circulation type W + NWa the highest levels of PM_{10} concentration occurred, too. The highest conditional probability in significant decrease of PM_{10} concentration was obtained for cyclonic types Cc + Bc and W + NWc (0.29 and 0.25, respectively).

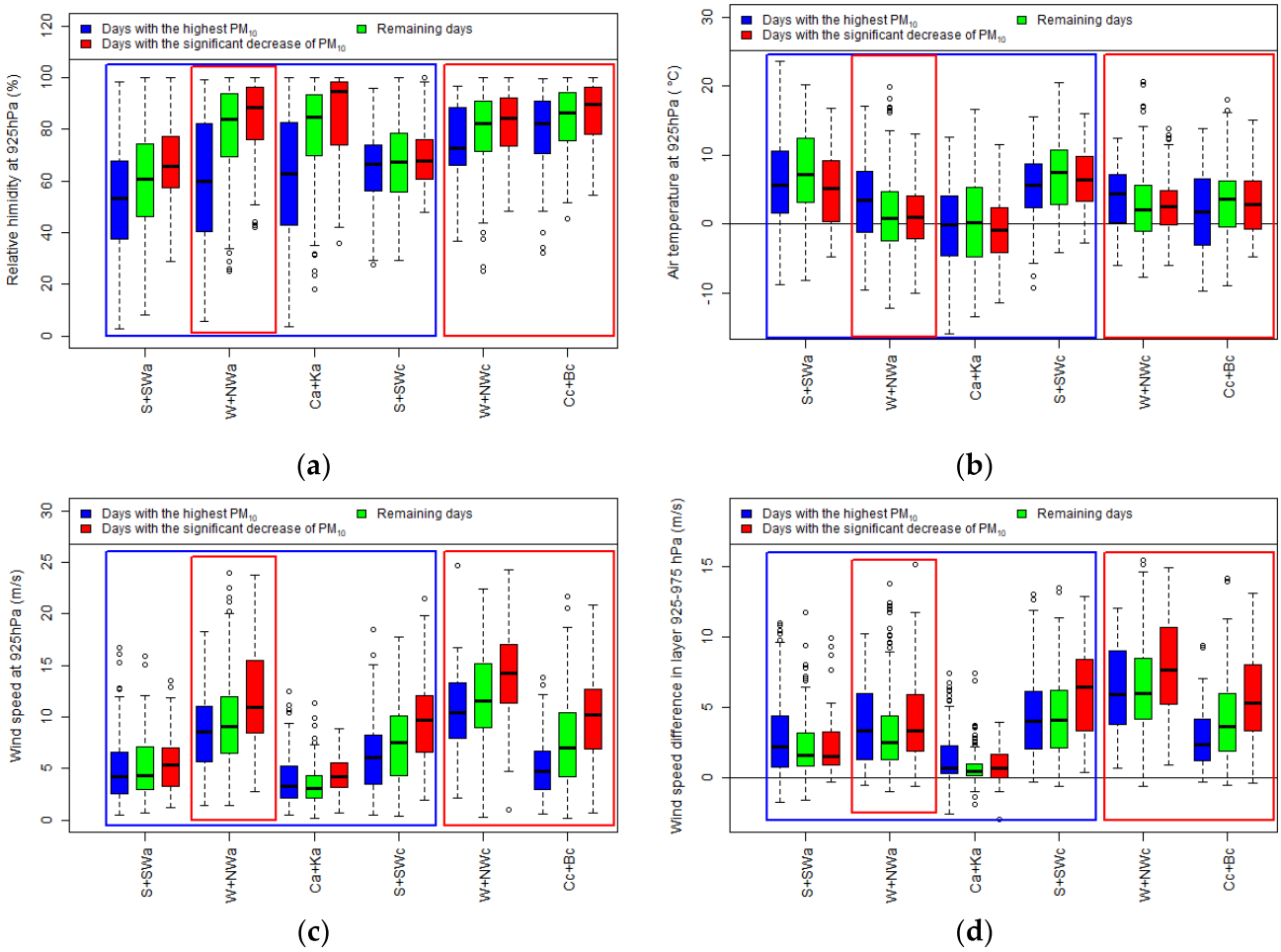


Figure A17. Boxplot of relative air humidity (**a**), air temperature (**b**), wind speed (**c**) at 925 hPa and wind speed differences between 925 and 975 hPa (**d**) at 12:00 UTC for selected circulation types for days with high PM_{10} concentration (Group 1), days with significant improvement of air quality (Group 2) and remaining days at cold half-year for layer 925–975 hPa from ERA5 reanalysis data for Kraków city.

It should be mentioned that the number of days that meet the conditions of significant pollution decrease (more than 25% decrease and at least 20 $\mu g \cdot m^{-3}$) in individual months in the cold half-year is not even; the smallest number of cases meeting the criteria occurred in October (67 days), a similar number of days was selected for the months of November, February, and March (more than 100 days) and the highest number for the period from December to January (more than 120 days).

Analysis of weather conditions from the Balice synoptic station for selected circulation types (Figures A12 and A13; boxplots in red frame) showed that air temperature did not differ significantly for days with a significant decrease of PM_{10} (Group 2) compared to days not assigned to both specific groups (remaining days). The *p*-value calculated with the Mann–Whitney U with significance level $\alpha = 0.05$ test has also confirmed the similarity of both groups for these meteorological parameters (Table A8). The *p*-values obtained for wind speed and atmospheric precipitation were lower than 0.05, which pointed out that distribution in selected groups is statistically different. For the air temperature groups, the *p*-value were highest. The daily wind speed distribution for three selected circulation patterns were higher for days in Group 2 compared to the remaining days. The highest differences were observed for circulation type W + NWa (the median and upper quartile for this group were higher by 1.3 $m \cdot s^{-1}$ and 0.8 $m \cdot s^{-1}$), while for the remaining types (W + NWc and Cc + Bc), the wind speed was on average higher by 0.5 $m \cdot s^{-1}$.

Table A7. Frequency of days with minimum of air relative humidity at 925–975 hPa during daytime and nighttime for days with high PM_{10} concentration and remaining days for selected Niedźwiedź circulation types.

Circulation Type	Conditional Probability	Number of Days with High PM_{10} Concentration	Total Number of Days in Cold Half-Year
N + NEa	0.18	35	196
E + SEa	0.15	53	354
S + SWa	0.06	25	386
W + NWa	0.17	96	562
Ca + Ka	0.06	28	441
N + NEc	0.31	58	190
E + SEc	0.25	43	170
S + SWc	0.13	54	403
W + NWc	0.29	150	521
Cc + Bc	0.25	86	348
x	0.08	6	74
Total number of days		634	3645

The number of days with precipitation for days in Group 2 compared to days not assigned to both groups for dominant circulation patterns was higher by 18% on average. For the type W + NWa, the number of days with precipitation above 0.1 mm/day was equal to 53% of all days, and for the cyclonic types W + NWc and Cc + Bc it was equal to 84% and 88%, respectively. The sum of daily precipitation for the distinguished types was higher than for the remaining days, the smallest increase was observed for the anticyclonic type W + NWa (greater on average by 0.5 mm/day), while for the cyclonic types, the daily sum of precipitation was greater by more than 1 mm/day. The frequency of rainfall during the day and night was similar for all the distinguished types in Group 2.

Table A8. *p*-value calculated with the Mann–Whitney U test between days assigned to Group 2 and days not assigned to both groups in the cold half-year calculated for daily wind speed, air temperature and atmospheric precipitation for three selected circulation types from Niedźwiedź classification.

Circulation Type	Wind Speed	Air Temp.	Precipitation
W + NWa	0.000	0.750	0.013
W + NWc	0.005	0.918	0.000
Cc + Bc	0.000	0.871	0.008

Analysis of intra-valley thermal stratification from TV mast data (up to 100 m a.g.l.) indicated that the length of the near-ground inversion persistence did not exceed 3 h for most of the cases. The duration of inversion in the night period was shorter for all the selected circulation types for days with a significant decrease in PM_{10} compared to the reference group that contained the remaining days (Figure A13; boxplots in red frames).

Analysis of the ERA5 data indicated that the vertical gradient of temperature and relative humidity did not differ significantly for the group of days with a significant improvement in air quality compared to days not assigned to both groups (Figures A15 and A16 in Appendix D; data in red frames). Low thermal inversion in the 975–925 hPa layer during the nighttime period did not exceed 20% of all days for the selected types, and during the daytime, low thermal inversion almost did not occur. Upper thermal inversions in the layer 925–850 hPa during daytime accounted for more than 50% of cases, with the highest share

equal to 60% for the W + NWa type. The vertical profile of relative humidity during the day was characterized by the local maximum at 925 hPa, the median relative humidity gradient in layers 975–925 hPa and 925–850 hPa was equal on average to +9% and −9%, respectively. The largest number of days, where relative humidity at the level of 925 hPa was higher than neighboring levels by at least 10%, occurred for the W + NWa type, equal to 33%, and the other types accounted for 17% of cases, on average. For the group of remaining days, similar humidity stratification, with local maximum relative humidity at 925 hPa, constituted from 20% for Cc + Bc to 28% for W + NWa type.

Analysis of relative humidity and air temperature at 925 hPa level during the daytime and nighttime period for the three distinguished circulation types did not show significant differences for the days assigned to Group 2 and the remaining days. The distribution wind speed at a pressure level of 925 hPa is for days in Group 2, for all selected types was higher during the day and night in comparison with the remaining days. The wind speed at night and day for all selected circulation types was on average higher by 1.4 $m \cdot s^{-1}$ and 2.6 $m \cdot s^{-1}$ than for the remaining days, respectively (Figure A17c in Appendix D). Furthermore, the wind shear connected to the wind speed change in layer 925–975 hPa was stronger for days with the circulation type W + NWc and Cc + Bc during day and night for days in Group 2 compared to the remaining days.

References

1. Toro, R.; Kvakic, M.; Klaic, Z.B.; Koracin, D.; Morales, R.G.E.; Leiva, M.A. Exploring atmospheric stagnation during a severe particulate matter air pollution episode over complex terrain in Santiago, Chile. *Environ. Pollut.* **2019**, *244*, 705–714. [CrossRef] [PubMed]
2. Xu, Y.W.; Zhu, B.; Shi, S.S.; Huang, Y. Two Inversion Layers and Their Impacts on PM2.5 Concentration over the Yangtze River Delta, China. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **2019**, *58*, 2349–2362. [CrossRef]
3. Ormanova, G.; Karaca, F.; Kononova, N. Analysis of the impacts of atmospheric circulation patterns on the regional air quality over the geographical center of the Eurasian continent. *Atmos. Res.* **2020**, *237*, 104858. [CrossRef]
4. Hadi-Vencheh, A.; Tan, Y.; Wanke, P.; Loghmanian, S.M. Air pollution assessment in China: A novel group multiple criteria decision making model under uncertain information. *Sustainability* **2021**, *13*, 1686. [CrossRef]
5. Zhou, G.; Wu, J.; Yang, M.; Sun, P.; Gong, Y.; Chai, J.; Zhang, J.; Afrim, F.-K.; Dong, W.; Sun, R.; et al. Prenatal exposure to air pollution and the risk of preterm birth in rural population of Henan Province. *Chemosphere* **2022**, *286*, 131833. [CrossRef] [PubMed]
6. Li, G.A.; Wu, H.B.; Zhong, Q.; He, J.L.; Yang, W.J.; Zhu, J.L.; Zhao, H.H.; Zhang, H.S.; Zhu, Z.Y.; Huang, F. Six air pollutants and cause-specific mortality: A multi-area study in nine counties or districts of Anhui Province, China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2021**, *29*, 468–482. [CrossRef]
7. Jeong, S.J. The Impact of Air Pollution on Human Health in Suwon City. *Asian J. Atmos. Environ.* **2013**, *7*, 227–233. [CrossRef]
8. Vicente, A.B.; Juan, P.; Meseguer, S.; Diaz-Avalos, C.; Serra, L. Variability of PM10 in industrialized-urban areas. New coefficients to establish significant differences between sampling points. *Environ. Pollut.* **2018**, *234*, 969–978. [CrossRef] [PubMed]
9. Penenko, A.; Penenko, V.; Tsvetova, E.; Gochakov, A.; Pyanova, E.; Konopleva, V. Sensitivity Operator Framework for Analyzing Heterogeneous Air Quality Monitoring Systems. *Atmosphere* **2021**, *12*, 1697. [CrossRef]
10. Wang, Y.S.; Yao, L.; Wang, L.L.; Liu, Z.R.; Ji, D.S.; Tang, G.Q.; Zhang, J.K.; Sun, Y.; Hu, B.; Xin, J.Y. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China. *Sci. China-Earth Sci.* **2014**, *57*, 14–25. [CrossRef]
11. Masiol, M.; Agostinelli, C.; Formenton, G.; Tarabotti, E.; Pavoni, B. Thirteen years of air pollution hourly monitoring in a large city: Potential sources, trends, cycles and effects of car-free days. *Sci. Total Environ.* **2014**, *494*, 84–96. [CrossRef] [PubMed]
12. Tveito, O.E.; Huth, R.; Philipp, A.; Post, P.; Pasqui, M.; Esteban, P.; Beck, C.; Demuzere, M.; Prudhomme, C. *COST Action 733 Harmonization and Application of Weather Type Classifications for European Regions*; Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH: Potsdam, Germany, 2016; pp. 243–249.
13. Li, X.; Xia, X.; Wang, L.; Cai, R.; Zhao, L.; Feng, Z.; Ren, Q.; Zhao, K. The role of foehn in the formation of heavy air pollution events in Urumqi, China. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2015**, *120*, 5371–5384. [CrossRef]
14. Lesniok, M.; Malarzewski, L.; Niedzwiedz, T. Classification of circulation types for Southern Poland with an application to air pollution concentration in Upper Silesia. *Phys. Chem. Earth* **2010**, *35*, 516–522. [CrossRef]
15. Vautard, R.; Colette, A.; van Meijgaard, E.; Meleux, F.; van Oldenborgh, G.J.; Otto, F.; Tobin, I.; Yiou, P. Attribution of wintertime anticyclonic stagnation contributing to air pollution in western europe. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2018**, *99*, S70–S75. [CrossRef]
16. Garrido-Perez, J.M.; Ordonez, C.; Garcia-Herrera, R.; Barriopedro, D. Air stagnation in Europe: Spatiotemporal variability and impact on air quality. *Sci. Total Environ.* **2018**, *645*, 1238–1252. [CrossRef] [PubMed]
17. Horton, D.E.; Skinner, C.B.; Singh, D.; Diffenbaugh, N.S. Occurrence and persistence of future atmospheric stagnation events. *Nat. Clim. Chang.* **2014**, *4*, 698–703. [CrossRef] [PubMed]

18. Lee, D.; Wang, S.Y.; Zhao, L.; Kim, H.C.; Kim, K.; Yoon, J.H. Long-term increase in atmospheric stagnant conditions over northeast Asia and the role of greenhouse gases-driven warming. *Atmos. Environ.* **2020**, *241*, 117772. [CrossRef]
19. Flocas, H.; Kelessis, A.; Helmis, C.; Petrakakis, M.; Zoumakis, M.; Pappas, K. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area. *Theor. Appl. Climatol.* **2009**, *95*, 265–277. [CrossRef]
20. Vergeiner, J. *South Foehn Studies and a New Foehn Classification Scheme in the Wipp and Inn Valley*; University of Innsbruck: Innsbruck, Austria, 2004.
21. Sekula, P.; Bokwa, A.; Ustrnul, Z.; Zimnoch, M.; Bochenek, B. The impact of a foehn wind on PM10 concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: A case study from Krakow, Poland. *Tellus Ser. B Chem. Phys. Meteorol.* **2021**, *73*, 1–26. [CrossRef]
22. *Air Quality in Europe—2020 Report*; EEA Report No 09/2020; European Environmental Agency: Luxembourg, 2020.
23. Chief Inspectorate for Environmental Protection. *Stan Środowiska w Województwie Małopolskim. Raport 2020 (The State of The Environment in the Lesser Poland Voivodeship. Report 2020)*; National Inspectorate for Environmental Protection: Kraków, Poland, 2020; p. 199.
24. Bokwa, A. Environmental impacts of long-term air pollution changes in Krakow, Poland. *Pol. J. Environ. Stud.* **2008**, *17*, 673–686.
25. Pietras, B. *Meteorologiczne Uwarunkowania Koncentracji Pyłu Zawieszonego w Powietrzu w Krakowie Oraz Próba Określenia Jego Pochodzenia*; Uniwersytet Pedagogiczny: Kraków, Poland, 2018.
26. Wielgosinski, G.; Czerwinska, J. Smog episodes in Poland. *Atmosphere* **2020**, *11*, 277. [CrossRef]
27. Lupikasza, E.; Niedzwiedz, T. Synoptic climatology of fog in selected locations of southern Poland (1966–2015). *Bull. Geogr. Phys. Geogr. Ser.* **2016**, *11*, 5–15. [CrossRef]
28. Matuszko, D.; Weglarczyk, S. Long-term variability of the cloud amount and cloud genera and their relationship with circulation (Krakow, Poland). *Int. J. Climatol.* **2018**, *38*, E1205–E1220. [CrossRef]
29. Niedźwiedź, T.; Ustrnul, Z. Change of Atmospheric Circulation. In *Climate Change in Poland*; Falarz, M., Ed.; Springer: Cham, Switerland, 2021.
30. Ustrnul, Z. *Atmospheric circulation conditions. InClimate of Kraków in the 20th Century*; Matuszko, D., Ed.; Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytet Jagielloński: Kraków, Poland, 2007; pp. 21–40.
31. Grange, S.K.; Carslaw, D.C.; Lewis, A.C.; Boleti, E.; Hueglin, C. Random forestmeteorological normalisation models for Swiss PM10 trend analysis. *Atmos. Chem. Phys.* **2018**, *18*, 6223–6239. [CrossRef]
32. Vu, T.V.; Shi, Z.B.; Cheng, J.; Zhang, Q.; He, K.B.; Wang, S.X.; Harrison, R.M. Assessing the impact of clean air action on air quality trends in Beijing using a machine learning technique. *Atmos. Chem. Phys.* **2019**, *19*, 11303–11314. [CrossRef]
33. Gariazzo, C.; Carlino, G.; Silibello, C.; Renzi, M.; Finardi, S.; Pepe, N.; Radice, P.; Forastiere, F.; Michelozzi, P.; Viegi, G.; et al. A multi -city air pollution population exposure study: Combined use of chemical-transport and random -Forest models with dynamic population data. *Sci. Total Environ.* **2020**, *724*, 138102. [CrossRef] [PubMed]
34. Hu, X.F.; Belle, J.H.; Meng, X.; Wildani, A.; Waller, L.A.; Strickland, M.J.; Liu, Y. Estimating PM2.5 Concentrations in the conterminous United States using the random forest approach. *Environ. Sci. Technol.* **2017**, *51*, 6936–6944. [CrossRef] [PubMed]
35. Joharestani, M.Z.; Cao, C.X.; Ni, X.L.; Bashir, B.; Talebiesfandarani, S. PM2.5 Prediction based on random forest, XGBoost, and deep learning using multisource remote sensing data. *Atmosphere* **2019**, *10*, 373. [CrossRef]
36. AlThuwaynee, O.F.; Kim, S.W.; Najemaden, M.A.; Aydda, A.; Balogun, A.L.; Fayyadh, M.M.; Park, H.J. Demystifying uncertainty in PM10 susceptibility mapping using variable drop-off in extreme-gradient boosting (XGB) and random forest (RF) algorithms. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2021**, *28*, 43544–43566. [CrossRef]
37. Stafoggia, M.; Johansson, C.; Glantz, P.; Renzi, M.; Shtein, A.; de Hoogh, K.; Kloog, I.; Davoli, M.; Michelozzi, P.; Bellander, T. A random forest approach to estimate daily particulate matter, nitrogen dioxide, and ozone at fine spatial resolution in Sweden. *Atmosphere* **2020**, *11*, 239. [CrossRef]
38. Lityński, J. *Numerical Classification of Circulation Types and Weather Types for Poland*; Pr. PIHM: Kraków, Poland, 1969; Volume 97, pp. 3–14.
39. Ustrnul, Z.; Wypych, A.; Czekierda, D. Composite circulation index of weather extremes (the example for Poland). *Meteorol. Z.* **2013**, *22*, 551–559. [CrossRef]
40. Beck, C.; Philipp, A. Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain. *Phys. Chem. Earth* **2010**, *35*, 374–387. [CrossRef]
41. Nowosad, M. Variability of the zonal circulation index over Central Europe according to the Lityński method. *Geogr. Pol.* **2017**, *90*, 417–430. [CrossRef]
42. Godłowska, J. *Influence of Meteorological Conditions on Air Quality in Krakow. Comparative Research and an Attempt at a Model Approach*; IMGW-PIB: Warsaw, Poland, 2019; p. 102.
43. Jaagus, J. Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. *Theor. Appl. Climatol.* **2006**, *83*, 77–88. [CrossRef]
44. Hyncica, M.; Huth, R. Long-term changes in precipitation phase in Europe in cold half year. *Atmos. Res.* **2019**, *227*, 79–88. [CrossRef]
45. Statistics Poland. *Area and Population in the Territorial Profile in 2021*; Statistics Poland: Warsaw, Poland, 2021; p. 25.
46. Hess, M. Climate of Kraków. *Folia Geogr. Ser. Geogr.-Phys. Kraków Pol.* **1974**, *8*, 45–102.

47. Oke, T.R. *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. Instrument and Observing Methods (IOM)*; Report No. 81, WMO/TD. No. 1250; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2006.
48. Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horanyi, A.; Munoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2020**, *146*, 1999–2049. [CrossRef]
49. Chief Inspectorate of Environmental Protection. Available online: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives (accessed on 12 March 2022).
50. European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council. *J. Eur. Union* **2008**.
51. Huth, R.; Beck, C.; Philipp, A.; Demuzere, M.; Ustrnul, Z.; Cahynova, M.; Kysely, J.; Tveito, O.E. Classifications of atmospheric circulation patterns recent advances and applications. *Trends Dir. Clim. Res.* **2008**, *1146*, 105–152. [CrossRef]
52. Philipp, A.; Bartholy, J.; Beck, C.; Erpicum, M.; Esteban, P.; Fettweis, X.; Huth, R.; James, P.; Jourdain, S.; Kreienkamp, F.; et al. Cost733cat-A database of weather and circulation type classifications. *Phys. Chem. Earth* **2010**, *35*, 360–373. [CrossRef]
53. Ustrnul, Z.; Czekierda, D.; Wypych, A. Extreme values of air temperature in Poland according to different atmospheric circulation classifications. *Phys. Chem. Earth* **2010**, *35*, 429–436. [CrossRef]
54. Pomona. Available online: https://github.com/silkeszy/Pomona (accessed on 12 March 2022).
55. Degenhardt, F.; Seifert, S.; Szymczak, S. Evaluation of variable selection methods for random forests and omics data sets. *Brief. Bioinform.* **2019**, *20*, 492–503. [CrossRef] [PubMed]
56. Akaike, H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In *Selected Papers of Hirotugu Akaike*; Parzen, E., Tanabe, K., Kitagawa, G., Eds.; Springer Series in Statistics; Springer: New York, NY, USA, 1998.
57. Cowell, F. *Measurement of Inequality*, 1th ed.; Atkinson, A.B., Bourguignon, F., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherland, 2000; p. 938.
58. Tangirala, S. Evaluating the impact of GINI index and information gain on classification using decision tree classifier algorithm. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* **2020**, *11*, 612–619. [CrossRef]
59. Zhang, D.D.; Shen, J.Q.; Liu, P.F.; Zhang, Q.; Sun, F.H. Use of fuzzy analytic hierarchy process and environmental gini coefficient for allocation of regional flood drainage rights. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 63. [CrossRef]
60. Wu, C.B.; Li, K.; Bai, K.X. Validation and calibration of CAMS PM2.5 forecasts using in situ PM2.5 measurements in China and United States. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 3813. [CrossRef]
61. Pappa, A.; Kioutsioukis, I. Forecasting particulate pollution in an urban area: From copernicus to sub-km scale. *Atmosphere* **2021**, *12*, 881. [CrossRef]
62. Czernecki, B.; Marosz, M.; Jedruszkiewicz, J. Assessment of machine learning algorithms in short-term forecasting of PM10 and PM2.5 concentrations in selected polish agglomerations. *Aerosol Air Qual. Res.* **2021**, *21*, 200586. [CrossRef]
63. Ustrnul, Z. Infulence of foehn winds on air-temperature and humidity in the Polish Carpathians. *Theor. Appl. Climatol.* **1992**, *45*, 43–47. [CrossRef]
64. Bokwa, A.; Wypych, A.; Hajto, M.J. Impact of natural and anthropogenic factors on fog frequency and variability in krakow, Poland in the years 1966–2015. *Aerosol Air Qual. Res.* **2018**, *18*, 165–177. [CrossRef]
65. Han, S.Q.; Hao, T.Y.; Zhang, Y.F.; Liu, J.L.; Li, P.Y.; Cai, Z.Y.; Zhang, M.; Wang, Q.L.; Zhang, H. Vertical observation and analysis on rapid formation and evolutionary mechanisms of a prolonged haze episode over central-eastern China. *Sci. Total Environ.* **2018**, *616*, 135–146. [CrossRef] [PubMed]
66. Kunin, P.; Alpert, P.; Rostkier-Edelstein, D. Investigation of sea-breeze/foehn in the Dead Sea valley employing high resolution WRF and observations. *Atmos. Res.* **2019**, *229*, 240–254. [CrossRef]
67. Stull, R.B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*; Springer: Dordrecht, The Netherland, 1988.
68. Wang, P.; Cao, J.J.; Tie, X.X.; Wang, G.H.; Li, G.H.; Hu, T.F.; Wu, Y.T.; Xu, Y.S.; Xu, G.D.; Zhao, Y.Z.; et al. Impact of meteorological parameters and gaseous pollutants on PM2.5 and PM10 mass concentrations during 2010 in Xi'an, China. *Aerosol Air Qual. Res.* **2015**, *15*, 1844–1854. [CrossRef]
69. Sekula, P.; Bokwa, A.; Bartyzel, J.; Bochenek, B.; Chmura, L.; Galkowski, M.; Zimnoch, M. Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in the urban boundary layer in a complex terrain. *Atmos. Chem. Phys.* **2021**, *21*, 12113–12139. [CrossRef]
70. Huang, K.Y.; Xiao, Q.Y.; Meng, X.; Geng, G.N.; Wang, Y.J.; Lyapustin, A.; Gu, D.F.; Liu, Y. Predicting monthly high-resolution PM2.5 concentrations with random forest model in the North China Plain. *Environ. Pollut.* **2018**, *242*, 675–683. [CrossRef] [PubMed]
71. Li, Y.; Chen, Q.L.; Zhao, H.J.; Wang, L.; Tao, R. Variations in PM10, PM2.5 and PM1.0 in an urban area of the sichuan basin and their relation to meteorological factors. *Atmosphere* **2015**, *6*, 150–163. [CrossRef]
72. Stafoggia, M.; Bellander, T.; Bucci, S.; Davoli, M.; de Hoogh, K.; de'Donato, F.; Gariazzo, C.; Lyapustin, A.; Michelozzi, P.; Renzi, M.; et al. Estimation of daily PM10 and PM2.5 concentrations in Italy, 2013–2015, using a spatiotemporal land-use random-forest model. *Environ. Int.* **2019**, *124*, 170–179. [CrossRef] [PubMed]
73. Banks, R.F.; Tiana-Alsina, J.; Rocadenbosch, F.; Baldasano, J.M. Performance evaluation of the boundary-layer height from lidar and the weather research and forecasting model at an urban coastal site in the north-east iberian peninsula. *Bound. Layer Meteorol.* **2015**, *157*, 265–292. [CrossRef]

74. Uzan, L.; Egert, S.; Khain, P.; Levi, Y.; Vadislavsky, E.; Alpert, P. Ceilometers as planetary boundary layer height detectors and a corrective tool for COSMO and IFS models. *Atmos. Chem. Phys.* **2020**, *20*, 12177–12192. [CrossRef]
75. Zhang, K.F.; The, J.; Xie, G.Y.; Yu, H.S. Multi-step ahead forecasting of regional air quality using spatial-temporal deep neural networks: A case study of Huaihai Economic Zone. *J. Clean. Prod.* **2020**, *277*, 123231. [CrossRef]
76. Zhou, Y.L.; Chang, F.J.; Chang, L.C.; Kao, I.F.; Wang, Y.S. Explore a deep learning multi-output neural network for regional multi-step-ahead air quality forecasts. *J. Clean. Prod.* **2019**, *209*, 134–145. [CrossRef]
77. Theil, H. A Rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. In *Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics. Advanced Studies in Theoretical and Applied Econometrics*; Raj, B., Koerts, J., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherland, 1992; Volume 23, pp. 345–381.
78. Hurtado, S. Package 'RobustLinearReg'. Available online: https://cran.r-project.org/web/packages/RobustLinearReg/RobustLinearReg.pdf (accessed on 15 November 2021).
79. Carslaw, D.C.; Ropkins, K. Openair—An R package for air quality data analysis. *Environ. Model. Softw.* **2012**, *27–28*, 52–61. [CrossRef]
80. Sulikowska, A.; Wypych, A. Seasonal variability of trends in regional hot and warm temperature extremes in europe. *Atmosphere* **2021**, *12*, 612. [CrossRef]
81. Niedźwiedź, T. *Synoptic Situations and their Impact on Spatial Differentiation of Selected Climate Elements in the Upper Vistula Basin*; Jagiellonian University: Kraków, Poland, 1981.
82. Lamb, H.H. *British Isles Weather Types and a Register of the Daily Sequence of Circulation Patterns 1861–1971*; Geophysical Memoirs: London, UK, 1972.
83. Pianko-Kluczynska, K. A new calendar of types of atmosphere circulation according to J. Lityński. *Wiadomości Meteorol. Hydrol. Gospod. Wodnej* **2007**, *1*, 65–85.