

STUDIE

*o příčinách a způsobu přeshraničního
přenosu znečištění*

SPOLEČNÁ ČESKO - POLSKÁ MĚŘENÍ PŘESHRANIČNÍHO
PŘENOSU ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK V OVZDUŠÍ

WSPÓLNE CZESKO - POLSKIE POMIARY TRANSGRANICZNEGO
TRANSPORTU ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA

AIRBORDER.VSB.CZ

CZ.11.4.120/0.0/0.0/15_006/0000118

Irena Pavlíková (Kapitoly 1, 2, 3.1, 3.3, 7)

Daniel Hladký (Kapitola 7)

Petra Šutarová (Kapitoly 2, 8)

Petr Jančík (Kapitola 6)

Dr. Leszek Ośródka (Kapitoly 3.2, 3.3, 4, 5)

Dr. Ewa Krajny (Kapitoly 3.2, 4, 5)

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2020

Obsah

1	Projekt AIR BORDER	6
2	Úvod	7
3	Zájmová oblast projektu a měřicí stanoviště	9
3.1	Popis české části zájmové oblasti	9
3.1.1	Topografie	9
3.1.2	Geomorfologie	9
3.1.3	Podnebí	10
3.2	Popis polské části zájmové oblasti	10
3.2.1	Topologie	10
3.2.2	Geomorfologie	10
3.2.3	Podnebí	11
3.3	Popis měřicích stanovišť	11
3.3.1	Měřicí stanice v Horní Suché	12
3.3.2	Měřicí stanice v Ratiboři	13
4	Vliv meteorologických podmínek na přenos znečištění v zájmové oblasti	15
4.1	Měřicí zařízení	15
4.1.1	Radiometr	17
4.1.2	Ceilometr	19
4.2	Vyhodnocení meteorologických podmínek v zájmové oblasti	21
4.3	Proudění vzduchu v atmosféře z hlediska radiometrických výzkumů	27
4.4	Rozptylové a povětrnostní podmínky během společných měření	33
4.5	Porovnání povětrnostních podmínek a koncentrací PM ₁₀ během společných měření	34
5	Vektor přenosu znečištění	38
5.1	Vektor směru větru na pozadí tepelné stratifikace atmosféry	38
5.2	Analýza situace s vysokými koncentracemi znečištění	40
6	Letová měření vertikálních profilů znečištění ovzduší bezpilotní vzducholodí	44
6.1	Měřicí zařízení	44
6.2	Měřicí lety	46
6.3	Zpracování naměřených dat	47
6.4	Výsledky letových měření	48
6.4.1	Identifikace lokálních topenišť	48
6.4.2	Identifikace dopravy	49
6.4.3	Identifikace průmyslových zdrojů	51
6.4.4	Identifikace stavební činnosti	53
6.5	Vyhodnocení letových měření	54
7	Vyhodnocení monitoringu suspendovaných částic v Horní Suché	55
7.1	Měřicí zařízení	55
7.2	Kontinuální měření PM	56
7.2.1	Analýza směrovosti znečištění	56
7.2.2	Analýza časového chodu znečištění	60

7.2.3	Vyhodnocení měření	62
7.3	Odběr suspendovaných částic na filtry	64
7.3.1	Koncentrace PM ₁₀	64
7.3.2	Určení původu PM ₁₀	65
7.3.3	Charakterizace prvkového složení pomocí neutronové aktivační analýzy	68
7.3.4	Vyhodnocení měření	72
8	Závěr	74

Poděkování

Kolektiv autorů děkuje celému týmu ze Sektoru neutronové aktivační analýzy a aplikovaného výzkumu, Frankovy laboratoře neutronové fyziky, Spojeného ústavu jaderného výzkumu v Dubně v Rusku za přínosnou spolupráci v rámci řešení projektu a realizaci neutronové aktivační analýzy. Konkrétně doc. Marině V. Frontasijevě za vedení realizačního týmu, dr. Sergejovi S. Pavlovovi za metodické řízení neutronové aktivační analýzy a týmu technických pracovníků: Pavlovi S. Nechoroškov, Konstantinu N. Vergelovi, Ludmile P. Strelkové, Taťaně M. Ostrovnaje a Margaritě S. Švetsovové.

Dále bychom chtěli poděkovat laboratoři NOAA Air Resources Laboratory (ARL) za poskytnutí transportního a disperzního modelu HYSPLIT a webové stránky READY (<https://www.ready.noaa.gov>), použitých v této studii.

Autoři studie rovněž děkují Hlavnímu inspektorátu pro ochranu životního prostředí (Główny Inspektorat Ochrony Środowiska / GIOŚ) za poskytnutí dat získaných v rámci plnění úkolů pro Státní monitoring životního prostředí (Państwowy Monitoring Środowiska / PMS), které zajišťují orgány Inspekce ochrany životního prostředí (Inspekcja Ochrony Środowiska / IOŚ).

1 Projekt AIR BORDER

Mezinárodní projekt **AIR BORDER** – plným názvem „*Společná česko - polská měření přeshraničního přenosu znečišťujících látek v ovzduší. / Wspólne czesko - polskie pomiary transgranicznego transportu zanieczyszczeń powietrza.*“ byl podpořen z programu Interreg V-A Česká republika – Polsko a spolufinancován z Evropského fondu pro regionální rozvoj. Projekt probíhal v letech 2017–2020 a na jeho řešení se podíleli tři partneři. Vedoucím partnerem projektu byla Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (VŠB-TUO), dalším českým partnerem byl Bezpečnostně technologický klastr, z. s. (BTK) a polským partnerem byl Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Aktivita projektu byly směřovány do oblasti česko-polského příhraničí, nazývané zájmová oblast, která je podrobněji popsána dále.

Na základě navázané spolupráce mezi českými a polskými odborníky byla v rámci projektu prováděna specializovaná měření, jejichž hlavním cílem bylo charakterizovat a vyčíslit přeshraniční přenos znečištění suspendovanými částicemi PM₁₀ v zájmové oblasti. Množství přeshraničního přenosu je také vyjádřeno pomocí směrového vektoru zobrazovaného on-line na webové stránce projektu AIR BORDER <http://airborder.vsb.cz> a v aplikaci pro mobilní telefony (platforma *Android*). Dalším cílem měření bylo určit vliv jednotlivých skupin zdrojů znečišťování ovzduší na dlouhodobé koncentrace znečištění suspendovanými částicemi PM₁₀. K realizaci těchto cílů projektu byly využity dvě monitorovací stanice, každá na jedné straně hranice.

Stanice na české straně hranice byla zbudována v Horní Suché na bývalé těžní věži Dolu František za finanční podpory projektu a měření probíhala v přízemní vrstvě atmosféry u paty věže a dále v cca 90 m nad zemí nad střechou věže. Bylo prováděno kontinuální měření suspendovaných částic na obou výškových úrovních, a na střeše věže byl rovněž prováděn odběr částic PM₁₀ v závislosti na směru větru. Odebrané částice PM₁₀ byly charakterizovány s využitím neutronové aktivační analýzy. Pro měření na polské straně hranice byla využita stávající měřicí stanice v Ratiboři, která byla v rámci projektu rozšířena o další specializované zařízení, a to radiometr pro měření vertikálního profilu teploty a ceilometr pro měření výšky základny oblaků, množství oblačnosti, vertikální dohlednosti a koncentrace aerosolů v přízemní vrstvě.

Výsledky provedených měření byly na konci projektu zpracovány a shrnuty v závěrečné práci o přeshraničním přenosu znečištění. Cílové skupiny projektu (vlády, orgány ochrany ovzduší a také občanská společnost) na obou stranách hranice tak mají k dispozici údaje o tom, jak se znečištění ovzduší přesouvá přes hranice a jaké jsou jeho příčiny.

2 Úvod

Znečištění ovzduší na území česko-polského pohraničí Moravskoslezského kraje a Slezského vojvodství dlouhodobě překračuje imisní limity (LV) a představuje tak významný problém pro lidské zdraví a kvalitu života. Tento region je historicky velmi úzce spjat s těžbou černého uhlí a těžkým průmyslem zastoupeným zejména energetikou, koksovny a hutěmi (Klusáček 2005; Cabala et al. 2004). Osobitý průmyslový charakter regionu a jeho topografie, spolu s lokálními meteorologickými podmínkami (Blažek 2013) způsobuje jeho specifické problémy v oblasti znečištění ovzduší. Strategický průmyslový rozvoj regionu v 50. letech minulého století zahájil intenzivní populační růst spojený rovněž se značnými emisemi znečištění z lokálního vytápění domácností (Hůnová 2020; Kuskova et al. 2008). Tento efekt přetrvával až do současnosti, jelikož uhlí je v polské příhraniční oblasti stále nejpoužívanějším palivem (Đurčanská 2020; Główny Urząd Statystyczny / Statistics Poland 2019). Tato oblast se tak stává jednou z nejznečištěnějších v Evropě (European Environment Agency 2019). Podle evropské legislativy (European Council 2008) a pokynů Světové zdravotnické organizace (WHO) (World Health Organization 2006; Maynard et al. 2017) znečišťování ovzduší významně překračuje mezní hodnoty suspendovaných částic (PM_{10} , $PM_{2,5}$), benzo[a]pyrenu a ozonu (European Environment Agency 2019; Czech Hydrometeorological Institute 2019; Hůnová 2020). Denní i dlouhodobá expozice výše uvedeným znečišťujícími látkami vykazuje řadu potvrzených nepříznivých účinků na lidské zdraví (World Health Organization 2016; 2013). Zvýšený obsah suspendovaných částic v ovzduší má za následek nárůst úmrtnosti a nemocnosti, a to i při krátkodobých expozicích. Populace vystavená prachovým částicím (PM) vykazuje vyšší výskyt infekčních chorob (World Health Organization 2016; 2013; Jiřík et al. 2016) a znečištění ovzduší suspendovanými částicemi je faktor klasifikovaný jako prokázaný lidský karcinogen (kategorie 1) (Cohen et al. 2013). S ohledem na vysokou hustotu osídlení předmětného regionu (Moravskoslezský kraj k roku 2019 – 221 obyvatel na km^2 a Slezské vojvodství – 366 obyvatel na km^2) představuje vysoké znečištění ovzduší zásadní a dlouhodobý environmentální problém.

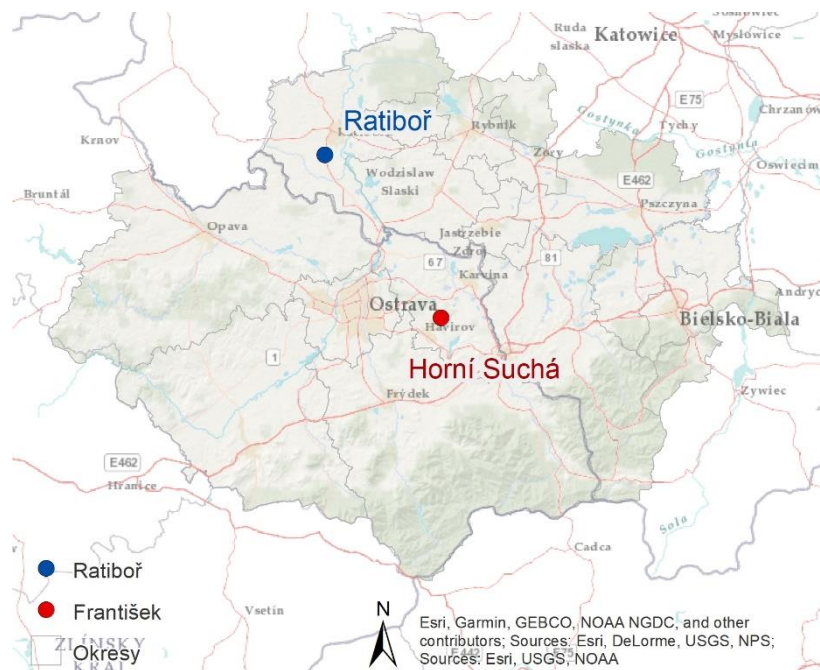
Odhalení konkrétních příčin znečištění ovzduší v regionu a návrh opatření k řešení této neuspokojivé situace je tak pro vědecké pracovníky dlouhodobou výzvou. V 90. letech tyto snahy odstartoval projekt Americké agentury pro životní prostředí (US EPA) s názvem „Silesia“ (Pinto et al. 1998; Čížová 1994); později úsilí pokračovalo v mezinárodních projektech „AIR SILESIA“ (Jančík et al. 2013) a „AIR TRITIA“ (Đurčanská 2020). Kromě toho byla provedena řada případových studií zaměřených na původ znečištění (Mikuška et al. 2015; Pokorná et al. 2015; Leoni et al. 2018) včetně nedávno publikované studie Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) (Český hydrometeorologický ústav 2019a; Seibert et al. 2020). Všechny studie zdůrazňovaly roli průmyslu i přeshraničního přenosu znečištění z Polska do Česka, pocházejícího zejména z lokálního vytápění. Podle uvedených studií a výsledků státního monitoringu kvality ovzduší (Czech Hydrometeorological Institute 2018; 2016) se nejvyšší koncentrace PM na české straně vyskytují v blízkosti polské hranice (charakteristické výraznějším nárůstem v chladnější polovině roku a během smogových událostí) a také v blízkosti významných průmyslových zdrojů, kde dochází k překročení limitních hodnot PM nejen během zimní sezóny. Kvalita ovzduší v české části regionu je tak významně ovlivněna rychlostí a povahou přeshraničního přenosu znečištění po ose převládajícího směru větru (typicky JZ / SV) spolu s inverzním charakterem počasí při stabilním zvrstvení atmosféry, a tedy zhoršenými rozptylovými podmínkami, které významně přispívají ke zvýšení znečištění ovzduší během zimního období. Podle dostupných studií (Đurčanská 2020;

Seibert et al. 2020; Volná a Hladký 2020) se příspěvek přeshraničního znečištění k ročním průměrným hodnotám PM na českém území může pohybovat v rozmezí 20–40 % v závislosti na místě v rámci regionu, emisích a meteorologických podmínkách daného roku.

Monitoring kvality ovzduší prezentovaný v této studii byl realizován v rámci řešení mezinárodního projektu „AIR BORDER“ zaměřeného na přeshraniční přenos znečištění z Polska do Česka a naopak. Jeho cílem bylo provést speciální monitorovací kampaň, která by charakterizovala přenos částic PM₁₀ z různých skupin zdrojů znečišťování ovzduší specifických pro daný region, s vyloučením vlivu místních zdrojů (Volná a Hladký 2020). Tento předpoklad byl splněn umístěním jednoho z monitorovacích zařízení na vrchol věže, která dosahuje výšky přes 85 m nad zemí. Zařízení odebrá částice PM₁₀ v závislosti na směru větru. Toto měření pak bylo doplněno měřením vertikálních profilů znečištění částicemi PM prostřednictvím bezpilotní vzducholodě. To umožnilo zkoumat, ze kterých směrů a ze kterých zdrojů znečištění ovzduší pochází, a přesněji kvantifikovat jeho přenos v rámci regionu.

3 Zájmová oblast projektu a měřicí stanoviště

Zájmová oblast se rozkládá v česko-polském pohraničí na severovýchodě České republiky. Zasahuje na území Moravskoslezského kraje a Slezského vojvodství (viz Obr. 1).



Obr. 1: Vymezení zájmové oblasti projektu s umístěním měřicích stanic

3.1 Popis české části zájmové oblasti

Česká část zájmové oblasti je správně vymezena okresy Frýdek-Místek, Karviná, Nový Jičín, Opava a Ostrava-město.

3.1.1 Topografie

V zájmové oblasti jsou zastoupeny všechny typy terénního reliéfu od nížin, přes pahorkatiny a vysočiny až po hornatiny. Nejvýše se na jihovýchodě oblasti zvedá horské pásmo Beskyd, které je tvořeno hřbety dosahujícími výšky přes 1 000 m n. m., s nejvyšším vrcholem Lysou horou 1 324 m n. m. Nejnižší bod oblasti se nachází v blízkosti česko-polské hranice u soutoku řek Odry a Olše a je umístěn 192 m n. m. (Moravskoslezský kraj 2021)

3.1.2 Geomorfologie

Z geomorfologického hlediska je oblast na jihovýchodě tvořena soustavou Západních Karpat, které ohraničuje horský flyšový masiv Beskyd a k nim přiléhající podhůří Podbeskydské pahorkatiny. Střed oblasti je reprezentován provincií Středoevropské nížiny, začínající Moravskou bránou, která se táhne od jihozápadu v podobě zlomové propadliny formované širokou nivou meandrující řeky Odry a na severovýchod se do široka otevírá směrem k Polsku v podobě Ostravské pánve. Právě tato část oblasti v minulosti oplývala bohatými ložisky černého uhlí a dala historicky vzniknout průmyslovému charakteru regionu. Na západě oblast přechází do soustavy České vysočiny a zvedá se k pohorí Nízkého Jeseníku. (Moravskoslezský kraj 2021)

Díky přítomnému nerostnému bohatství se zájmová oblast stala jedním z nejdůležitějších průmyslových center Česka. Přítomnost kvalitního koksovatelného černého uhlí a rozvoj

navazujícího průmyslu byly však také úzce spjaty se znečištěním životního prostředí a nevratnými změnami krajiny. Ačkoli v oblasti došlo k výraznému útlumu těžby (v současnosti v provozu zůstal pouze jeden aktivní důl na Karvinsku), stopy těžební činnosti zůstanou v krajině ještě na velmi dlouhou dobu. (Moravskoslezský kraj 2021)

3.1.3 Podnebí

Podnebí v oblasti je mírné s typickým střídáním čtyř ročních období. Podle Köppenovy klasifikace (Kottek et al. 2006; Český hydrometeorologický ústav a Univerzita Palackého v Olomouci 2007) patří většina území do klimatické skupiny *Cfb - mírné oceánické podnebí*, kde průměrná teplota v nejméně chladném měsíci neklesá pod 0 °C, během celého roku jsou průměrné měsíční teploty pod 22 °C a nejméně 4 měsíce nad 10 °C. Mezi ročními obdobími se v této skupině podnebí nepředpokládá významný srážkový rozdíl. Část oblasti pokrývající pohoří Beskyd a Nízkého Jeseníku spadá do skupin *Dfb - vlhké kontinentální podnebí s teplými léty* (s podobnou klimatickou charakteristikou jako pro *Cfb*) a malá část vrcholů Beskyd spadá do klimatické skupiny *Dfc - subarktického podnebí* (s chladnými léty a studenými zimami). Podle pozorování Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) se roční normální úhrn srážek (1981–2010) v oblasti pohybuje mezi 600–1 200 mm (v závislosti na nadmořské výšce), což výrazně převyšuje český průměr.

3.2 Popis polské části zájmové oblasti

Polská část zájmové oblasti je správně vymezena okresy Bílským (bielskim), Těšínským (cieszyńskim), Pštinským (pszczyńskim), Ratibořským (raciborskim), Rybnickým (rybnickim), Vladislavským (wodzisławskim) a městskými okresy Bílsko-Bělá (Bielsko-Biała), Rybník (Rybnik) Lázně Jestřebí (Jastrzębie-Zdrój) a Žáry (Żory).

3.2.1 Topologie

Z pohledu umístění monitorovací stanice na polské části zájmového území a vlivu topologie na meteorologické podmínky je nejvýznamnější charakteristika Ratibořské kotliny. Ratibořská kotlina je nejvíc jihovýchodně položená část Slezské nížiny (Kondracki 2014). Sousedí s geografickými jednotkami, které se výrazně zdvihají nad dno kotliny, takže má výrazně a ostře vymezené hranice. Na severu ji vymezují hřbet (wzniesienie) Chelm, který je součástí sousední Slezské vysočiny/vrchoviny (Wyżyna Śląska) – dosahuje výšky 400 m n. m. (Hora sv. Anny / Góra Świętej Anny). Na východě se stýká s Rybnickou náhorní plošinou (280 – 310 m n. m.), která je rovněž součástí Slezské vysočiny. Na opačné, západní straně hraničí s Opavskou pahorkatinou, která leží ve výšce 250 – 300 m n. m. Je otevřená jen směrem na jih a přes zlomovou kotlinu horní Odry je spojena s Ostravskou kotlinou. Dno údolí o šířce 4–5 km leží v průměru o 100–200 m než jsou vrcholky přilehlých vysočin a náhorních plošin. Severním směrem se Ratibořská kotlina rozšiřuje a nabývá tvaru rovnoramenného trojúhelníku. Tato kotlina patří k oblasti Slezsko-velkopolských nížin.

3.2.2 Geomorfologie

Polská část zkoumané oblasti rozkládá na území třech geomorfologických makroregionů. Jedná se o Slezskou nížinu, která zahrnuje téměř celé území obce Ratiboř (Racibórz) a dva mezoregiony: Opavskou pahorkatinu (Płaskowyż Głubczycki) a Ratibořskou kotlinu (Kotlina Raciborska). V rámci makroregionu Slezsko-krakovské vysočiny (Wyżyna Śląska – Krakowska) na jihovýchodní hranici obce Ratiboř částečně zasahuje mezoregion Rybnická náhorní plošina (Płaskowyż Rybnicki). Makroregion Ostravské pánve má víc než 600 km² (v Polsku cca 130 km²). Je silně urbanizovaný a industrializovaný. Povrch je rovinatý, místy pahorkatý. Na severozápadě hraničí se Slezskou nížinou,

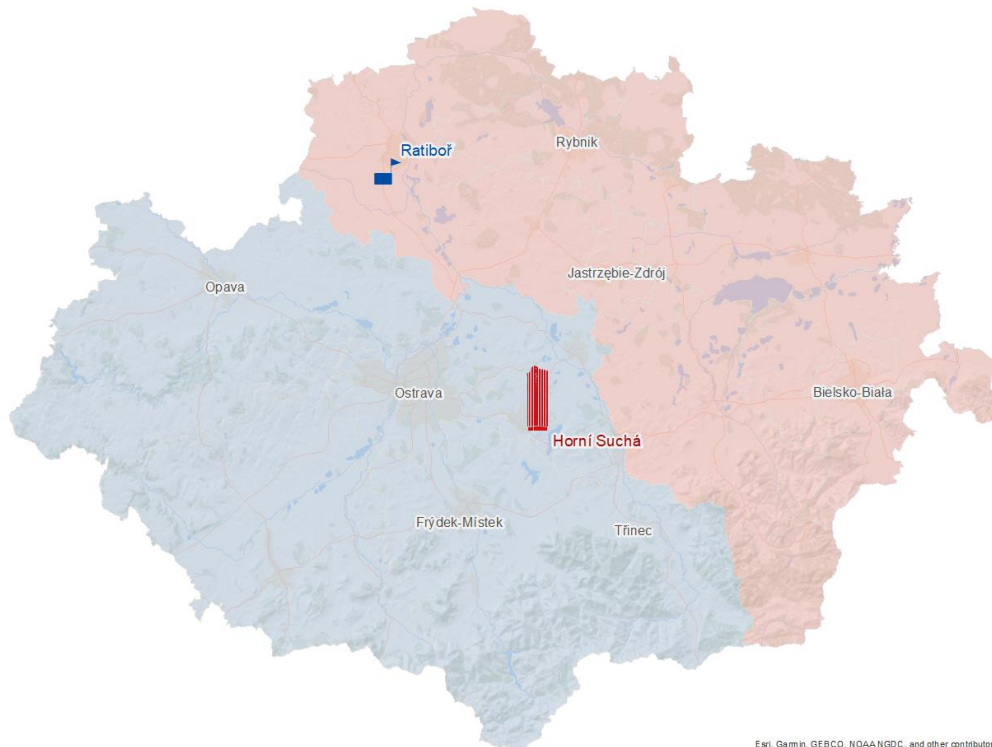
na severovýchodě se Slezsko-krakovskou vysočinou, na východě s Osvětimskou kotlinou (Kotlina Oświęcimska), na jihovýchodě s pásmem západních Beskyd, na jihozápadě s Moravskou bránou a na západě s oblastí polských Sudet. V této oblasti leží stanice Horní Suchá.

3.2.3 Podnebí

Zdejší podnebí je teplé, s dlouhým létem, v lednu s teplotami kolem $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v červenci kolem $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zima trvá 60 – 80 dní a léto asi 100 dní. Průměrné srážky jsou 600 – 700 mm. Podnebí Ratibořské kotliny ovlivňuje hlavně příliv teplého, jižního proudění přes Moravskou bránu a ze západu od Slezské nížiny. Podle rozdělení oblasti na klimatické regiony E. Romera (Romer 1949), Ratiboř leží v klimatické zóně „Moravská brána“, což je jedna z nejteplejších klimatických zón v Polsku, s nejdelším vegetačním obdobím. Ratibořská kotlina má relativně mírné meteorologické podmínky, je tu tepleji než v okolních geografických regionech, především na Slezské vysočině. Silný vliv na tyto klimatické podmínky, především na povětrnostní situaci, má tvar Kotliny, který se odráží hlavně v proudění vzduchu. Poloha Ratiboře v údolí Odry, sousedství horských pásem a Moravské brány způsobují transport znečištění z oblasti kolem Ostravy. Navíc je údolí Odry svým tvarem náchylné k akumulaci znečištěného vzduchu v důsledku častých inverzí.

3.3 Popis měřících stanovišť

V rámci projektu AIR BORDER bylo měřeno znečištění ovzduší suspendovanými částicemi a meteorologické údaje na stanicích po obou stranách hranice v nejvíce znečištěné části zájmové oblasti. Na české straně byla měření prováděna na nově vybudované stanici v Horní Suché, na polské straně pak na stávající stanici IMGW-PIB v Ratiboři. Poloha měřících stanic v rámci regionu je uvedena na Obr. 2.

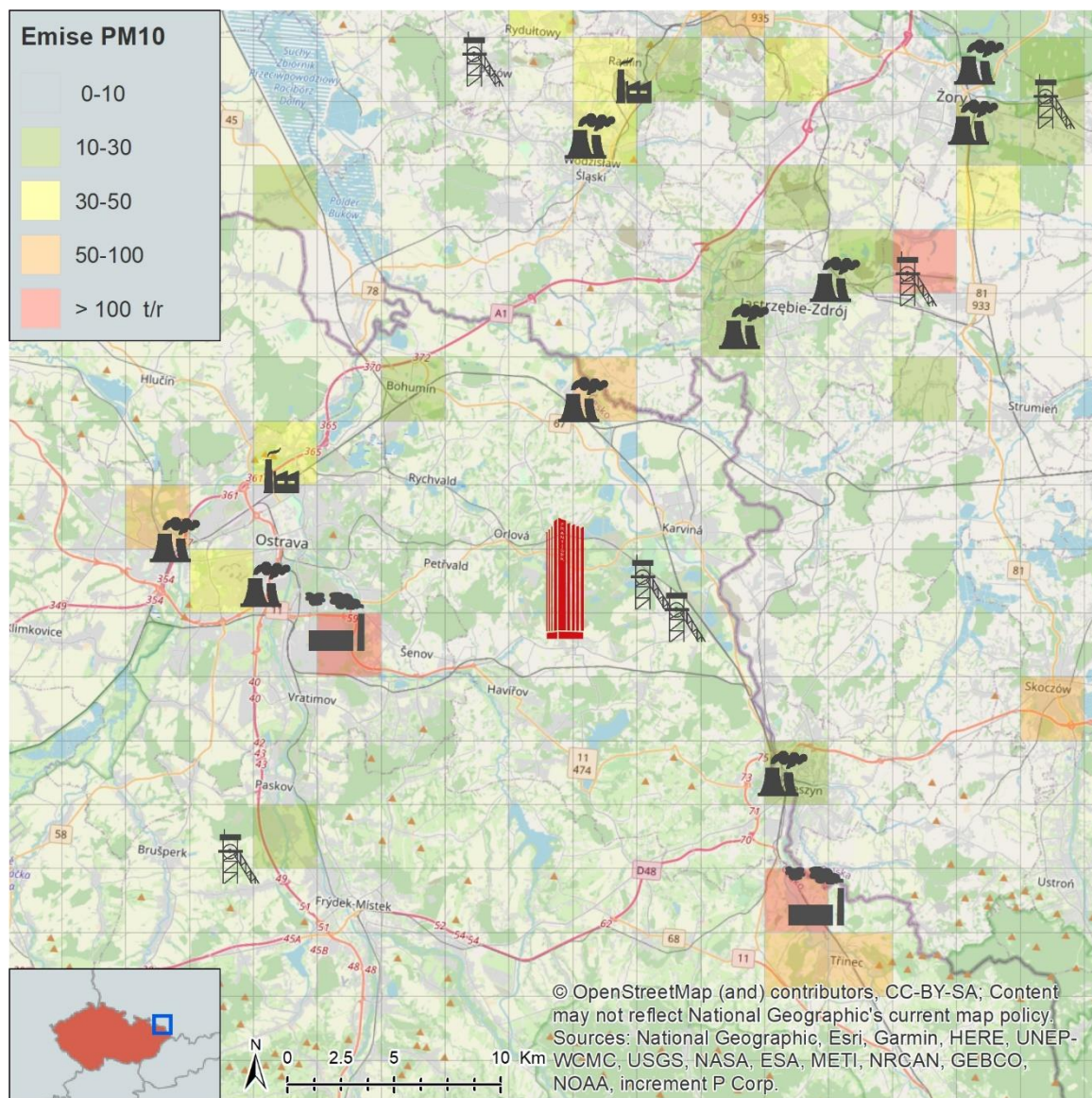


Esri, Garmin, GEBCO, NOAA NGDC, and other contributors

Obr. 2: Umístění měřících stanic v rámci zájmové oblasti

3.3.1 Měřicí stanice v Horní Suché

Na české straně probíhají specializovaná měření v Horní Suché na bývalé těžební věži v areálu průmyslové zóny František. Lokalizace měřicí stanice: WGS 1984 49.805166N, 18.473954E. Věž je umístěna v centru Ostravsko-karvinského revíru, v blízkosti hranice s Polskem. To umožňuje zkoumání přenosu znečištění z různých skupin zdrojů znečišťování ovzduší typických pro daný region. Výška věže pak umožňuje provádět měření téměř 90 m nad zemí a oddělit tak vliv lokálních zdrojů znečišťování od přenosu na větší vzdálenosti.



Obr. 3: Umístění stanice František v regionu s vyznačením emisí PM₁₀ z okolních průmyslových zdrojů platných k roku 2018

Těžební (skipová) věž s původním označením F4 se fungovala jakou součást černouhelného Dolu František v Horní Suché. Počátek těžby se v tomto dolu datuje k roku 1911, kdy začalo hloubení

první těžební jámy, poslední vozík byl vytěžen 30. června 1999. Za celou dobu své historie důl vydal celkem 59 144 518 tun černého uhlí. Většina areálu prošla v nedávné minulosti významnou proměnou. Původní stavby a zařízení dolu byly odstraněny a obec Horní Suchá z oblasti vytvořila moderní průmyslovou zónu, které ponechala původní jméno dolu: František.

Železobetonová těžní věž zaujímá plochu 586 m² a dosahuje výšky 85,5 m a tak ji s ohledem na okolní zástavbu nebylo možné bezpečně odstranit. Zůstává tedy i nadále nepřehlédnutelnou dominantou Horní Suché a připomínkou bohaté těžební historie regionu.

Obec se snaží pro věž najít alternativní využití, a tak vyvstala myšlenka jejího zapojení v projektu AIR BORDER, jakožto stanoviště pro specializovaná měření přenosu znečištění ovzduší. V rámci projektu byla na věži osazena měřicí zařízení pro kontinuální měření suspendovaných částic a odběr částic frakce PM₁₀ v závislosti na směru větru.



Obr. 4: Pohled na původní areál Dolu František v 80. letech

3.3.2 Měřicí stanice v Ratiboři

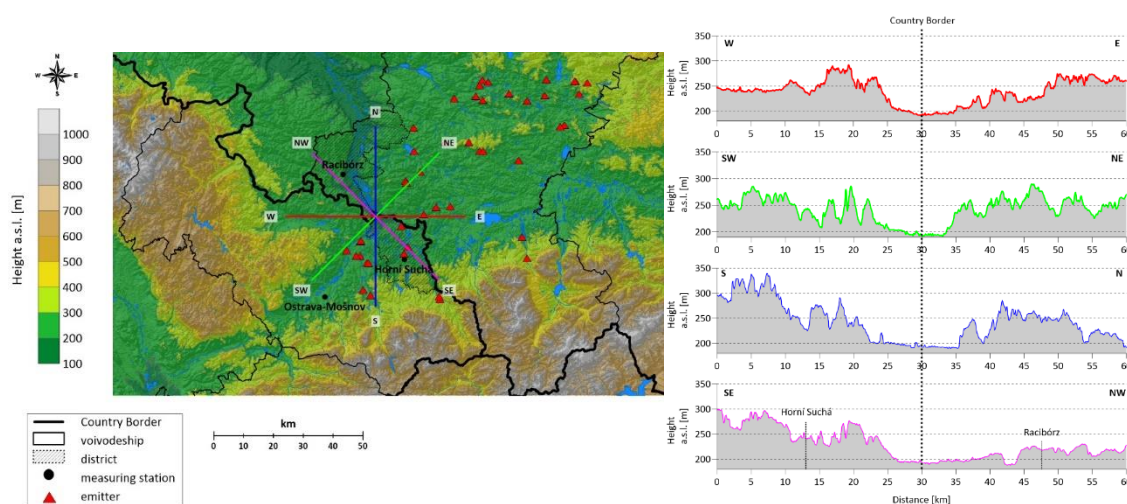
Stanice v Ratiboři (Studzienna) provádí specializovaná meteorologická měření a měření kvality ovzduší, zaměřená na sledování atmosférického aerosolu. Během realizace projektu AIR BORDER byla stanice rozšířena o kontinuální měření vertikálního profilu teploty v mezní vrstvě atmosféry pomocí radiometru a měření usazování aerosolových vrstev pomocí ceilometru, jejichž cílem bylo identifikovat inverzní vrstvu rozptylu znečištění ovzduší. Aplikace v měřicím programu radiometrické stanice a zařízení pro identifikaci rozložení teploty v mezní vrstvě atmosféry jsou významným prvkem při identifikaci aktuálního přenosu znečišťujících látek přes polsko-českou hranici. Stanici je možné vidět na Obr. 5.

Stanice se na území hydrologicko-meteorologické stanice I. kategorie IMGW-PIB, ve vzdálenosti cca 200 m od meteorologické zahrádky JZ směrem, ve vzdálenosti cca 4 km na JZ od centra Ratiboře. Z východu ke stanici přiléhá pás příměstské zástavby jižní části čtvrti Studzienna. Pás této zástavby se táhne podél výpadovky z Ratiboře do Chalupek. Ze západní strany se rozkládají otevřená široká pole, která se táhnou směrem k obci Křanovice (Krzanowice). Z jižní strany jsou nejprve otevřená pole, která uzavírá ve vzdálenosti 0,8 km příměstská zástavba Sudolu, další čtvrti Ratiboře, ležící asi 5 km od centra města.



Obr. 5: Stanice IMGW-PIB v Ratiboři

Měřicí stanice v Ratiboři se nachází v geografickém makroregionu Slezské nížiny, mezi jejími nejvíc jihovýchodně ležícími mezoregiony, Ratibořickou kotlinou a Opavskou pahorkatinou, ve výšce 206 m n. m. (Kondracki 2014). Reliéf vykazuje přechodný charakter mezi nížinou a vysočinou. Ratibořická kotlina je tektonická předkarpatská deprese vyplněná jíly a písky, jejímž středem běží koryto horní Odry ve výškovém rozmezí 180-185 m n. m. Přímochařý průběh tohoto koryta o ose SSZ-JJV navazuje na průběh tektonického zlomu. Na 4-5 km širokém dně údolí Odry a na obou jejích svazích se vyskytuje několik terasových úrovní. Podél západního svahu údolí Odry probíhá rovnoběžně k hlavnímu toku této řeky malý náhon zvaný Psinka. Podrobné hypsometrické poměry je možné vidět na Obr. 6.



Obr. 6: Umístění stanice IMGW-PIB v Ratiboři – hypsometrické profily na vzdálenost 10 km v každém z hlavních směrů, centrální bod je umístění radiometru, přerušovaná čára je státní hranice PL-CZ.

4 Vliv meteorologických podmínek na přenos znečištění v zájmové oblasti

Meteorologické podmínky v oblasti byly zkoumány a vyhodnocovány zejména na stanici IMGW-PIB v Ratiboři. Byly využity výsledky měření ze zařízení, uvedených v následující kapitole.

4.1 Měřicí zařízení

Základem informací o meteorologických údajích je měřicí program podle standardů Světové meteorologické organizace (World Meteorological Organization) synoptické stanice IMGW-PIB Ratiboř Studzienna. Na stanici probíhá automatické měření – meteostanice Vaisala MAWS-301 spolu se sadou měřičů, čidel a detektorů. Viz Obr. 7 (a).

Na stanici probíhají měření těchto meteorologických veličin:

- teplota vzduchu ve výšce 2 m nad zemí měřená na meteorologické stanici (teploměr Vaisala QMT103);
- relativní vlhkost vzduchu ve výšce 2 m nad zemí v meteorologické stanici – (čidlo vlhkosti Vaisala QMH-45DX);
- teplota vzduchu 5 cm nad zemí na pozemku (teploměr Vaisala QMT103);
- teploty země v hloubkách 100 cm, 50 cm, 20 cm, 10 cm, 5 cm (půdní teplotní sonda Vaisala QMT-107);
- rychlost a směr větru ve výšce 10 m nad zemí (ultrazvukový větroměr Vaisala WS-425) – údaje o povětrnostních podmínkách jsou získávány okamžité a průměry za 2 a 10 minut;
- množství srážek na ve výšce 1 m nad zemí (automatický přepřehovaný srážkoměr se zachytnou plochou 200 cm² s ohříváním SebaHydrometrie RG-50 a automatický hmotnostní srážkoměr se zachytnou plochou 200 cm²);
- viditelnost ve výšce 2 m ve vzduchu vlající vysílač a přijímač měřiče (vzdálenost 1,5 m – horizontálně) – měřič viditelnosti s detektorem meteorologických jevů Vaisala FD12P;
- druh srážky/jevu ve výšce 2,2 m (měřič viditelnosti s detektorem meteorologických jevů Vaisala FD12P) – klasifikován podle katalogu jevů: kód SYNOP s klíčem FM 12 pro stávající a minulé počasí pro automatické stanice;
- sluneční svit ve výšce 3,5 m (měřič slunečního svitu Kipp & Zonen CSD1);
- atmosférický tlak vzduchu ve výšce 206,5 m n. m. (1,5 m nad zemí) – elektronický barometr Vaisala PMT16A;
- výška sněhové vrstvy (ultrazvukový měřič vzdálenosti Sommer USH-8);
- výška základny mraků a ukládání aerosolových vrstev (ceilometr CL31);
- atmosférický tlak ve výšce 206,5 m n. m. v budově stanice (elektronický barometr Vaisala PA-11).

Základní rozsah měření stanice sledování aerosolů zahrnuje:

- Měření počtu a hmotnostní koncentrace aerosolových částic (viz Obr. 7 (d)):
 - spektrometr APS (Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer),
 - monitor velmi jemných částic UFP (Ultra Fine Particle Monitor),
 - prachoměr Dust Track (DRX),

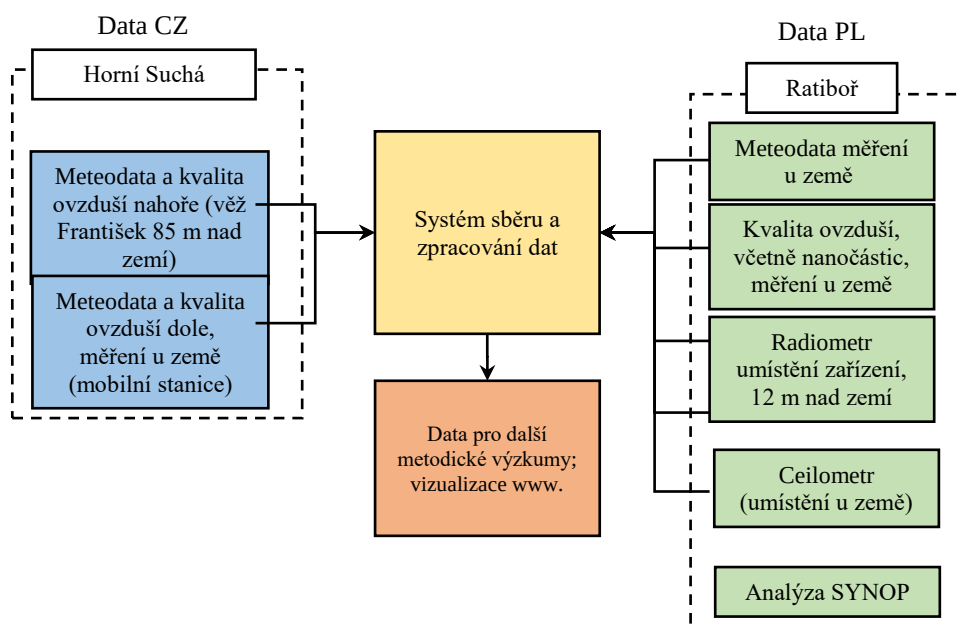
- integrovaný nefelometr Aurora 3000 (Ecotech) pro měření optických parametrů ovzduší (3 rozsahy vlnových délek) – měření nefelometrem se používají mimo jiné ke zkoumání vlivu aerosolů na optické parametry ovzduší a viditelnost.
- Měření usazování aerosolových vrstev s využitím ceilometru firmy Vaisala CL31 (viz Obr. 7 (b)).
- Měření vertikálního rozložení teploty vzduchu s využitím radiometru MT-5 (viz Obr. 7 (c)).



Obr. 7: Umístění měřicích zařízení na meteorologické stanici a stanici sledování aerosolů v Ratiboři Studzienna: (a) meteorologická zahrádka; (b) ceilometr; (c) radiometr; (d) kontejner pro měření aerosolů.

Výsledky měření aerosolů a počasí na stanici, které jsou získané s využitím výše uvedených měřicích zařízení, byly použity k realizaci výzkumných úkolů v rámci projektu. K výzkumu byl využit také model podmínek tepelné stratifikace atmosféry vypracovaný na základě výsledků měření radiometru MPT-5 umístěného na střeše meteorologické stanice ve výšce 12 m nad zemí.

Měřicí systém na meteorologické stanici IMGW-PIB v Ratiboři (PL) byl integrovaný s měřením meteorologických podmínek a znečištění ovzduší v Horní Suché – Sucha Górna (CZ) – z měřicí stanice VŠB-TUO. Na obou místech byly zaznamenávány údaje o znečištění ovzduší suspendovanými částicemi PM o frakci od 0,03 do 20 μm . Schéma integrovaného sběru dat je uvedeno na Obr. 8.

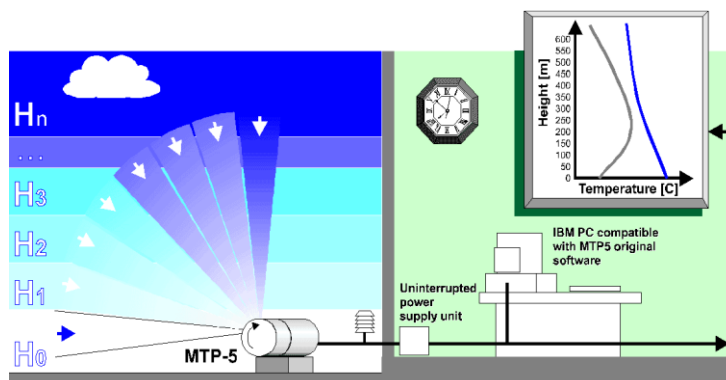


Obr. 8: Blokové schéma systému meteorologického monitoringu a monitoringu kvality vzduchu, pokud jde o koncentrace prachu ve zkoumané oblasti.

4.1.1 Radiometr

Teplota vzduchu klesá s rostoucí výškou teoretickou rychlostí cca $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na 1000 m a tento proces ovlivňuje celá řada faktorů. Ačkoli je atmosféra silným zdrojem záření, teplotní změny jsou relativně malé, a proto je zapotřebí velmi citlivý přijímač. Proto byl v rámci projektu pořízen radiometr MTP-5 (*meteorological temperature profiler*). Jedná se o teledetekční zařízení, které slouží k dálkovému měření teplotních profilů do výšky 1 000 metrů. Může být využito k měření atmosférických aerosolů, především pokud se nacházejí v přízemní vrstvě atmosféry ABL (*surface atmospheric boundary layer*), a také (spolu s nefelometrem) k měření horní výšky mraků pro stanovení výšky usazování aerosolových vrstev. Zařízení funguje za všech povětrnostních podmínek, disponuje systémem autokalibrace a umožňuje nepřetržitý provoz. Měření teploty do 1 000 m mezní vrstvy atmosféry PBL (*planetary boundary layer*) je žádoucí pro různé druhy výzkumu v meteorologii i ochraně životního prostředí.

Atmosférické záření je měřené skenováním v úhlové stupnici od vodorovné do svislé meze a operativní software zpracovává údaje na informace o výšce a teplotě vzduchu ve svislici. Viz Obr. 9. Údaje se uchovávají a profily jsou graficky zobrazovány každých 5 minut. Obvykle se zobrazuje teplota ve vzdálenosti po 50 m.



Obr. 9: Celková konfigurace systému MTP-5. Stanovení profilu teploty vychází z měření tepelného záření z různých úhlů obzoru v jedné rovině azimutu. Čidlo okolní teploty slouží jako referenční bod (Zdroj: MTP-5 user manual 2017).

Systém založený na používání MTP-5 je určený k monitorování:

- ekologické bezpečnosti měst a velkých průmyslových objektů;
- k okamžité prognóze (*nowcasting*), ve velmi krátkém období (*very short-range weather forecasting*), krátkodobé prognóze (*short-range weather forecasting*) - mlhy, ledovky atd.;
- monitorování tepelného režimu městského prostředí za neobvyklého počasí;
- podmínek, které jsou příznivé pro aktivní ovlivňování teploty vzduchu např. v případě požárů.

Systém založený na použití MTP-5 umožňuje:

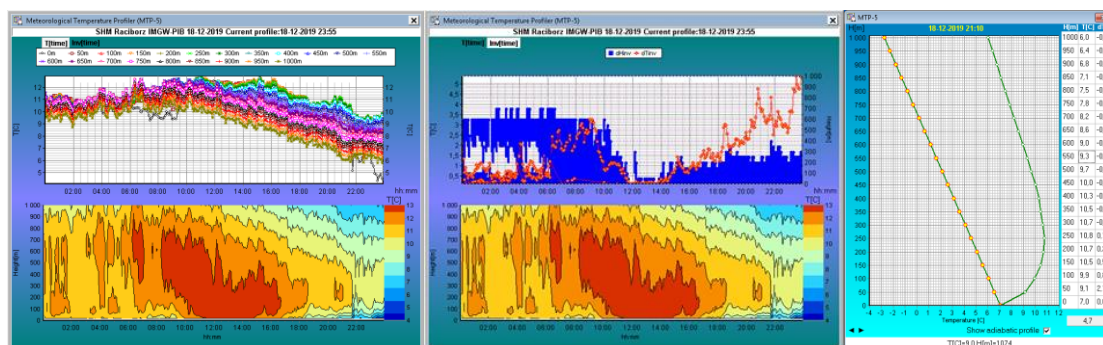
- provádět nepřetržitá měření (každých 5 minut) profilu teploty do výšky 1 000 m v reálném čase;
- sledovat dynamiku výšky směšovací vrstvy; původ a vývoj inverzních vrstev;
- sledovat opakovatelnost tříd stability atmosféry a také průměrné hodnoty vertikálního teplotního gradientu ve vrstvách v kategoriích 0–300 m, 0–600 m, 0–900 m.

MTP-5 je důležitý pro sledování kvality ovzduší ve městech. Nabízí jednoduché, rychlé a ekonomicky přijatelné řešení pro prognózování a podporu procesu zveřejňování informací. Obvykle se používá menší síť dvou až třech přístrojů pro daný region, jeden v centru města (městská stanice) a druhý v oblastech původu změny počasí (pozařadová stanice).

MTP-5 umožňuje sledovat výšku inverzních vrstev spojených mimo jiné s úrovní znečištění ovzduší suspendovanými částicemi PM (*particulate matter*).

Statistické výpočty MTP-5 umožňují získat rozložení inverzních parametrů podle typu, denní doby a ročního období a délky trvání.

Vizualizace údajů z radiometru je představena na Obr. 10.



Obr. 10: Vizualizace výsledků měření profilu teploty a výšky inverze z radiometru, průběh za jeden den, 18. 12. 2019.

V rámci činnosti IMGW-PIB byla vypracována metodika identifikace tzv. tříd teplotní stratifikace atmosféry, které umožňují rychlé a účinné zhodnocení podmínek vzniku smogových situací spojených se nahromaděním znečištění pocházejících z lokálních topenišť (pol. *emisja niezorganizowana*).

4.1.2 Ceilometr

Ceilometr Vaisala CL31 funguje na vlnové délce 905 nm s využitím systému laserové diody s arsenidem indium a galia (InGaAs) s impulsem 1,2 mJ po dobu 110 ns a průměrnou frekvencí opakování impulsů 8 192 Hz. Využívá konstrukci jedné čočky k vysílání a odběru světelných signálů. Tato konstrukce zvyšuje poměr signálu k šumu. Dělič paprsků zajišťuje plný dosah zorného pole vysílače a přijímače ve výšce 70 m (Münkel et al. 2007).

Koeficient zpětného rozptylu $\beta(x, \lambda)$ nebo příčný průřez zpětného rozptylu na jednotku objemu je spojený se zaznamenanou optickou silou pomocí této rovnice:

$$P(x, \lambda) = \frac{c}{2x^2} P_0 A \eta O(x) \Delta t \times \beta(x, \lambda) \tau^2(x, \lambda) + B$$

kde P je optická síla, kterou ceilometr zachytí ze vzdálenosti x , c je rychlost světla, Δt je doba trvání pulsu, P_0 je průměrná síla laseru při pulsu, A je plocha optiky přijímače, η je účinnost optiky přijímače, $O(x)$ je integrál překrytí, který závisí na překryvu vysílaného a přijímaného svazku, $\tau(x, \lambda)$ je transmitance atmosféry mezi ceilometrem a objemem rozptylu, λ je délka vlny vysílaného laserového pulsu, x je vzdálenost mezi ceilometrem a objemem rozptylu a B je součet šumu elektronického a optického pozadí (Weitkamp 2005). CL31 vrací profily, které jsou proporční a blíží se tlumeným profilům zpětného rozptylu $\beta(x, \lambda) \tau^2(x, \lambda)$. Při vlnové délce CL31 koeficient zpětného rozptylu aerosolu převažuje nad koeficientem zpětného molekulárního rozptylu uvnitř zadržující vrstvy a mraků. S ohledem na stručnost textu nazýváme tyto profily v publikaci profily zpětného rozptylu aerosolu.

Profily zpětného rozptylu aerosolu se signály z mraků, deště nebo mlhy jsou identifikovány jako signály vyšší než $2000 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ a nebyly používány k tomuto srovnání PBL (van der Kamp a McKendry 2010).

CL31 může měřit zpětný rozptyl aerosolu do 7 500 m. Ale tyto signály nezapisuje, místo toho zaznamenává intenzitu rozptylu zpětného aerosolu každých 16 sekund v maximální výšce 4 500 m a rozlišení 10 m. CL31 funguje s firmwarem ve verzi 1.7 a šumem h2. Podrobné informace o tomto přístroji lze najít v publikacích (Münkel et al. 2007) a (Kotthaus et al. 2016).

4.1.2.1 Metody určování výšky mezní vrstvy atmosféry

Všechny zde představené metody určování PBL založené na aerosolu vycházejí ze dvou předpokladů: mezní vrstva (BL) obsahuje v určité míře stálou koncentraci aerosolu v důsledku konvekčního a turbulentního míchání a čistá volná troposféra (*free troposphere* – FT) výše tvoří záporný gradient ve zpětném rozptylu aerosolu z vyšší koncentrace v BL směrem k nižším koncentracím ve FT. Lokální maximum tohoto gradientu je identifikované jako vrchol BL. Termodynamická PBL radiosond se vypočítává pomocí metody výkresu *skew-T-log-P* a je srovnávána s PBL pocházejícími z aerosolu, vypočítanými na základě profilů zpětného rozptylu aerosolu v nejbližším čase od vypuštění radiosondy, ale nepřesahujícím 10 minut před nebo po spuštění měření ceilometrem.

4.1.2.2 Gradient zpětného rozptylu aerosolu firmy Vaisala Corporation

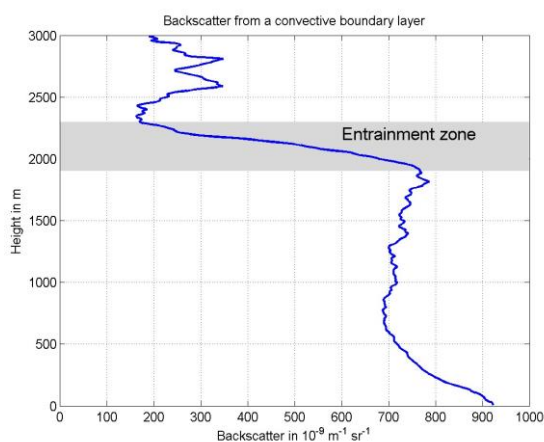
Ve výzkumu byl využit algoritmus Vaisala Corp. BL Matlab v3.7. Tento algoritmus počítá záporné gradienty spolu s růstem výšky v profilech zpětného rozptylu aerosolu v souladu s výše uvedenými předpoklady. V profilu bylo použito průměrování výšky 10 min a 120 m spolu s křivkou závislosti teploty -10°C podle doporučení Vaisala Corporation (Münkel et al. 2007) s ohledem na tendence CL31 k zakřivení profilu zpětného rozptylu aerosolu spolu s růstem vnitřní teploty. Korekce teploty

-10 °C je nastavení algoritmu, které přizpůsobuje tvar a křivku profilů zpětného rozptylu aerosolů v závislosti na teplotě se zanedbatelným vlivem na detekci vrstvy aerosolu (Münkel et al. 2007). Algoritmus vypočítává změnu zpětného rozptylu aerosolu spolu s výškou ($d\beta / dx$), který následně nachází tři největší záporné gradienty s minimální změnou zpětného rozptylu aerosolu, která je $200 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. V tomto výzkumu bylo použito nastavení minimální výšky gradientu 30 m spolu s nastavením citlivosti 15 %, což vyžaduje 15% změnu relativního zpětného rozptylu aerosolu poblíž možné PBL.

Největší ze záporných gradientů je obvykle popisovaný jako BL, ale největší záporný gradient ne vždy odpovídá BL. Proto je vyžadovaná ruční analýza tří vrstev výsledků algoritmu, aby se předešlo nesprávné identifikaci jiných vrstev aerosolu. Algoritmus uvádí tři maximální záporné gradienty každou 1 minutu, z nichž jeden je vybrán jako PBH (*planeary boundary height*) – výška mezní vrstvy. Následně jsou zprůměrovány na 10 minut za účelem srovnání radiosond. Ruční přístup je vyžadovaný pro výběr jednoho ze tří maximálních záporných gradientů, protože PBL vyžaduje především znalost typických nočních a denních výšek PBL. Tato ruční selekce může být časově náročná, obzvláště když se hodnotí dlouhodobé údaje týkající se lidarů.

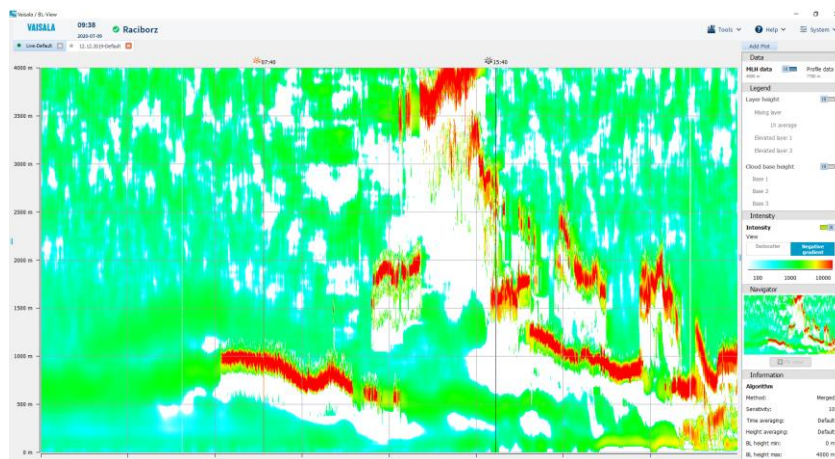
4.1.2.3 Představení výsledků měření Ceilometru Vaisala C31

Ceilometr Vaisala měří profil zpětného rozptylu atmosférou a zajišťuje profil k analýze pomocí softwaru BL-View. Tento software obsahuje automatický algoritmus k on-line identifikaci výšky hraniční vrstvy atmosféry. Výpočty BL-View jsou založené na spojených metodách gradientu a zpětného rozptylu, které poskytují možnost automatické informace o konvekční výšce směšovací vrstvy MLH (*mixing layer height*) se zohledněním denní doby za každého počasí. Příklad vizualizace hodnoty zpětného rozptylu je možné vidět na Obr. 11.



Obr. 11: Příklad vizualizace hodnoty zpětného rozptylu v podmínkách konvekční hraniční vrstvy (User Guide, 2018, Vaisala Boundary Layer View Software BL-View).

Příklad vizualizace výsledků měření aerosolové vrstvy během jednoho dne je představen níže na Obr. 12. Jednotlivé barvy na Obr. 12 ukazují odrazivost od aerosolových pásů (červená barva – potenciální výška směšovací vrstvy MLH).



Obr. 12: Vizualizace vrstvy mísení získaná pomocí softwaru BL-VIEW z ceilometru Vaisala CL31.

Podle metody odhadu výšky směšovací vrstvy umožňuje software BL-VIEW představit údaje o výšce směšovací vrstvy numerickým způsobem. Tato vrstva je identifikovaná ve třech úrovních (pokud existují) a jako vážený průměr úrovní (*level*): level 1, level 2, level 3, mean level.

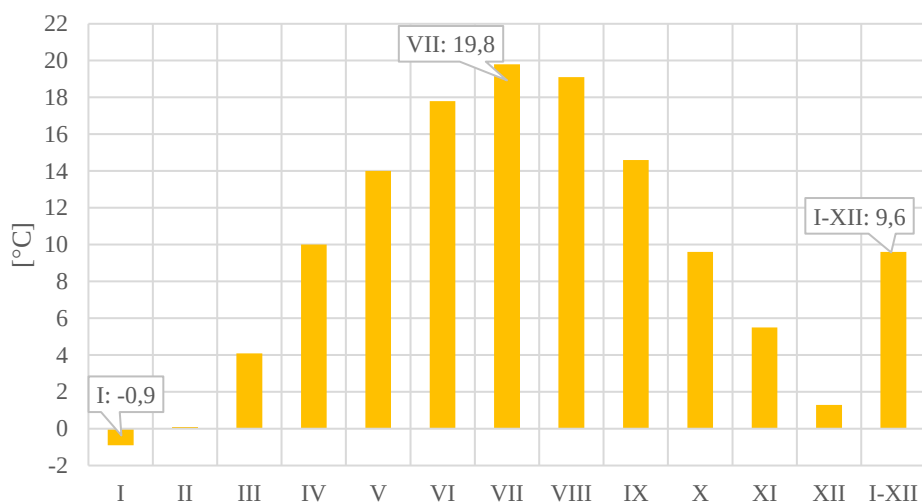
4.2 Vyhodnocení meteorologických podmínek v zájmové oblasti

Posouzení meteorologických podmínek v zájmové oblasti vychází z dlouhodobých měření z let 2005–2019. S ohledem na roční variabilitu počasí jsou důvěryhodnější meteorologické údaje získané z co nejdelší časové řady měření. Doporučení WMO znějí, aby taková řada byla minimálně třicetiletá. Ve zkoumaném případě byla využita nejdelší homogenní řada pro dané území, tj. téměř patnáctiletá. Získané výsledky jsou reprezentativní pro podnebí v zájmové oblasti.

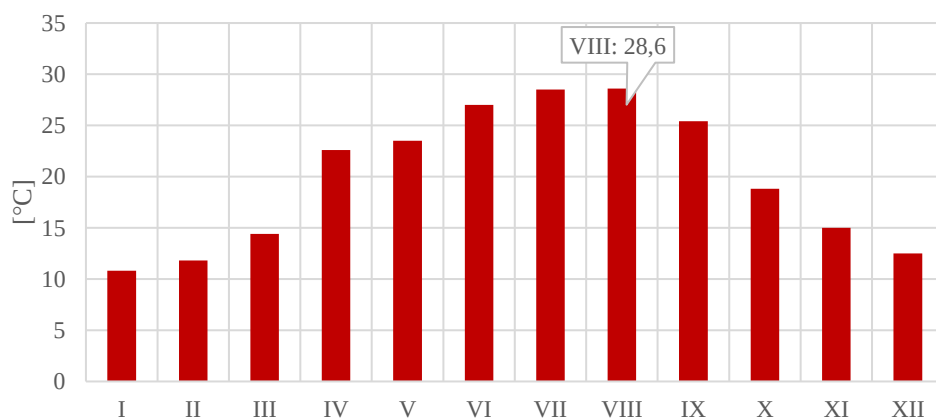
Umístění měřících stanic v zájmové oblasti je specifické, obě stanice jsou umístěné ve snížené části oblasti, na okraji Ostravské kotliny v údolí Odry. Ačkoliv bariéra Karpat a Sudet představuje přírodní hranici klimatických oblastí, pro potřeby této práce se vzhledem k nevelké vzdálenosti obou měřících stanic předpokládá, že jejich klimatické podmínky jsou podobné a reprezentuje je meteorologická stanice IMGW-PIB v Ratiboři.

Pro vyhodnocení byly zvoleny klimatologické charakteristiky, které mají nejpodstatnější vliv na kvalitu ovzduší v dané oblasti. Analýza klimatického pozadí zkoumané oblasti byla zpracována na základě údajů z meteorologické stanice IMGW-PIB v Ratiboři. Vizualizace měsíčních průběhu vybraných klimatických charakteristik je uvedena na Obr. 13 – Obr. 29.

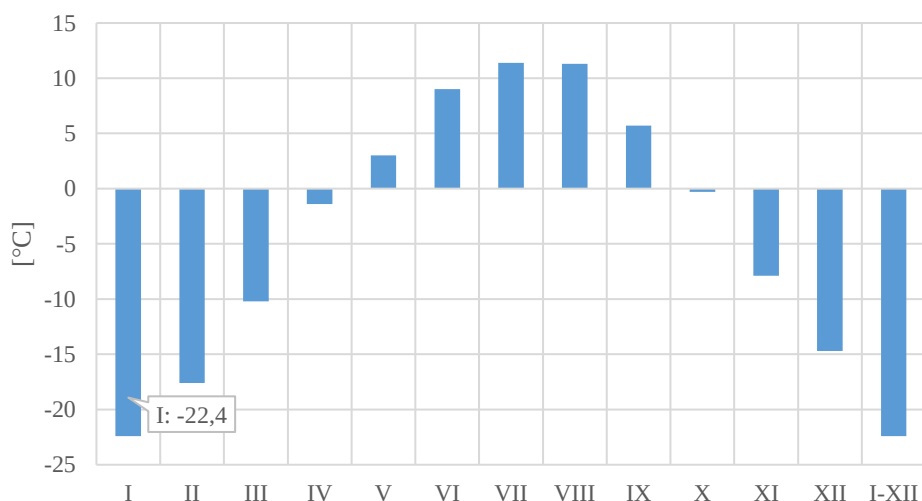
Měsíční teploty vzduchu v Ratiboři jsou typické pro oblasti, které se nacházejí v oblastech mírného přechodného klimatického pásma. Nejteplejší je měsíc červenec (19,8 °C) a nejchladnější leden (−0,9 °C). Viz Obr. 13. Nejvyšší hodnoty maximálních teplot pozorované v daném místě jsou v srpnu (28,6 °C) a nejnižší minimální teploty pak v lednu (−22,4 °C). Viz Obr. 14 a Obr. 15. Mírně se to liší od oblasti např. Slezské vysočiny, kde jsou nejnižší teploty pozorovány v únoru. S ohledem na naměřené hodnoty lze tedy konstatovat, že rozdělení roku na chladnou sezónu (říjen–březen) a teplou sezónu (duben–září) má své opodstatnění.



Obr. 13: Průměrné měsíční teploty vzduchu v letech 2005–2019.

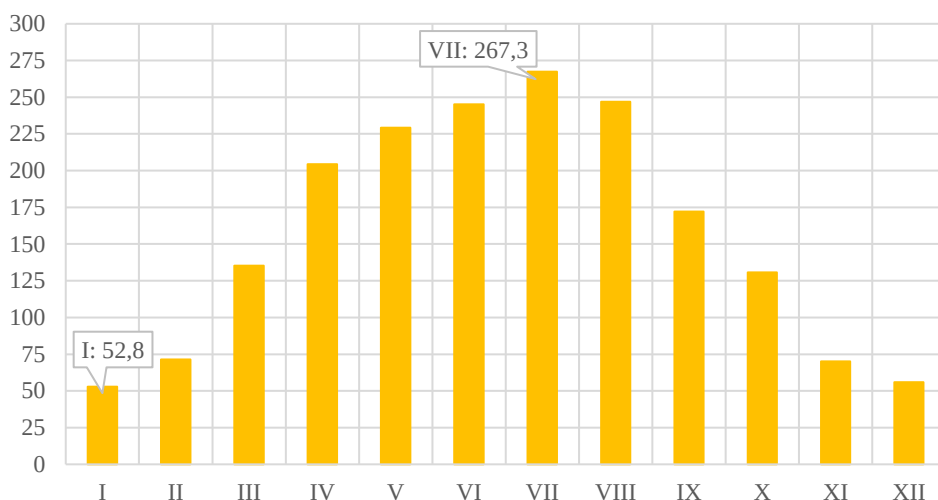


Obr. 14: Maximální měsíční teploty vzduchu v letech 2005–2019.



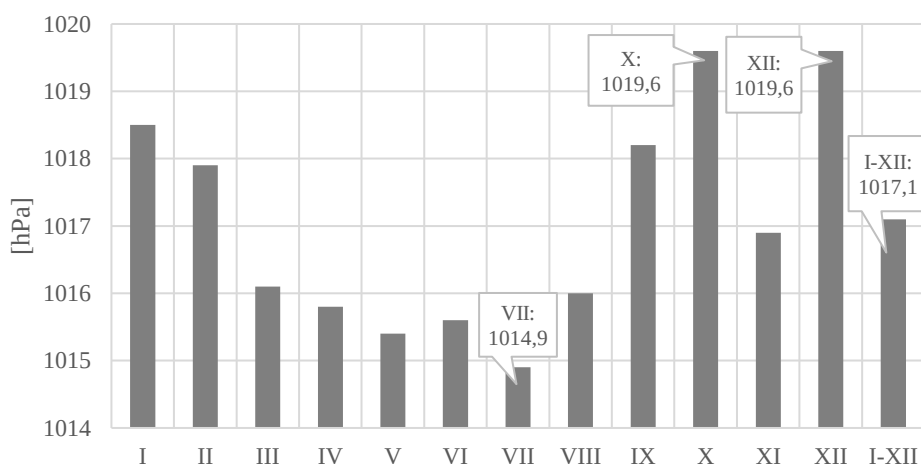
Obr. 15: Minimální měsíční teploty vzduchu v letech 2005–2019.

Průměrná doba slunečního svitu v hodinách závisí na délce dne a celkové oblačnosti. Proto jsou nejvyšší hodnoty pozorované v červenci (267 hodin) a nejnižší v lednu (53 hodin). Viz Obr. 16.



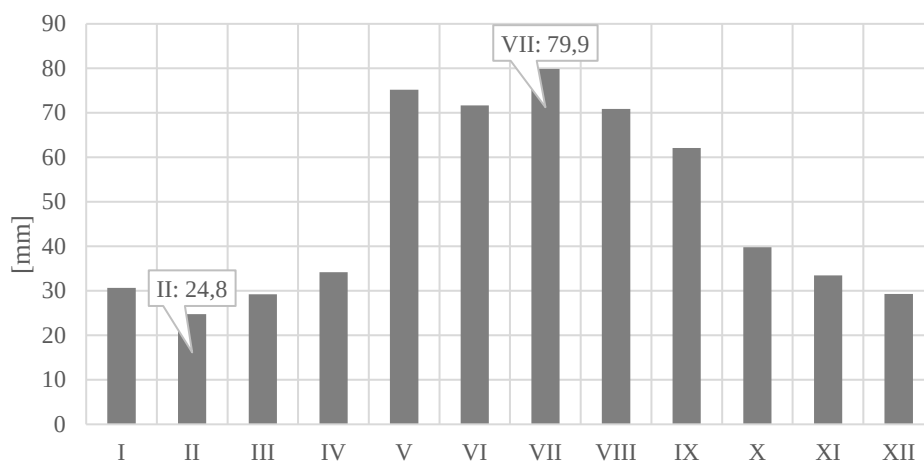
Obr. 16: Průměrné měsíční hodnoty celkového slunečního svitu v hodinách (svislá osa počet hodin) v letech 2005–2019, rok I–XII: 1881 hodin.

Naměřené průměrné měsíční hodnoty atmosférického tlaku jsou typické pro přechodné mírné pásmo. Viz Obr. 17. Nejvyšší průměrné naměřené hodnoty tlaku se vyskytují v říjnu a prosinci (1019,6 hPa) a jsou důsledkem výskytu dlouhodobých tlakových výší v tomto regionu. To zde také ovlivňuje proudění vzduchu v atmosféře. Nejnižší hodnoty tlaku připadají na letní období, kdy je zvýšená cyklónová aktivita, proto je v červenci pozorovaná minimální průměrná hodnota atmosférického tlaku, která činí 1014,9 hPa, což se rovněž odráží ve zvýšeném množství srážek v tomto období.



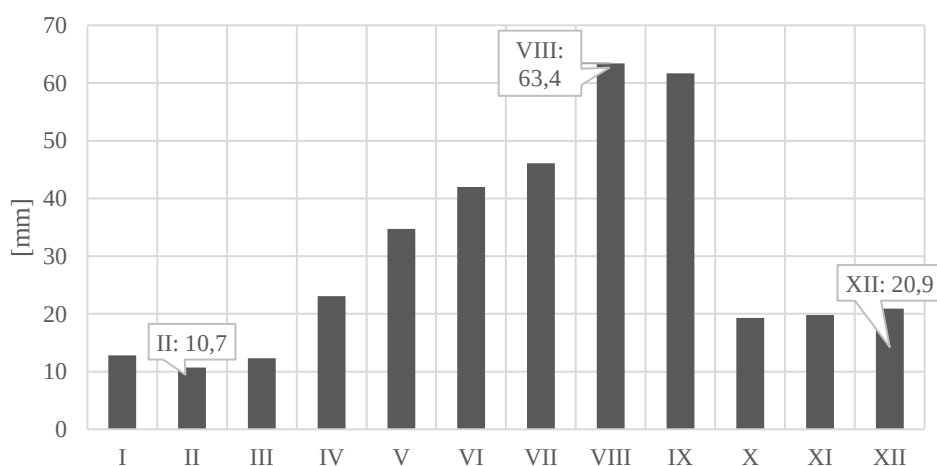
Obr. 17: Průměrné měsíční hodnoty tlaku přepočteného na hladinu moře v letech 2005–2019.

Dlouhodobé hodnoty průměrných měsíčních srážkových úhrnů souvisejí s typickým přechodným charakterem mírného pásma. Ukazují se přitom vlastnosti kontinentálního podnebí s nejvyššími srážkami v létě (konvekční srážky). Celkové maximální množství srážek připadá na červenec: 79,9 mm, minimum jich bývá v únoru: 24,8 mm. Viz Obr. 18.



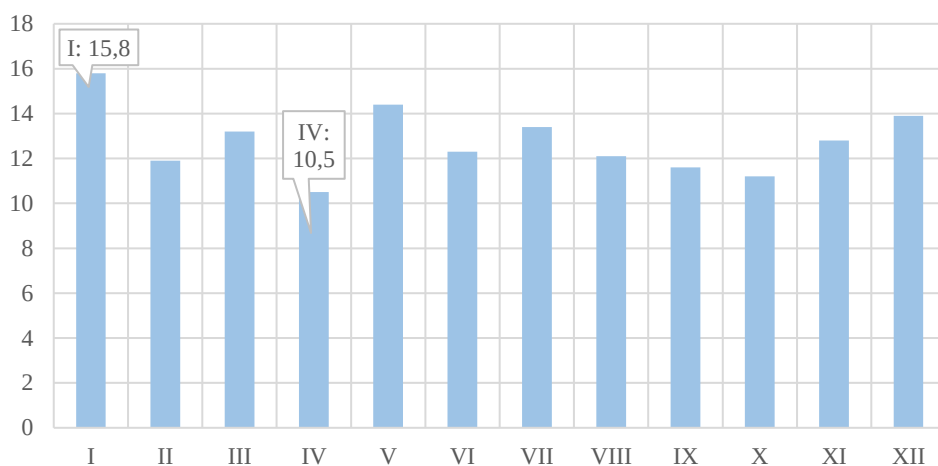
Obr. 18: Průměrné měsíční srážkové úhrny v letech 2005–2019, rok I–XII: 581,2 mm.

Maximální denní srážkové úhrny se nejčastěji vyskytují v teplém ročním období (červenec: 63,4 mm) a souvisejí s konvekční oblačností. Maximální denní srážkové úhrny jsou nejnižší v chladném období: celkové hodnoty za den se pohybují od 20,9 mm v prosinci po minimum 10,7 mm v únoru. Viz Obr. 19.



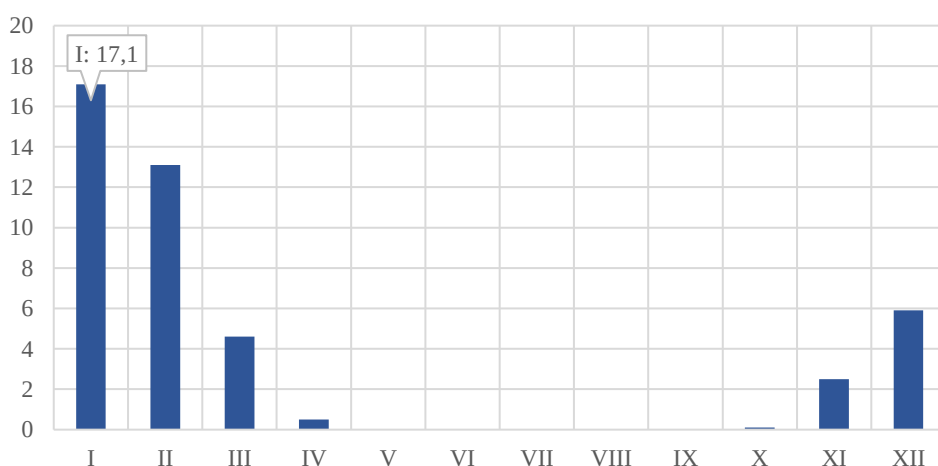
Obr. 19: Měsíční maximální denní srážkové úhrny v letech 2005–2019.

Počet dní se srážkami (denní srážka $\geq 0,1$ mm) je typický pro mírné přechodné klimatické pásmo. Nejvlhčím měsícem podle počtu dní se srážkami je leden (16 dní) a na opačném pólu stojí duben (11 dní). Viz Obr. 20.



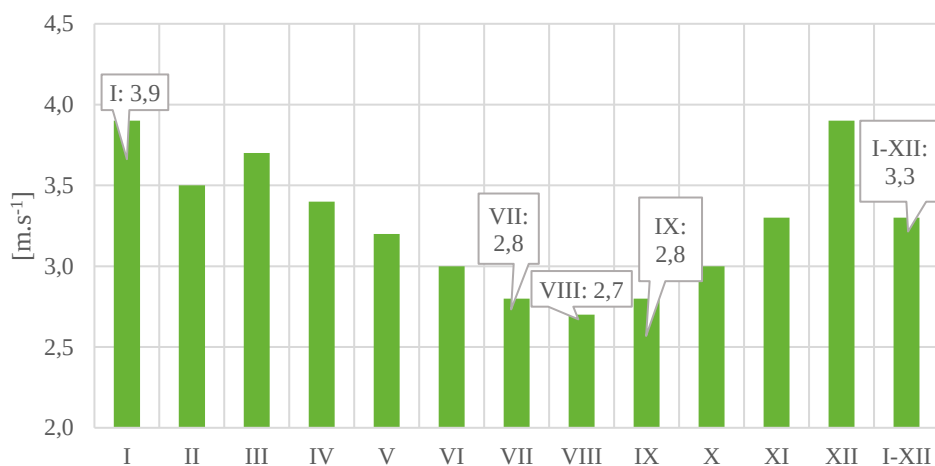
Obr. 20: Měsíční počet dní se srážkami v letech 2005–2019, rok I–XII: 153 dní.

Sněžná pokrývka je v Ratiboři pozorovaná od listopadu do března, výjimečně už v říjnu (0,1 dne) a leží ještě v dubnu (půl dne). Počet dní se sněhovou pokrývkou zprůměrovaný za dané období je ročně 43,9 dne, z čehož nejdéle se sníh drží v lednu (17 dní). Od května do září se sněhová pokrývka nevyskytuje. Viz Obr. 21.



Obr. 21: Měsíční počet dní se sněhovou pokrývkou v letech 2005–2019. Svisle: počet dní, rok I–XII: 44 dní.

Měsíční průměrné rychlosti větru odrážejí povětrnostní podmínky typické pro oblasti, které se nacházejí pod vlivem mírného přechodného pásma kontinentálního charakteru. Nejnížší hodnoty připadají na letní období: v srpnu průměrná rychlost dosahuje maximálně 2,7 m.s⁻¹. Výrazně vyšší rychlosti bývají v zimě. Maximální průměrná rychlost větru je v lednu a dosahuje 3,9 m.s⁻¹. Viz Obr. 22.



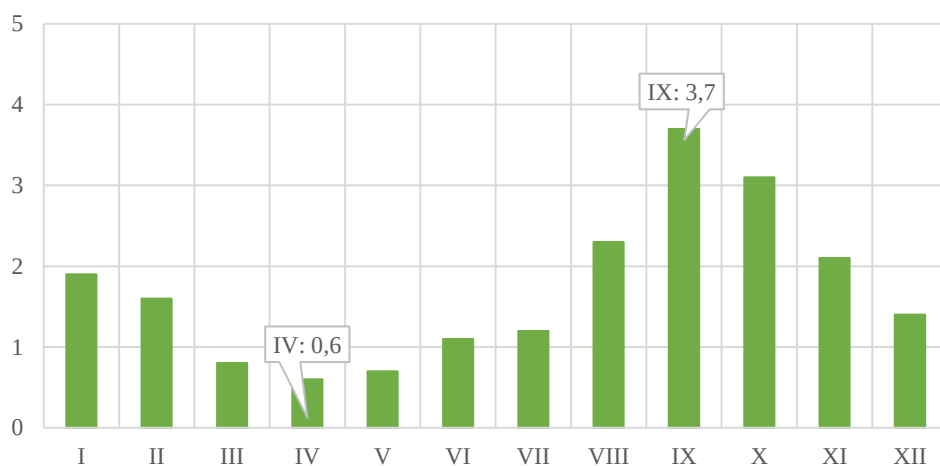
Obr. 22: Průměrné měsíční rychlosti větru v letech 2005–2019.

Podíl bezvětří (*calm*) v měsíčním grafu ukazuje, že v žádném měsíci nepřesahuje 5 % doby. Viditelné jsou relativně vysoké podíly bezvětří od července do října (> 3 %), maximum 4,6 % v říjnu. Nejméně časté je bezvětří v prvním pololetí a nejméně časté je v prosinci: 1,9 % případů. V průměru v roce představuje 3 % všech sledování povětrnostních podmínek. Viz Obr. 23.



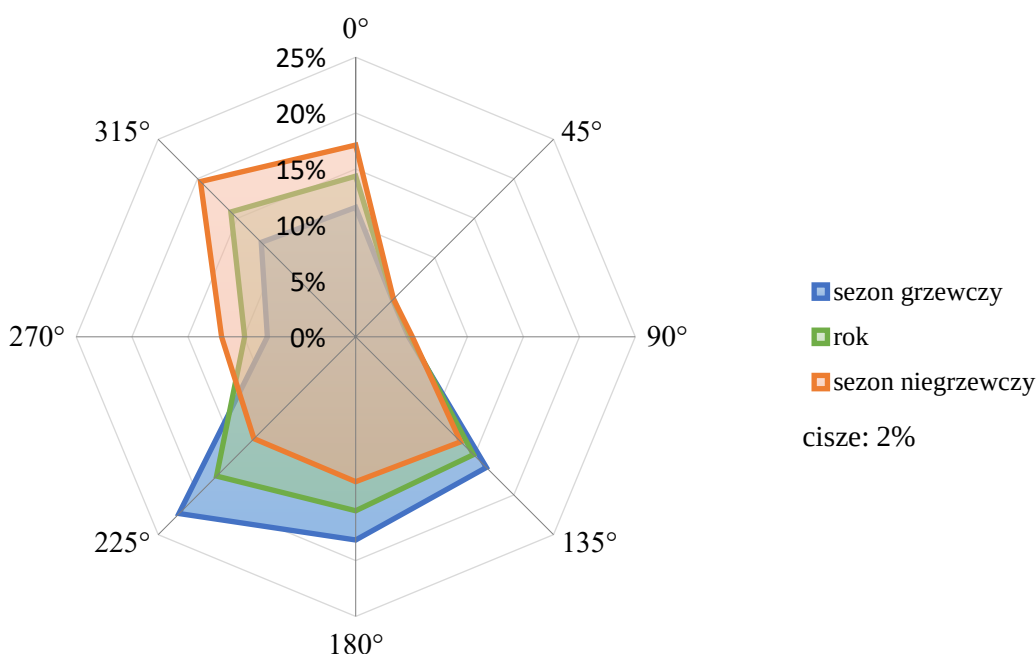
Obr. 23: Měsíční výskyt bezvětří (rychlost větru < 0,5 m/s) v letech 2005–2019.

Počet dní s průměrnou rychlostí větru za den < 2 m.s⁻¹ se vyskytuje nejčastěji v září (4 dny) a říjnu (3 dny). Nejméně často jsou takové dny pozorovány od března do května s minimem v dubnu (celý 1 den). Viz Obr. 24.



Obr. 24: Měsíční výskyt nízkých rychlostí větru (denní průměr < 2 m/s) v letech 2005–2019; rok I–XII: 20,5 dne. Svisle – počet dní.

Větrná růžice v Ratiboři se nachází pod vlivem obecné klimatické cirkulace silně modifikované tvarem terénu. Jak během celého roku, tak v chladné i teplé sezóně převažují poledníkové směry (pásmo 135–225 ° a 315–360 °), přičemž v otopné sezóně získávají nad severním směrem převahu směry z jižní oblasti. Viz Obr. 25.



Obr. 25: Větrná růžice pro Ratibor v letech 2005–2019 – topná sezóna (modrá) X–III, netopná sezóna (červená) IV–IX, rok (zelená).

4.3 Proudění vzduchu v atmosféře z hlediska radiometrických výzkumů

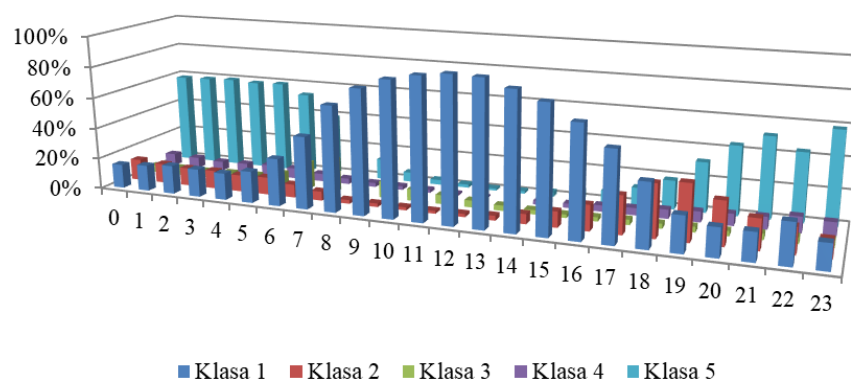
Veličina, která vyjadřuje rozložení teplotních podmínek v atmosféře, jsou tzv. třídy teplotní stratifikace. Tyto třídy zachycují modelový průběh svislého gradientu teploty v přízemní vrstvě atmosféry získaný pomocí radiometru.

Na základě empirických výzkumů odlišujeme 5 takových tříd. Viz Tab. 1.

Tab. 1: Rozdělení tříd teplotní stratifikace podle radiometrických měření.

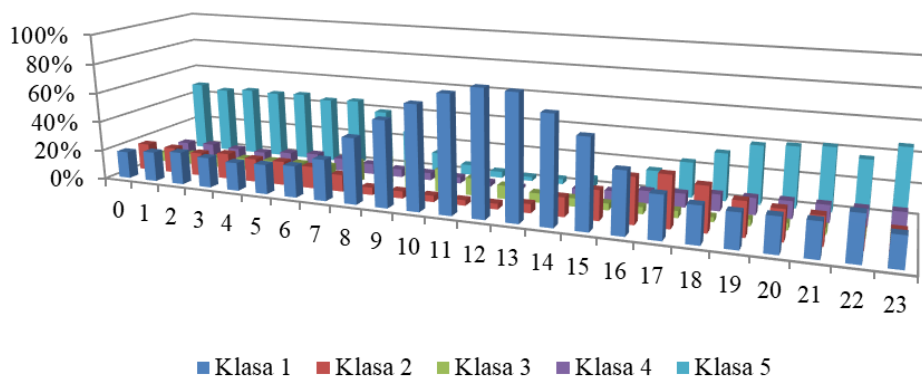
Třída teplotní stratifikace	Popis svislého teplotního rozložení	Typ třídy stability atmosféry v přízemní vrstvě	Část dne (nejčastější výskyt)
1	Je pro ni charakteristické normální rozložení teploty s nárůstem výšky. Na žádné úrovni se nevyskytuje inverze – tato třída přibližně odpovídá nestabilní stratifikaci atmosféry.	nestabilní	den
2	Je pro ni charakteristický výskyt malé vrstvy inverze blízko zemského povrchu (cca 50 m), později normální rozložení teploty.	netečná	večer-noc
3	Je pro ni charakteristické normální rozložení teploty ve vrstvě do cca 100 m nad zemí, následně inverze o mnohem větší tloušťce (cca 500 m) a pak normální rozložení. Tento typ smíšené stratifikace je typický pro tzv. ranní přechod, kdy povrch země ohřátý slunečními paprsky předává teplo přízemní vrstvě atmosféry.	málo stabilní	ráno
4	Přízemní inverze s velkým teplotním skokem, která sahá do výšky cca 50 m nad zemí, pak normální rozložení teploty, v 400 m nad povrchem výšková inverze o tloušťce cca 300 m. Nad ní normální rozložení.	stabilní	noc
5	Silná inverze od povrchu země do výšky cca 100 m; je pro ni charakteristická stálá stratifikace u zemského povrchu.	silně stabilní	noc

V denním průběhu zprůměrovaném za celý rok sledujeme výraznou převahu třídy 1 (normální rozložení teploty od povrchu země) v hodinách kolem poledne. V noci se nejčastěji vyskytuje třída 5 (výrazná přízemní inverze). Viz Obr. 26. Tyto dvě třídy výrazně převažují nad ostatními a potvrzují tak teorii evoluce struktury hraniční vrstvy Stulla (Stull 1988).

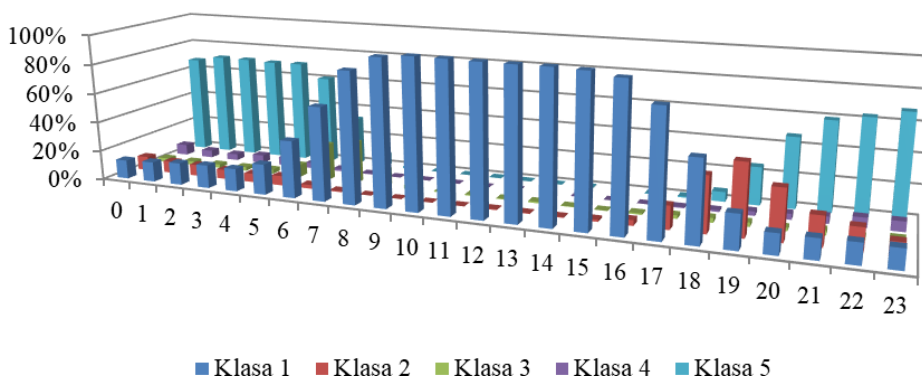


Obr. 26: Denní průběh tříd teplotní stratifikace v údolí horní Odry průměrovaný za rok.

V zimní sezóně je pro denní průběh tříd teplotní stratifikace atmosféry (TSA) charakteristická kratší doba trvání třídy 1 během dne a nárůst podílu tříd 2–4, s téměř identickým podílem třídy 5. Srovnej Obr. 27 a Obr. 28. Za zmínku stojí souvislost četnosti výskytu třídy 5 s délkou noční doby.

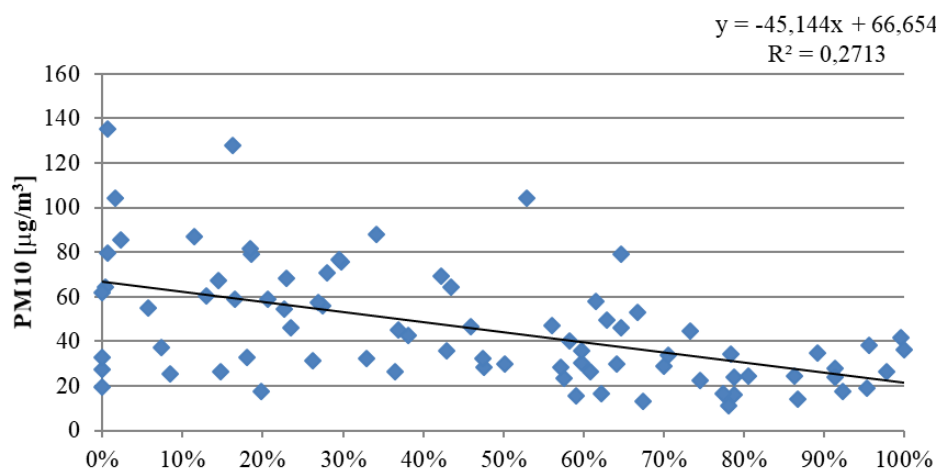


Obr. 27: Denní průběh teplotní stratifikace v údolí horní Odry v zimní sezóně (chladné X-III).

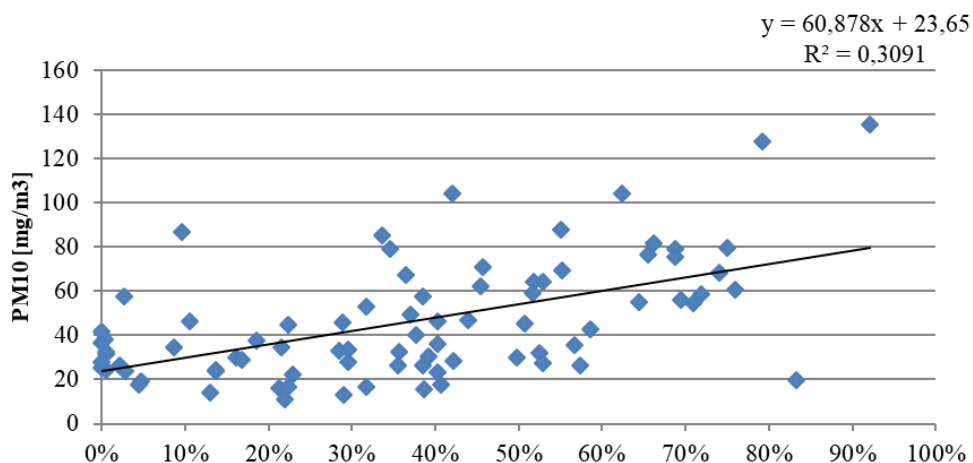


Obr. 28: Denní průběh teplotní stratifikace v údolí horní Odry v letní sezóně (teplé IV - IX).

Význam tříd teplotní stratifikace se odráží také na pozorovaných koncentracích suspendovaných částic PM_{10} . Srovnání byla provedena pro období jednoho dne. Srovnávali jsme průměrné denní koncentrace PM_{10} s procentním podílem jednotlivých tříd v daném dni. Viz Obr. 29 a Obr. 30.



Obr. 29: Denní podíl třídy 1 a průměrné denní koncentrace PM_{10} – zima (chladná část roku X–III).



Obr. 30: Denní podíl třídy 5 a průměrné denní koncentrace PM₁₀ – zima (chladná část roku X–III).

Z vynesných závislostí vyplývá, že třídy 1 a 5 významně souvisí s naměřenými koncentracemi PM₁₀. Čím víc je za den třídy 1, tím je koncentrace PM₁₀ nižší. U třídy 5 pozorujeme opačnou situaci.

Dále byla stanovena korelace koncentrace PM₁₀, tříd teplotní stratifikace z radiometru a meteorologických parametrů naměřených na stanici IMGW-PIB Ratiboř Studzienna. Závislosti jsou sledované za dne. Viz Tab. 2.

Tab. 2: Korelace koncentrace PM₁₀, teplotní stratifikace a meteorologických podmínky za jeden den.

Faktor	Koeficient korelace s PM ₁₀
Třída TSA 1	-0,554
Třída TSA 2	-0,154
Třída TSA 3	0,183
Třída TSA 4	0,166
Třída TSA 5	0,496
T _{Max}	-0,335
T _{Min}	-0,464
T _{Prům}	-0,399
T _{MIG}	-0,458
Srážky	-0,113
Doba trvání deště	-0,110
Doba trvání sněhové srážky	0,188
Doba trvání mlhy	0,567
Doba trvání oparu	0,613
Relativní vlhkost	0,387

Faktor	Koeficient korelace s PM ₁₀
Rychlost větru	-0,354
Základna mraků	0,175
Viditelnost	-0,718
Celková oblačnost	0,018

Analýza výsledků uvedených v Tab. 2 ukazuje významnou korelaci denní koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ v Ratiboři a tříd TSA 1 (záporná korelace) a 5 (kladná korelace). Dále ukazuje významnou korelaci denní koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ a těchto meteorologických jevů: charakteristikami teplot a viditelnosti (záporná korelace), doby mlhy a zamlženosti (kladná korelace). O něco slabší souvislost je pozorovaná s relativní vlhkostí (kladná korelace) a rychlostí větru (záporná korelace). Doba trvání tříd TSA 2–4 vykazuje slabou souvislost s denní koncentrací částic PM₁₀.

Provedené analýzy potvrzují závěry z dosavadních výzkumů vlivů meteorologických podmínek na koncentrace suspendovaných částic. V případě stabilního počasí ve smyslu malé typologické proměnlivosti (představované třídami 1 a 5) jsou závislosti mezi meteorologickými podmínkami a koncentrací částic významné. V případě proměnlivého počasí zastoupeného třídami TSA 2 – 4 je závislost méně významná.

Výše uvedené charakteristiky rozptylových podmínek v atmosféře je možné použít, pokud máme k dispozici radiometr. Pro vyhodnocení vlivu těchto podmínek v dřívějším období bylo potřeba použít jiný prostředek, který vychází z radiometrických údajů z let 2018 – 2020 a bylo možné ho použít zpětně. Proto byla pro vyhodnocení rozptylových podmínek v zájmové oblasti využita vícerozměrná analýza (shlukování – Sammonova projekce) (Sammon 1969). Jejím provedením byly rozptylové podmínky rozčleněny do skupin, které se nazývají ventilační indexy (IWW). Nejprve bylo provedeno seskupení vektorů hodinových hodnot meteorologických prvků a pro jednotlivé skupiny byly vypočítané průměrné koncentrace znečištění. Pro takto získané skupiny s nejvyššími hodnotami koncentrací znečištění byly typické následující vlastnosti:

- malá rychlost větru (okamžitý průměr < 2 m.s⁻¹),
- malá viditelnost, maximálně 1 000 m,
- výskyt mlhy nebo zamlžení,
- úplná inverze (třída tepelné stratifikace TSA 5).

Pro zjednodušení v dané sledované hodině bylo vyčleněno 5 partiálních indexů:

$$I_1 = \begin{cases} 1 & \text{kdy rychlost větru} \leq 2 \text{ m.s}^{-1} \\ 0 & \text{v opačném případě} \end{cases}$$

$$I_2 = \begin{cases} 1 & \text{kdy rychlost větru} = 0 \text{ m.s}^{-1} \\ 0 & \text{v opačném případě} \end{cases}$$

$$I_3 = \begin{cases} 1 & \text{kdy viditelnost} < 10 \text{ km} \\ 0 & \text{v opačném případě} \end{cases}$$

$$I_4 = \begin{cases} 1 & \text{kdy se vyskytují mlhy nebo zamlžení} \\ 0 & \text{v opačném případě} \end{cases}$$

$$I_5 = \begin{cases} 1 & \text{kdy třída stratifikace} = 5 \\ 0 & \text{v opačném případě} \end{cases}$$

Celkový hodinový index byl poté vypočítaný ze vzorce:

$$I(h) = \sum_{k=1}^5 I_k(h)$$

Jelikož má na úroveň znečištění také vliv předchozí situace, byl konečný ventilační index stanoven jako součet třech posledních hodinových indexů:

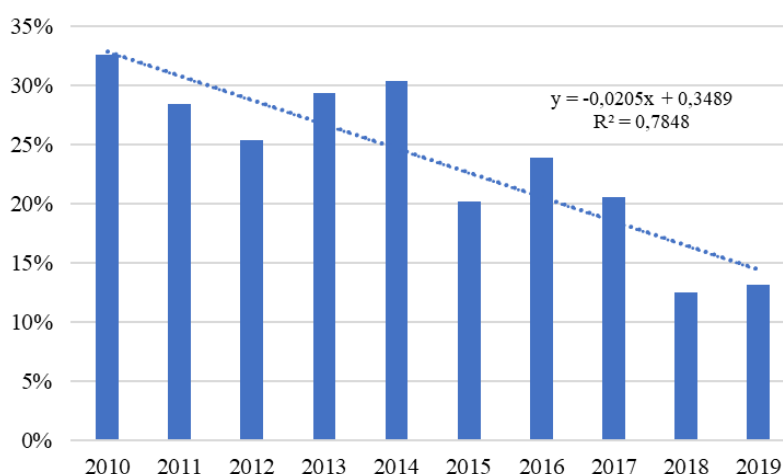
$$IWW(h) = I(h) + I(h - 1) + I(h - 2)$$

Klasifikace podle použitých ventilačních indexů je uvedena v Tab. 3.

Tab. 3: Kvantifikace ventilačního indexu (IWW).

Hodnota indexu IWW	Charakteristika	Třída proudění
0	nejdou splněny žádné podmínky pro hodnocení rozptylu	žádná třída
1 – 3	dobré rozptylové podmínky	A
4 – 6	mírně nepříznivé rozptylové podmínky	B
7 – 8	nepříznivé rozptylové podmínky proudění	C
9 – 12	špatné rozptylové podmínky	D

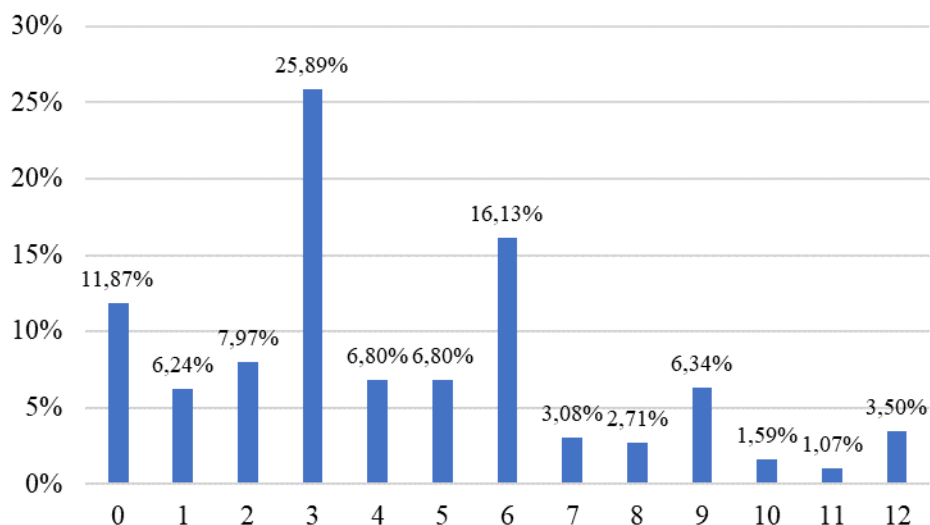
Na základě výše uvedeného algoritmu byly stanoveny ventilační indexy pro období 2010–2019. Obr. 31 ukazuje roční variabilitu ventilačního indexu odpovídajícího špatným rozptylovým podmínkám (třída D), přičemž je patrný klesající trend jeho výskytu. To znamená, že v posledních letech je pozorováno více situací s větší dynamikou počasí (méně inverzí) a tudíž méně situací, které přejí vysokým koncentracím znečištění ovzduší. Obzvláště dobře je to vidět v letech 2015–2019 (nejlepší situace byla v letech 2018 a 2019).



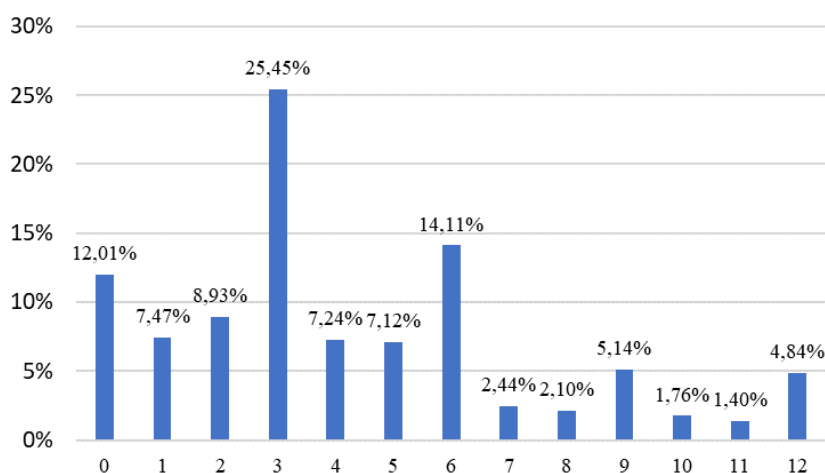
Obr. 31: Podíl IWW se špatnými rozptylovými podmínkami – třída D v letech 2010–2019.

4.4 Rozptylové a povětrnostní podmínky během společných měření

Podíl výskytu jednotlivých ventilačních indexů v letech 2018 a 2019, tedy během společných měření v rámci projektu, je uveden na Obr. 32 a Obr. 33.



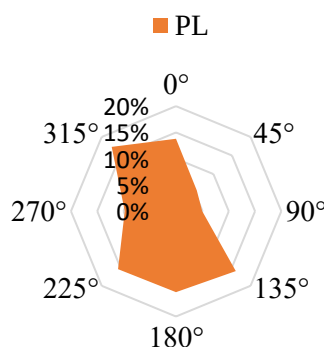
Obr. 32: Podíl výskytu jednotlivých ventilačních indexů (IWW) v roce 2018 pro okolí Ratiboře. Svisle – podíl situace.



Obr. 33: Podíl výskytu jednotlivých ventilačních indexů (IWW) v roce 2019 pro okolí Ratiboře. Svisle – podíl situace.

Analýza četnosti výskytu indexu proudění (IWW) uvádí, že v obou letech převažovaly dny s dobrými a mírně nepříznivými rozptylovými podmínkami IWW < 6. Situace s nepříznivými a velmi špatnými rozptylovými podmínkami byly v méně než 20 % času za rok. To znamená, že po tuto dobu roku smogové situace na obou stranách hranice odpovídají emisím prachových částic ze zdrojů při zemi nebo z komunikací a povrchu země.

Ve světle takto utvářených rozptylových podmínek vypadá větrná růžice z Ratiboře jako na Obr. 34.

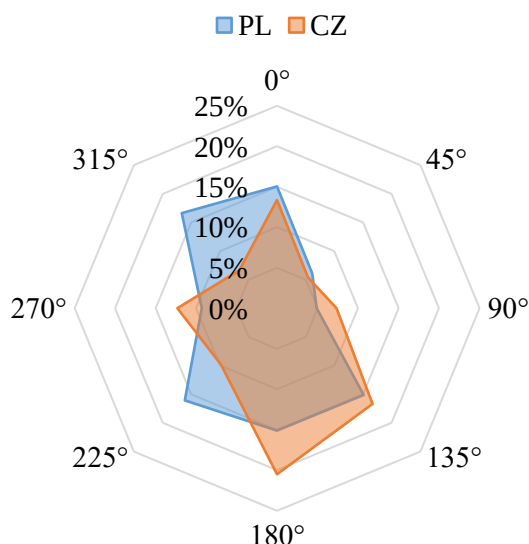


Obr. 34: Větrná růžice pro Ratiboř za období 2018–2019

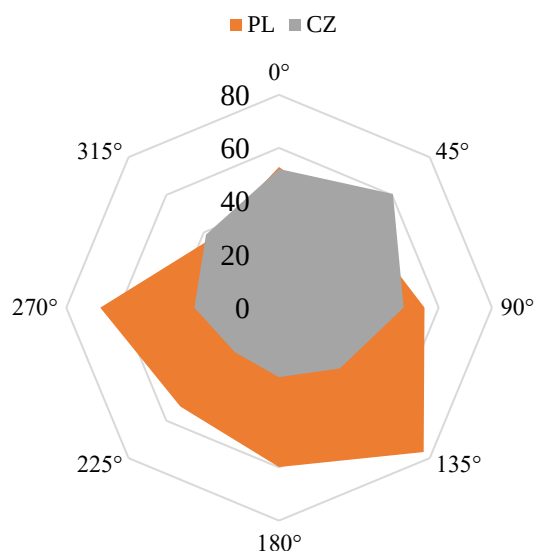
Větrná růžice za období 2018–2019 je svým tvarem téměř identická jako růžice za víceleté období. Lze tu také vysledovat silný vliv tvaru terénu na převládající směry větru.

4.5 Porovnání povětrnostních podmínek a koncentrací PM_{10} během společných měření

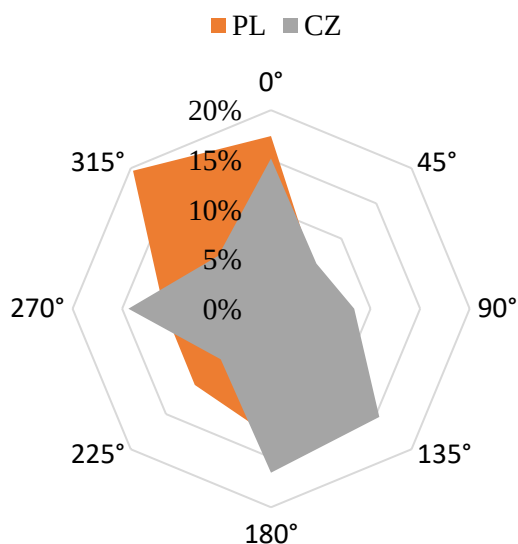
Analýza výsledků měření směru a rychlosti větru na měřicích stanicích v Ratiboři a Horní Suché během společných měření (2018–2019) ukázala podobnost růžic s průměrnou větrnou růžicí pro dlouholeté období z meteorologické stanice v Ratiboři. Na obou místech tvar větrné růžice ovlivňují procesy obecné cirkulace dané profilem terénu. V případě Horné Suché pozorujeme drobné zvětšení podílu jižního směru na úkor severozápadního směru, což může být způsobené rozdílem ve výšce měření a mírou zakrytí horizontu. Viz Obr. 35. Je však třeba uvést, že s ohledem na umístění měřicí stanice u paty věže nezabezpečuje plně reprezentativní výsledky měření rychlosti a směru větru. V topné sezóně (říjen–březen) získává větrná růžice na obou stanicích rovnoměrnější tvar, přičemž v případě Horní Suché je postřehnutelná lehká převaha větru z SV a v případě Ratiboře z jihu. Viz Obr. 36. Pro letní sezónu (duben–září) mají růžice z obou míst podobný tvar, který se příliš neodchyluje od celoročních růžic. Viz Obr. 37.



Obr. 35: Větrná růžice pro Ratiboř (PL) a Horní Suchou (CZ) za období 2018–2020.

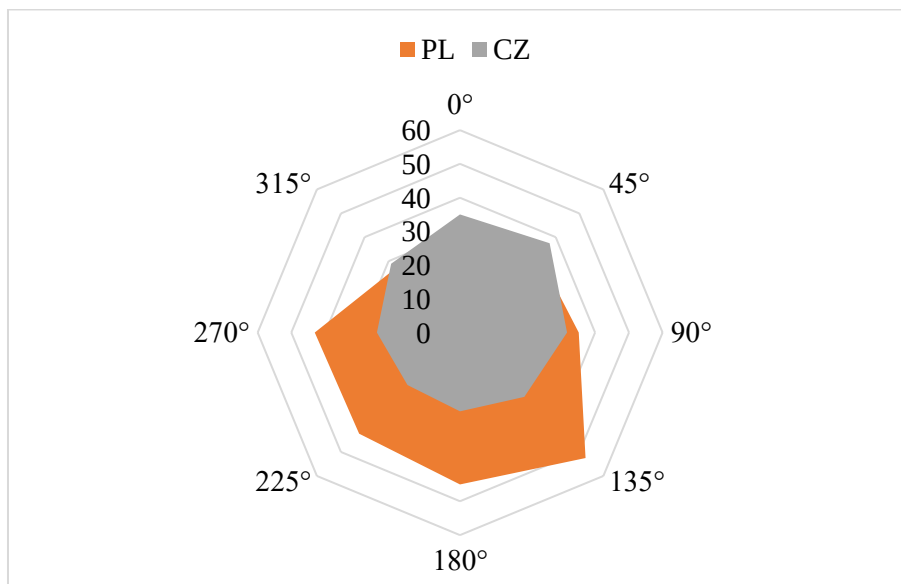


Obr. 36: Větrná růžice [%] pro Ratiboř (PL) a Horní Suchou (CZ) za období 2018–2019 (topná sezóna).

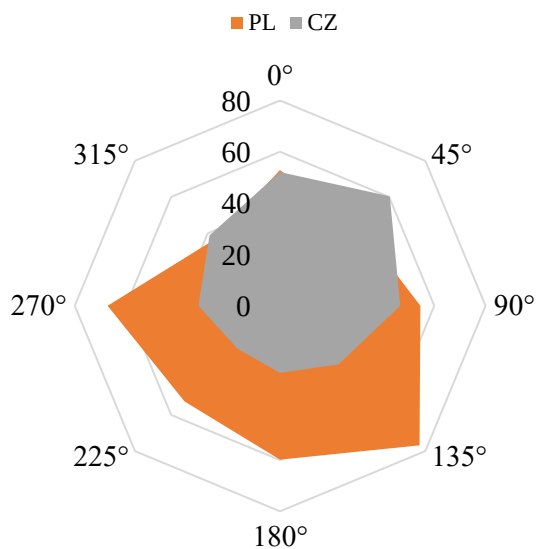


Obr. 37: Větrná růžice pro Ratiboř (PL) a Horní Suchou (CZ) za období 2018–2019 (netopná sezóna).

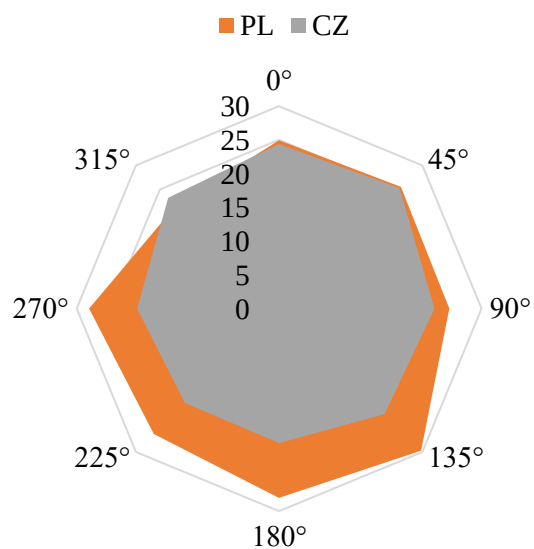
Zajímavý tvar mají koncentrační růžice PM_{10} . Viz Obr. 38 - Obr. 40. Ve všech případech (rok, topná sezóna a netopná sezóna) je na stanici v Ratiboři pozorovatelná největší koncentrace z jihu (135–225 °) a v případě Horní Suché je příliv rovnoměrný z obou směrů. Tuto situaci může ovlivňovat jak odlišné geografické umístění obou stanic, tak i značný rozdíl ve výšce měření větru a znečištění.



Obr. 38: Koncentrační růžice PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] pro Ratiboř (PL) a Horní Suchou (CZ) z období 2018–2019.



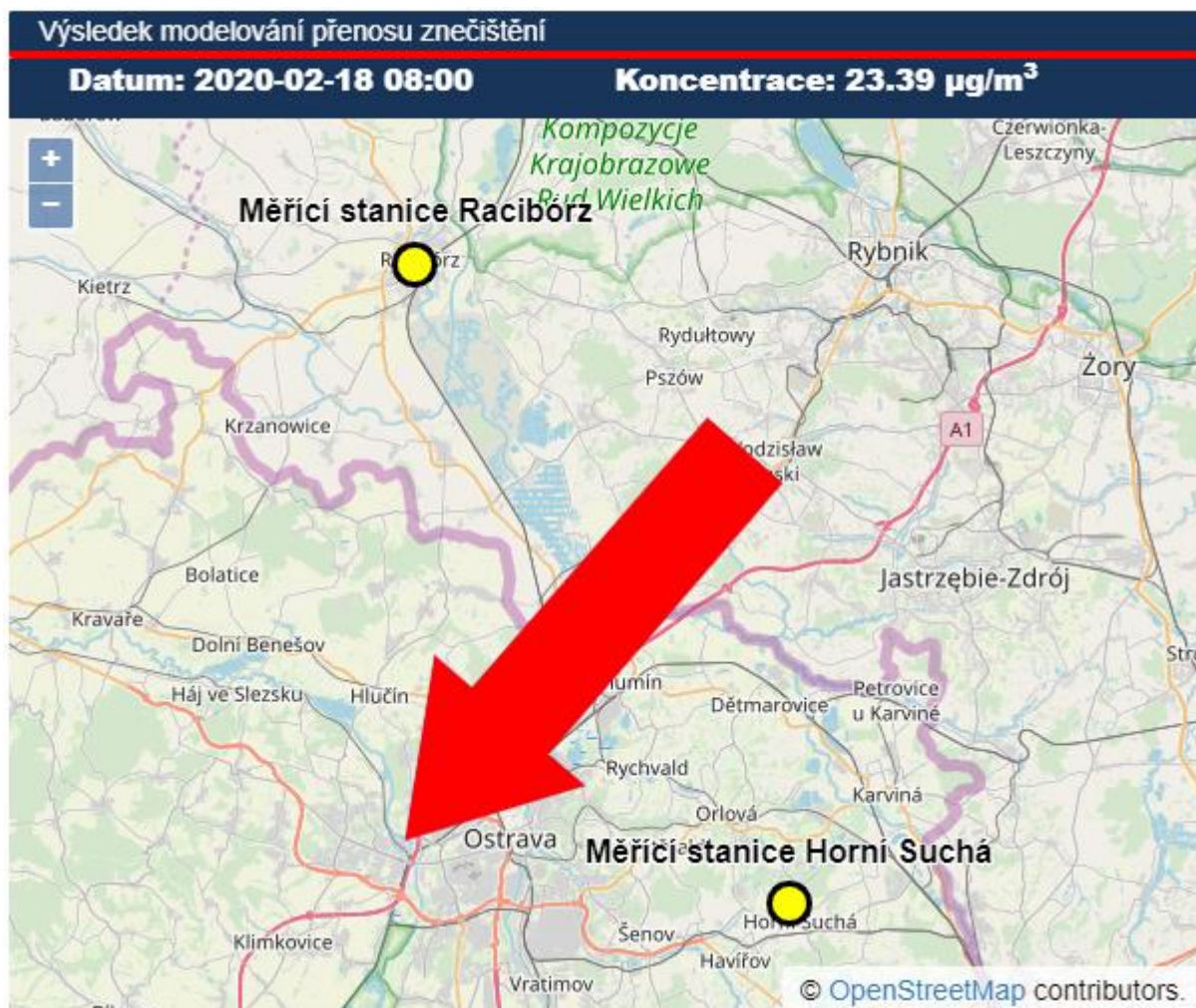
Obr. 39: Koncentrační růžice PM_{10} ($\mu\text{g}.\text{m}^{-3}$) pro Ratiboř (PL) a Horní Suchou (CZ) z období 2018–2019 (topná sezóna).



Obr. 40: Koncentrační růžice PM_{10} ($\mu\text{g.m}^{-3}$) pro Ratiboř (PL) a Horní Suchou (CZ) z období 2018-2019 (neotopná sezóna).

5 Vektor přenosu znečištění

Výpočet hodnoty a směru vektoru přenosu znečištění je prováděn jednak na základě měření realizovaných v rámci projektu AIR BORDER a jednak je využíváno všech dalších dostupných dat, která na polské straně zájmové oblasti měří na stanicích IMGW-PIB a na české straně oblasti pak ČHMÚ. Data z kontinuálních měření meteorologických parametrů jsou analyzována a vyhodnocený vektor je znázorňován jako hodnota a směr přeshraničního přenosu PM₁₀ prostřednictvím webového rozhraní a aplikace pro mobilní telefony.



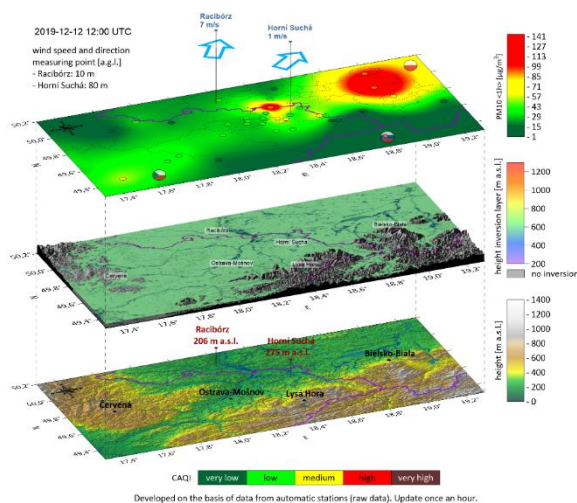
Obr. 41: Ukázka výstupu projektu na webovém rozhraní

5.1 Vektor směru větru na pozadí tepelné stratifikace atmosféry

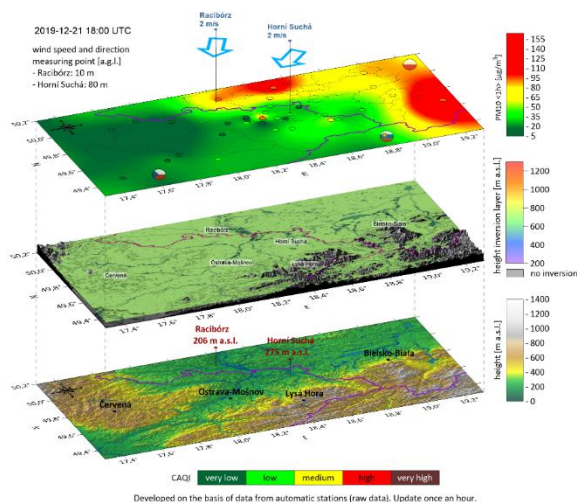
Pro zobrazení přenosu znečištění ovzduší byl navržen dynamický systém vizualizace směru přenosu znečištění (mění se každou hodinu). Základ, ze kterého vychází, zohledňuje výšku zadržující vrstvy stanovenou na základě radiometrických měření z Ratiboře a verifikovaný vertikální teplotní profil ovzduší na pozemních meteorologických stanicích ČHMÚ (Lysá hora, Červená). Dále zahrnuje vektor větru ve výšce 10 m nad zemí v Ratiboři a 80 m nad zemí v Horní Suché a koncentrace znečištění na stanicích imisního monitoringu v Polsku (PMS/GIOŚ) a Česku (ČHMÚ).

Níže uvedené Obr. 42 – Obr. 45 ukazují výskyt různých situací přenosu částic ovzduším v dolní části mezní vrstvy atmosféry. Vyplývá to z diferenciace termodynamických podmínek v této části atmosféry. V cca 90 % případů byl vektor směru větru v obou výškách podobný, ačkoli ne shodný.

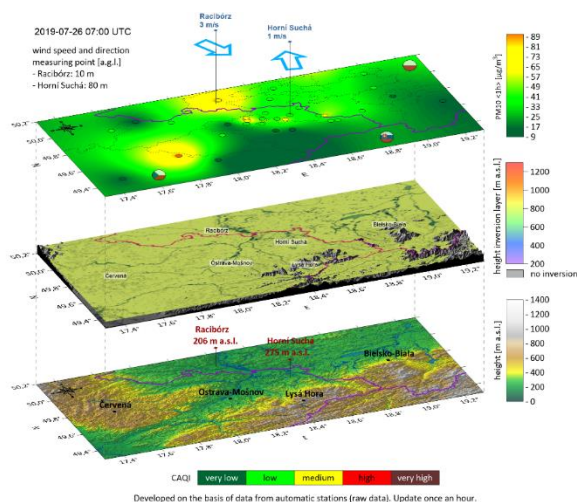
V cca 10 % případů byl směr vektoru větru v 10 m v Ratiboři a v 80 m v Horní Suché opačný. Těch 10 % případů vyplývalo z umístění horní hranice inverze ve výšce nižší než 85 m. To může znamenat, že v dolní vrstvě proudil vzduch se znečištěním pocházejícím z nízkých komunálních zdrojů (z lokálních topenišť) a ve vrstvách nad inverzí se znečištěním spojeným s průmyslovými emisemi.



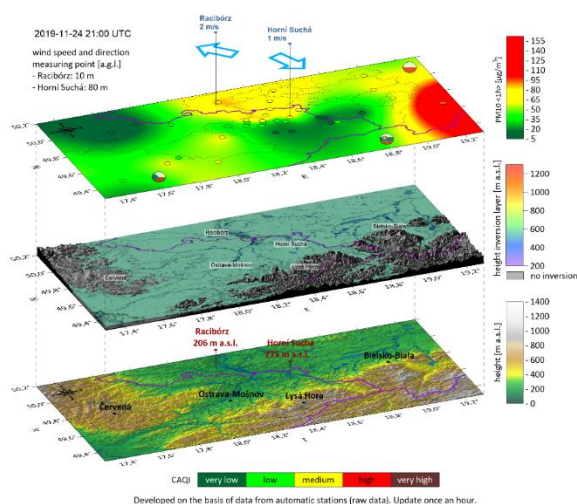
Obr. 42: Příklad vizualizace inverze a vektorů větru podobných pro Ratiboř a Horní Suchou. Proudění z CZ do PL.



Obr. 43: Příklad vizualizace inverze a vektorů větru podobných pro Ratiboř a Horní Suchou. Proudění z PL do CZ.



Obr. 44: Příklad vizualizace inverze a vektorů větru v opačném směru pro Ratiboř a Horní Suchou. Ratiboř proudění z PL, Horní Suchá proudění z CZ.



Obr. 45: Příklad vizualizace inverze a vektoru větru v opačném směru pro Ratiboř a Horní Suchou. Ratiboř proudění z CZ, Horní Suchá proudění z PL.

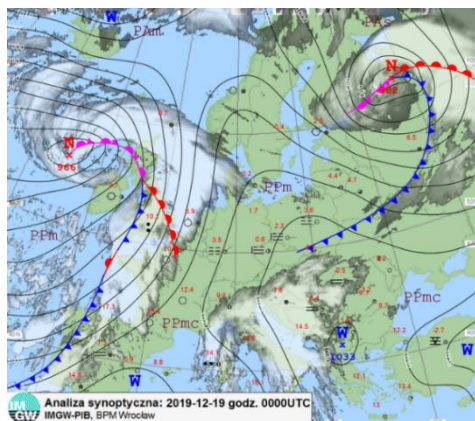
5.2 Analýza situace s vysokými koncentracemi znečištění

Dne 19. prosince 2019 se vyskytla situace s extrémně vysokými koncentracemi suspendovaných částic PM. Tato situace byla samostatně podrobně analyzována.

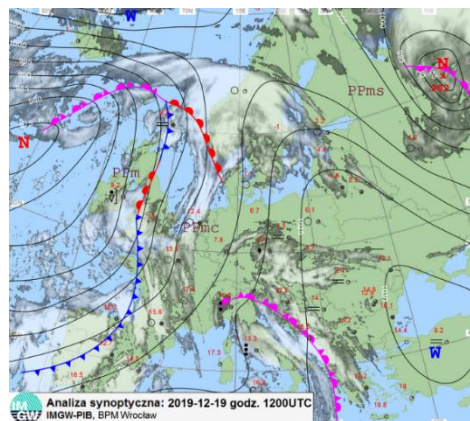
Synoptická mapa na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** ukazuje, že jižní Polsko se nacházelo pod vlivem rozsáhlé tlakové výše s centrem nad Balkánem v teplé polárně-mořské vzduchové hmotě. Bylo pozorováno jihozápadní proudění vzduchových hmot nad inverzní vrstvou. Tuto situaci dokládá i modelování zpětných trajektorií (viz Obr. 47). V noci se vyskytla nízká teplotní inverze a udržovaly se slohové kupy (*Stratocumulus*) středního a nízkého patra. Průměrná denní teplota byla 6,3 °C. Nejnižší teploty okolo -0,4 °C se vyskytovaly v noci a večer.

V ranních hodinách byl ve vrstvě pod inverzí pozorován opačný směr vektoru větru. Vál tam slabý vítr ze severovýchodu. Je možné, že znečištění proudilo v této vrstvě z oblasti Polska do Česka. Ve vrstvě nad inverzí byl pozorován příliv vzduchu z jihu. Viz Obr. 48 (a). V odpoledních hodinách oba vektory větru (dolní v Ratiboři a horní v Horní Suché) přicházely z jihu. Viz Obr. 48 (b).

Nejvyšší zaznamenané koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ byly pozorovány v nočních hodinách při výskytu výrazné vrstvy přízemní inverze (o tloušťce max. 250 m nad povrchem) pod dobu 11 hodin (od 01:00 do 12:00 UTC). V této době ceilometr zaznamenal vrstvu výskytu výškové inverze cca 1 000 m nad zemí v nočních hodinách a pak od 12 h do půlnoci. Nejvyšší koncentrace suspendovaných částic PM byly zaznamenány kolem 16 hodiny UTC a pravděpodobně souvisela s uvolněním znečištění z inverzní vrstvy do celého profilu směšovací vrstvy. Viz Obr. 49.

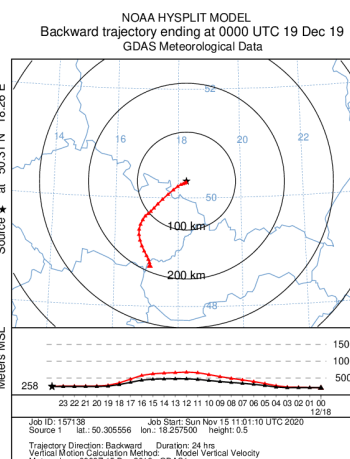
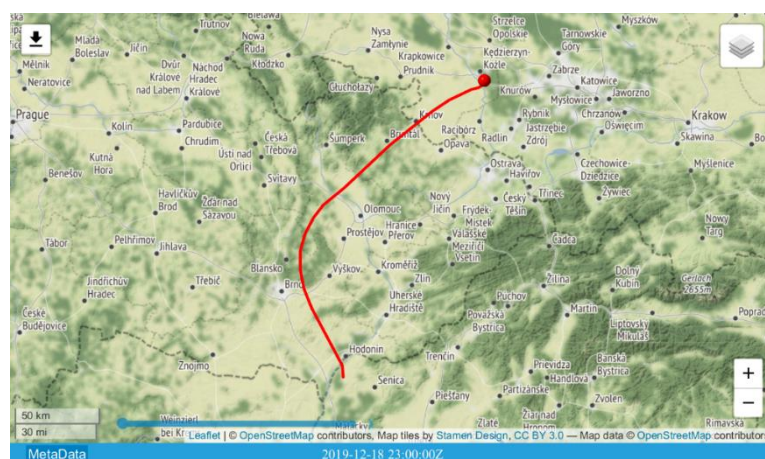


(a)

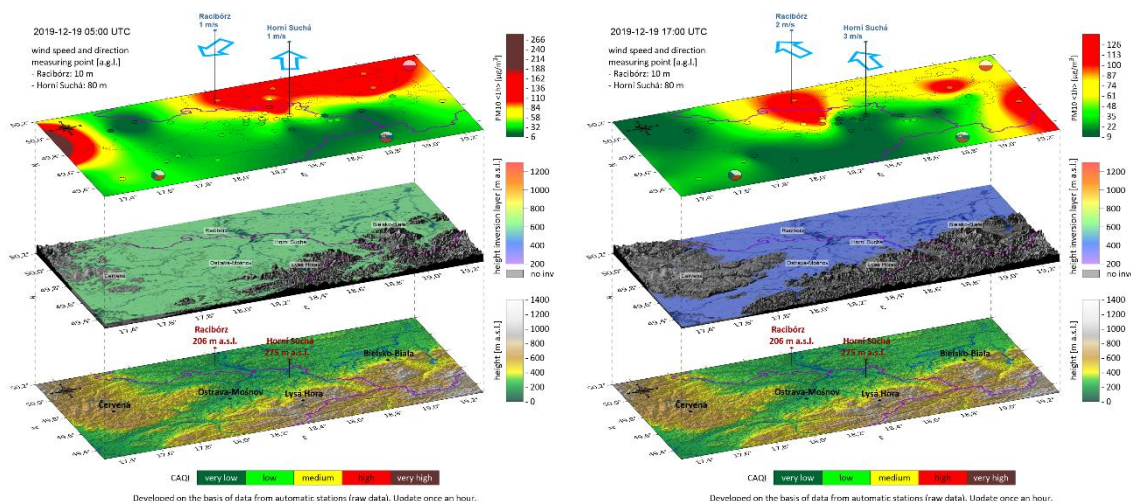


(b)

Obr. 46: Mapa synoptické situace z 19. 12 2019; čas 0:00 UTC (a); 12:00 UTC (b) (zdroj: IMGW-PIB).



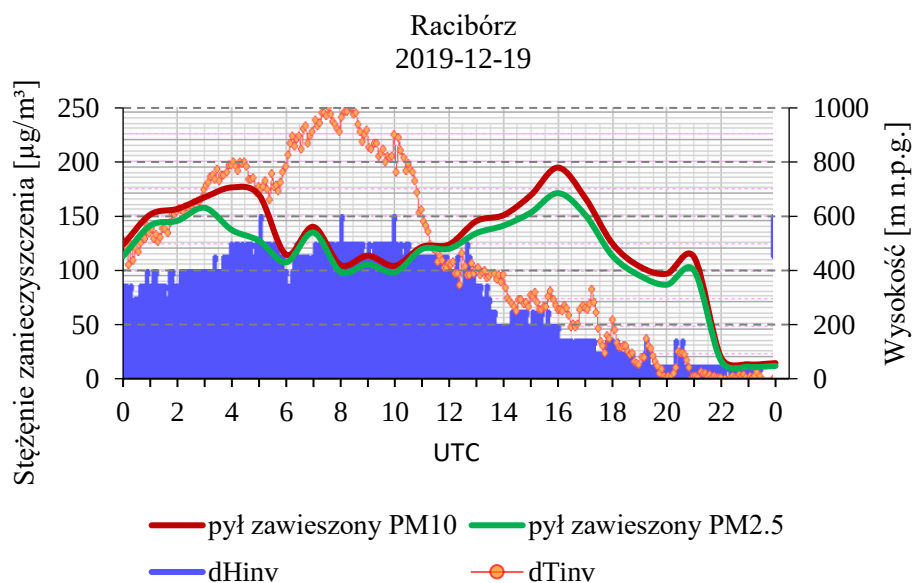
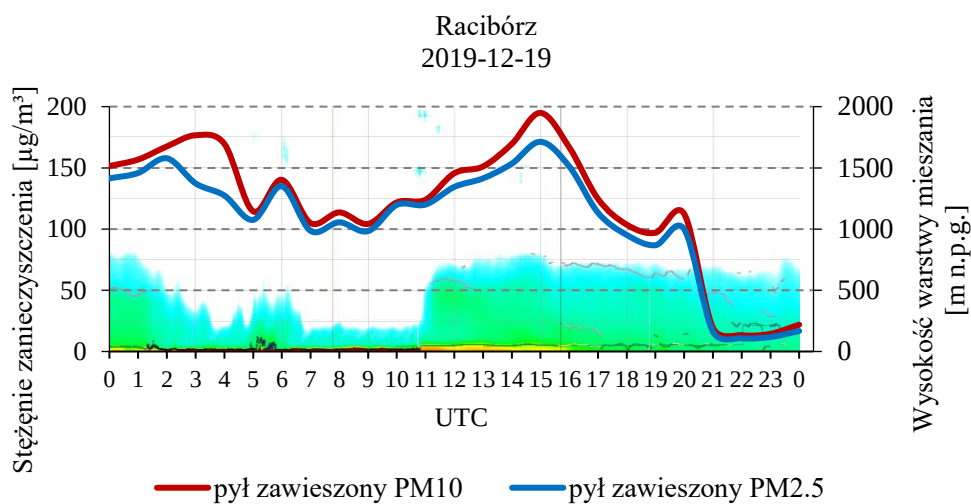
Obr. 47: Zpětné trajektorie – situace z 19. 12. 2019

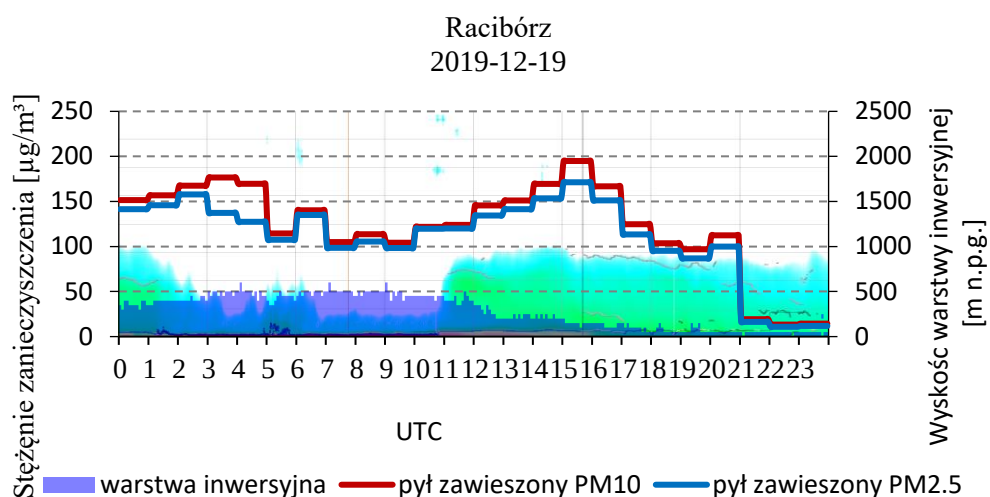


(a)

(b)

Obr. 48: Vizualizace inverze a vektoru větru při vysokých koncentracích PM_{10} a $PM_{2.5}$ ze dne 19. 12. 2019 – situace ráno 5:00 UTC (a); situace večer 17:00 UTC (b).





Obr. 49: Vizualizace koncentrací PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ dne 19. 12. 2019 s využitím radiometru a ceilometru (d_{Hinw} – výška směšovací vrstvy, d_{Tinw} – výška teplotní inverze). Ratibóř, svisle: koncentrace znečištění / výška vrstvy mísení (m nad zemí)

6 Letová měření vertikálních profilů znečištění ovzduší bezpilotní vzducholodí

Hlavním cílem měření znečištění ovzduší suspendovanými částicemi (PM) v lokalitě František bylo měření přenosu suspendovaných částic v přízemním horizontu a v horizontu 80 m nad zemí a charakterizace zdrojů tohoto znečištění v rozdělení na lokální topeniště, dopravu a průmyslové zdroje z Polska a z Česka.

Cílem letových měření bylo doplnění o obraz přenosu znečištění a o typických tvarech vleček znečišťování u uvedených druhů zdrojů pomocí měření vertikálních profilů znečištění PM. Pro měření vertikálních profilů atmosféry byla využívána speciální bezpilotní vzducholod' vybavená měřicím zařízením pro měření koncentrací suspendovaných částic různé velikosti.

6.1 Měřicí zařízení

Pro měření je použitý bezpilotní letecký systém (UAS), který se skládá z několika částí:

- bezpilotní vzducholod' (UAV),
- pozemní řídicí stanice (GCS),
- měřicí zařízení.

Jako UAV byla využita bezpilotní vzducholod' ACC15X, která je určena pro provádění leteckých prací a létání pro vlastní potřebu. Trup vzducholodě je neztužený, tedy tvořen pouze pláštěm a duší (BLIMP). Duše má větší rozměr než vnější plášť. Díky tomu, po naplnění vzducholodi nosným plynem na provozní přetlak drží vzducholod' požadovaný tvar. Vzducholod' je navíc vybavena balonem, který má za úkol kompenzovat změny tlaku v různých výškách. V přední části ve vzducholodi se nachází plnicí zpětný ventil, který zároveň slouží pro ukotvení vzducholodi. Nosný plyn vzducholodi je helium. Na trupu jsou dále umístěny tyto komponenty:

- 4 stabilizační plochy ocasní plochy – tyto plochy jsou umístěny po obvodu vzducholodě po 90°. Slouží pro vertikální a horizontální stabilizaci řízení směru letu.
- 2 vrtulové nosníky – Motorové nosníky jsou umístěny v těžišti vzducholodě po obou stranách vzducholodě. Jsou tvořeny kompozitními tubusy, na jejichž koncích jsou umístěné motory s vrtulemi. V závislosti na fázi letu lze vrtule vektorovat o 90%.
- Pohonná gondola - je podvěšena na trupu v místě těžiště vzducholodě. Na pohonnou gondolu je zavěšen hybridní pohonný systém. Spalovací motor zásobující elektřinou celou vzducholod'.
- Nákladová gondola – je umístěna v přední části vzducholodi. Na nákladové gondole je umístěný řídicí a měřicí systém vzducholodi a také se zde umísťuje veškerý užitečný náklad (měřicí a záznamová zařízení).
- Díky nosnosti 15 kg je možné na vzducholod' umístit dostatek měřicích a záznamových zařízení.

Další součástí UAS je pozemní řídicí stanice (GCS). GCS je tvořena karavanem, v kterém je umístěno pracoviště pro řízení a monitorování vzducholodě, které je vybaveno počítačem. Komunikace se vzducholodí je zajištěna pomocí aplikace Giraffe. Pomocí této aplikace je možné sledovat veškeré stavové veličiny, polohu vzducholodě, změřená data o znečištění ovzduší a vybrané informace o GCS. Tyto informace je možné z Giraffe exportovat a použít pro další analýzy. Giraffe umožňuje také řídit vzducholod', manuálně pomocí ovládacích prvků řídicího pracoviště, nebo

polo-autonomně pomocí GUI aplikace Giraffe. Na střeše GCS je umístěný anténní pozicionér a anemometr. Dalším řídicím kanálem jsou dvě RC soupravy, vysílače RC1 a RC2.

Součástí UAS je také přivěsný vozík s kompresorem a tlakovými lahvemi pro přepravu nosného plynu. Parametry vzducholodě uvádí Tab. 4.

Tab. 4: Parametry vzducholodě ACC15X

Parametr	Hodnota	Jednotka
Délka trupu	12	(m)
Maximální průměr trupu	2,8	(m)
Objem trupu při provozním přetlaku	56	(m ³)
Povrch trupu	91	(m ²)
Průmět boční plochy	28,2	(m ²)
Plocha VOP i SOP	0,53	(m ²)
Plocha klapky	0,15	(m ²)
Nosný plyn	hélium	
Provozní přetlak uvnitř trupu	250	(Pa)
Maximální dovolený přetlak uvnitř trupu	600	(Pa)
Hmotnost konstrukce vzducholodě	38,17	(kg)
Max. hmotnost paliva	3,75	(kg)
Maximální hmotnost nákladu (užitečná nosnost)	15	(kg)
Doporučená provozní vzdušná rychlost IAS vzducholodě	24	(km/h)
Maximální vzdušná rychlost IAS vzducholodě	45	(km/h)
Maximální elektrický výkon pohonného systému	2,7 (9000 rpm)	(kW)
Ověřený dosah rádiového spojení na přímou viditelnost	25	(km)
Ověřený dosah rádiového spojení v zástavbě	3	(km)

Měření koncentrací znečišťujících látek bylo prováděno pomocí přístroje Graywolf PC-3016A (Graywolf @Sensing Solutions, 2014). Viz Tab. 5. Jedná se o přístroj zjišťující koncentrace suspendovaných částic na základě počtu částic, které počítá optickou metodou a jejich počet přepočítává na hmotnost částic uhlíku. Měřicí přístroj měří koncentrace 6 frakcí (PM_{0,3}, PM_{0,5}, PM₁, PM_{2,5}, PM₅, PM₁₀). Tento přístroj je připojený na datové sběrnice vzducholodi ACC15X a data jsou pomocí telemetrického systému v reálném čase posílány na GCS, kde jsou naměřená data vizualizována Giraffe.

Tab. 5: Parametry přístroje Graywolf PC-3016A

Size Range	0,3-10,0 µm+ (145 µm max into inlet)
Channel Sizes	0,3, 0,5, 1,0, 2,5, 5,0, 10,0 µm
Flow Rate	0,1 CFM (2,83 LPM)
Counting Efficiency	50% @ 0,3 µm; 100% for Particles >0,45 µm (per ISO 21501-4)

Laser Source	Extreme Life Laser Diode with >20 Years MTTF
Zero Count Level	<1 Count / 5 minutes (per ISO 21501-4)
Concentration Limits	4 000 000 Particles / ft ³ @ 5% Coincidence Loss
Data Storage (on-board)	3 000 Sample Records
Sample Inlet	Isokinetic Sampling Probe
Sample Output	Internally Filtered to HEPA Standards (>99,97% @ 0,3µm)
Vacuum Source	Internal Pump, Automatic Flow Control

6.2 Měřicí lety

Letecké měření je nutné důkladně s dostatečným předstihem naplánovat. Během plánování leteckých měření je nutné zvážit meteorologickou situaci, která je pro provoz vzducholodi zásadní. Viz Tab. 6. Plánování kampaní leteckých měření je prováděno na základě střednědobé meteorologické předpovědi (synoptická mapa, meteorologický předpovědní model). Zatímco pro plánování jednotlivých letů, již během kampaně, jsou využívány krátkodobé předpovědi (synoptická mapa, matematický meteorologický model) a aktuální meteorologická měření (aerologická měření, měření na meteorologických stanicích). V oblasti měření je nutné vytipovat vhodné startovací a přistávací plochy, umožňující bezpečné manévrování se vzducholodí a umístění pozemní řídicí stanice. V případě vícedenních měření je vhodné zajistit hangárování vzducholodi a tím omezit počet časově náročné vyfukování vzducholodě a kompresování nosného plynu. Pro měření v oblasti lokality František byla pronajata plocha pro vzlety a přistání ve vlastnictví společnosti Asental Land s.r.o. Ve věži František byl pronajat prostor k hangárování. V ostatních lokalitách byl nájem hangárování řešen v Trojhalí Karolina a na hipodromu Bravantice. V oblasti Bravantice byla provedena charakterizace vlivu lokálních topenišť, v lokalitě Karolina charakterizace znečištění z dopravy, v lokalitě Liberty Ostrava charakterizace průmyslového komplexu a v lokalitě Horní Suchá vliv stavebních prací.

Tab. 6: Meteorologická omezení pro let vzducholodě ACC15X

Max. průměrná rychlost přízemního větru pro vzlet v zástavbě:	3 (m/s)
Max. průměrná rychlost přízemního větru pro vzlet ve volném prostoru:	4 (m/s)
Max. rychlost nárazů větru pro vzlet v zástavbě:	4 (m/s)
Max. rychlost nárazů větru pro vzlet ve volném prostoru:	6 (m/s)
Povolený provozní rozsah teploty okolí:	-10 do +35 (°C)
Povolený provozní rozsah relativní vlhkosti okolí:	0 do 95 (%)
Je zakázáno létat za deště nebo při nebezpečí jeho výskytu.	-
Je zakázáno létat během sněžení, nebo při nebezpečí výskytu sněžení.	-

Předletová příprava vzducholodě je časově náročná. Za předpokladu, že je vzducholod' ve vyfouklém stavu, trvá přibližně 2 hodiny. Předletová příprava zahrnuje:

1. nafouknutí vzducholodě nosným plynem,
2. upevnění řídicí jednotky, pohonné gondoly a užitého nákladu,
3. upevnění motorových nosníků, ocasních stabilizačních ploch a vzpěr,

4. propojení jednotlivých systémů,
5. předletová kontrola všech letových a měřících systémů

Letová měření jsou navržena tak, aby byla získána co nejlepší informace o vertikálním rozložení znečišťujících látek v ovzduší. Optimální měřicí je prováděn tak, že vzducholodí je dosaženo nejvyšší požadované výšky. Po dosažení této výšky je provedeno měření horizontálního profilu v jednotlivých výškových hladinách. K poklesu o požadovaný interval do nižší výškové hladiny docházelo vždy po změření dané výškové hladiny.

Po dokončení letového měření je nutné vzducholodí hangárovat nebo vyfouknout a sbalit. Vyfouknutí je časově náročný proces, trvá 2 až 3 hodiny. Nosný plyn je nutné zkomprimovat do tlakových lahví. Po dokončení tohoto procesu je nutné změřit tlak v tlakových lahvích a jejich teplotu. Poté je možné dopočítat reálné množství zkomprimovaného plynu a ztráty.

6.3 Zpracování naměřených dat

Veškeré data přenesené ze vzducholodě jsou uloženy do letového logu. Tento log lze z aplikace Giraffe vyexportovat a použít pro analýzu jednotlivých letů. Protože jsou data z UAV posílány několikrát za sekundu (množství záznamů za sekundu je proměnné). Jsou záznamy některých letových veličin redundantní. Do letového logu se zaznamenávají data od zapnutí do vypnutí UAS. To znamená, že jsou v logu zaznamenány hodnoty před startem a po přistání. Tyto záznamy nemají pro výzkum znečištění ovzduší žádnou informační hodnotu. Z letového logu jsou vybrány pro další analýzu podstatné atributy (datum a čas, lokalizace, naměřené koncentrace, atmosférická teplota, atmosférický tlak). Poté jsou odstraněny redundantní kombinace těchto atributů a nadbytečné záznamy pomocí předpřipraveného skriptu v Jazyce Python. Tím dojde k redukci velikosti souboru až o 98%. Výsledkem jsou dva textové výstupní soubory s definovanou strukturou.

- Soubor je určený pro statistickou analýzu letového měření
- Soubor určený ke zpracování pomocí GIS a vizualizaci

Soubor určený pro statistickou analýzu letového měření obsahuje veškerá letová data

Soubor určený pro statistickou analýzu letového měření obsahuje, všechny měřené atributy. Tento soubor je nainportován do datového skladu LabKey. Datový sklad Labkey umožňuje integrovat skripty prostředí pro statistickou analýzu dat a jejich grafické zobrazení R. Pomocí skriptů v jazyce R je automatizovaně vytvořena popisná statistika měřícího letu a vytvořen graf, který zobrazuje průměrné koncentrace teplotní zvrstvení v jednotlivých výškových inter.

Soubor určený ke zpracování pomocí GIS a vizualizaci obsahuje pouze vybrané atributy

- identifikace letu,
- datum a čas,
- lokalizace (latitude, longitude and altitude)
- naměřené koncentrace,
- klouzavé průměry PM₁₀ (KI_prum4, KI_prum10, KI_prum20, KI_prum40, KI_prum80)

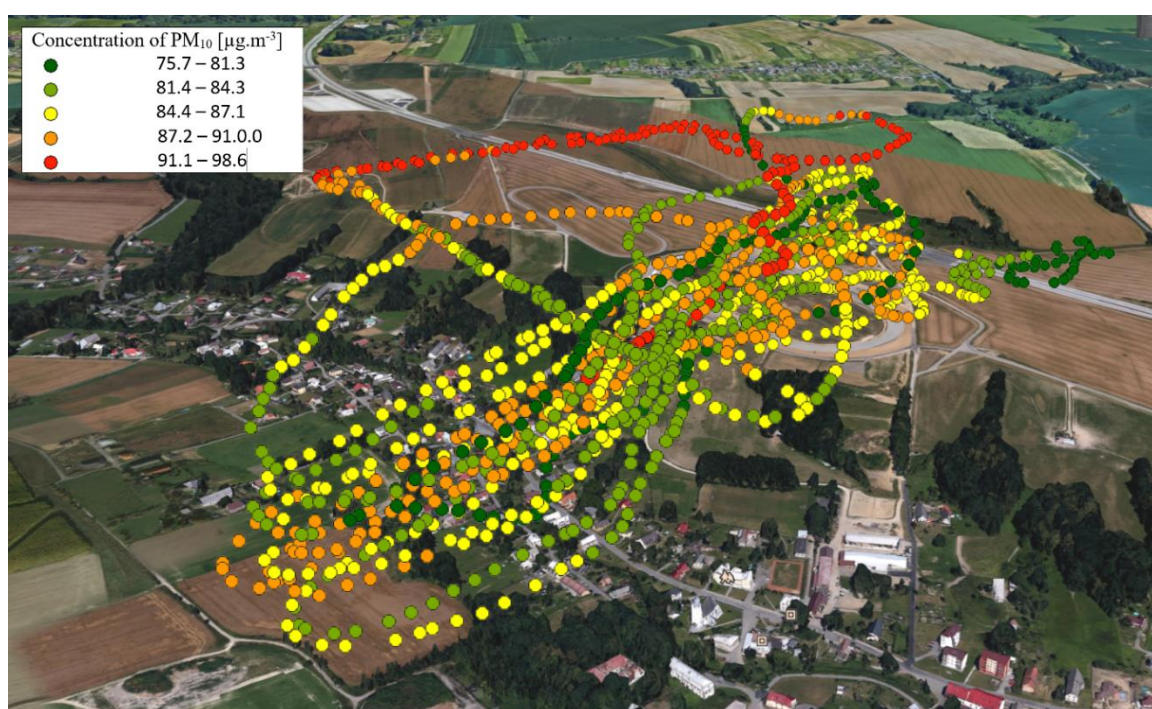
Tento soubor je nainportován do GIS a je z něj vytvořena vrstva. Této vrstvě je přidělena symbologie. Vrstva je poté uložena ve formátu shapefile (SHP) a 6 souborů (suma PM₁₀ a klouzavé průměry délky 4, 10, 20, 40 a 80 hodnot) ve formátu Keyhole Markup language Zipped (KMZ). Pomocí GIS je vygenerovaná statistická mapa zobrazující trajektorii letu. KMZ soubory, obsahující symbologii jsou určeny především pro členy týmu a veřejnost bez hlubší znalosti GIS.

6.4 Výsledky letových měření

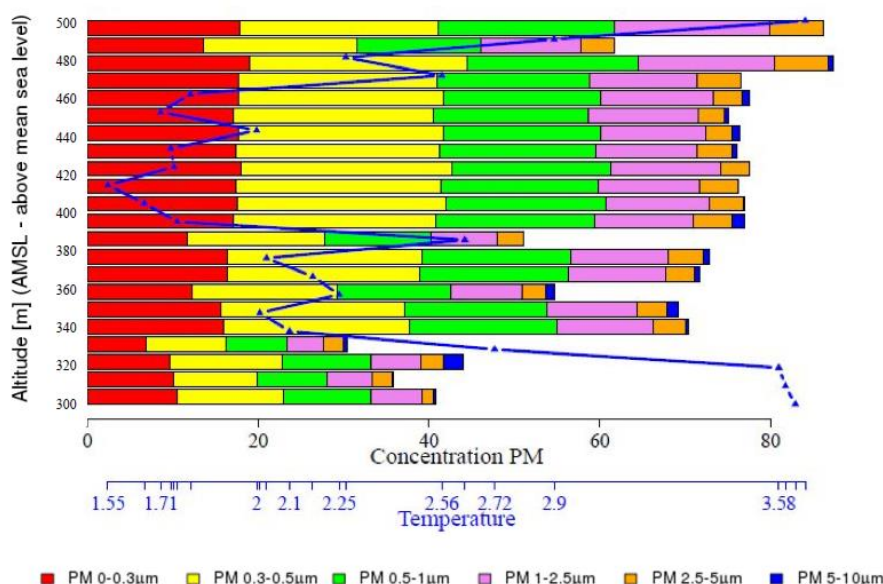
Letová měření byla zaměřena zejména na identifikaci třech základních skupin zdrojů znečišťování ovzduší, a to lokálních topenišť, dopravy a průmyslových zdrojů. Doplnkově k těmto měřením byla sledována také stavební činnost, jako specifický zdroj studené emise v měřicí lokalitě v Horní Suché, který může lokálně způsobovat významné zhoršení kvality ovzduší (viz dále). Jednotlivé kampaně letových měření byly umístěny s ohledem rozlišení dané skupiny zdrojů a k tomu vhodné meteorologické podmínky. Výsledky těchto kampaní jsou popsány v následujících kapitolách.

6.4.1 Identifikace lokálních topenišť

Měření bylo provedeno během teplotní inverze ve výšce cca 160 m nad zemí nad katastrem obce Bravantice, kdy se předpokládá významný vliv lokálních topenišť. Zároveň zde byly vhodné plochy pro manipulaci se vzducholodí a školení pilotů (hipodrom). Kromě vlivu lokálních topenišť je na výsledcích měření vidět vliv vzdálených průmyslových zdrojů z Ostravska v hladině inverze (cca do 200 m nad zemí). Průběh letu a naměřené koncentrace PM_{10}



Obr. 50: Vizualizace průběhu letu vzducholodě nad obcí Bravantice a naměřené koncentrace PM_{10}



Obr. 51: Vertikální profil rozložení frakcí PM a teploty během letu vzducholodě nad obcí Bravantice

V rámci letového měření v Bravantcích byl také odebrán vzorkovačem pro odběr prachových částic na 47 mm filtry vzorek PM₁₀ pro neutronovou aktivační analýzu v Spojeném ústavu jaderných výzkumů v Dubně (Rusko). Tento vzorek byl analyzován spolu se slepým stanovením stejného filtru pro odečet pozadí. Výsledné prvkové složení odebraného vzorku PM₁₀ uvádí Tab. 7.

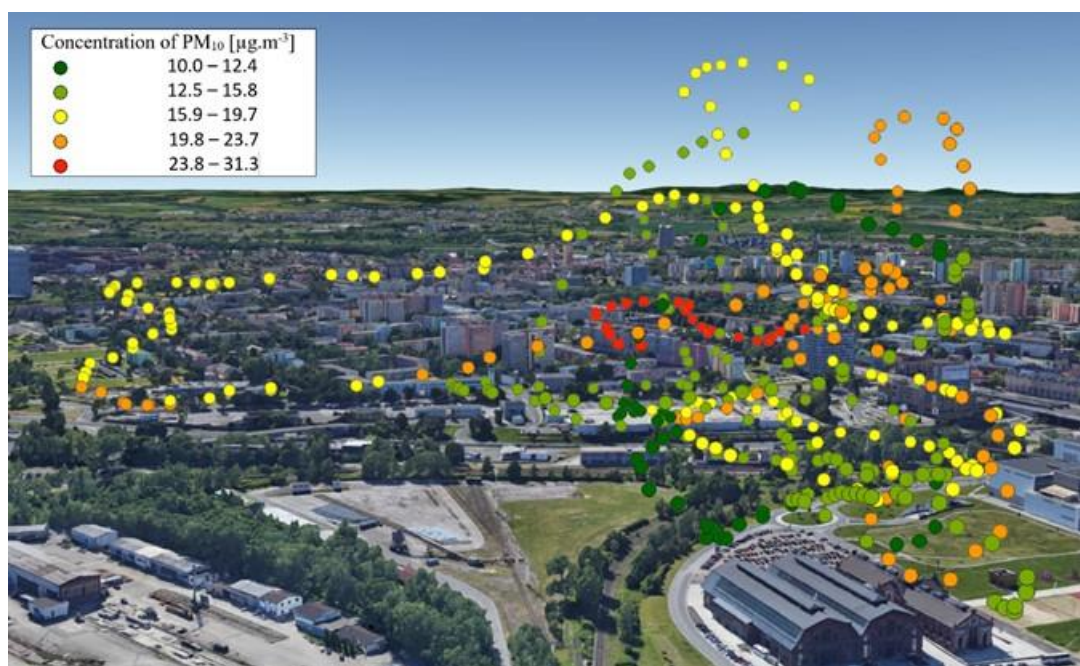
Tab. 7: Prvkové složení vzorku PM₁₀ odebraného během letu vzducholodě nad obcí Bravantice

Prvek	Koncentrace (µg/g)	Prvek	Koncentrace (µg/g)
Na	19,9	Sb	0,0925
Al	22,4	I	0,358
Cl	129,8	Cs	0,01088
Sc	0,0645	La	0,181
Mn	0,6322	Sm	0,0155
Zn	4,38	Ta	0,0105
As	0,189	Au	0,0012
Br	4	Th	0,0198
Rb	0,256	U	0,0309

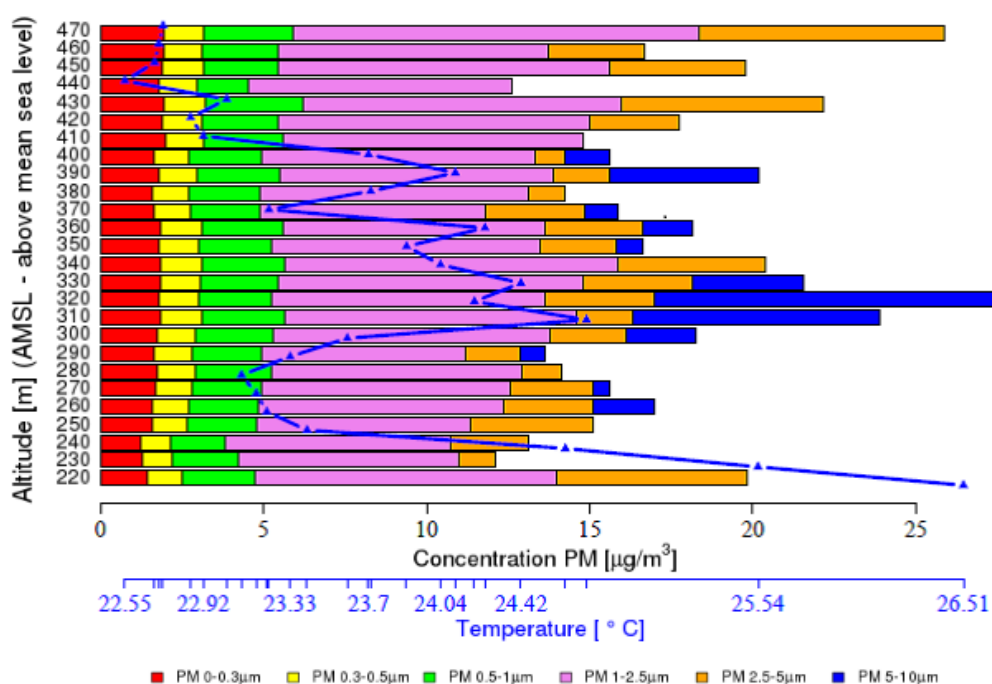
6.4.2 Identifikace dopravy

Měření pro charakterizaci vlivu dopravy na prostorové rozložení PM bylo provedeno v oblasti Trojhalí Karolina v Ostravě ve spolupráci s pozemním měřením měřicím vozem BTK. Jako místo měření bylo vybráno Náměstí Biskupa Bruna. V okolí náměstí se nachází obchodní centrum Forum Nova Karolina a Trojhalí Ostrava. Místo bylo zvoleno proto, že se předpokládá dominantní vliv dopravy na frekventované křižovatce Nádražní a 28. října. Měření bylo provedeno v dopoledních hodinách, za slunečného počasí s JZ větrem cca 5 m/s. Výsledky letového měření ukazují spíše vliv termické konvekce, která nasává hrubší prach z nepevných ploch (maximum cca 100 m nad zemí). Viz

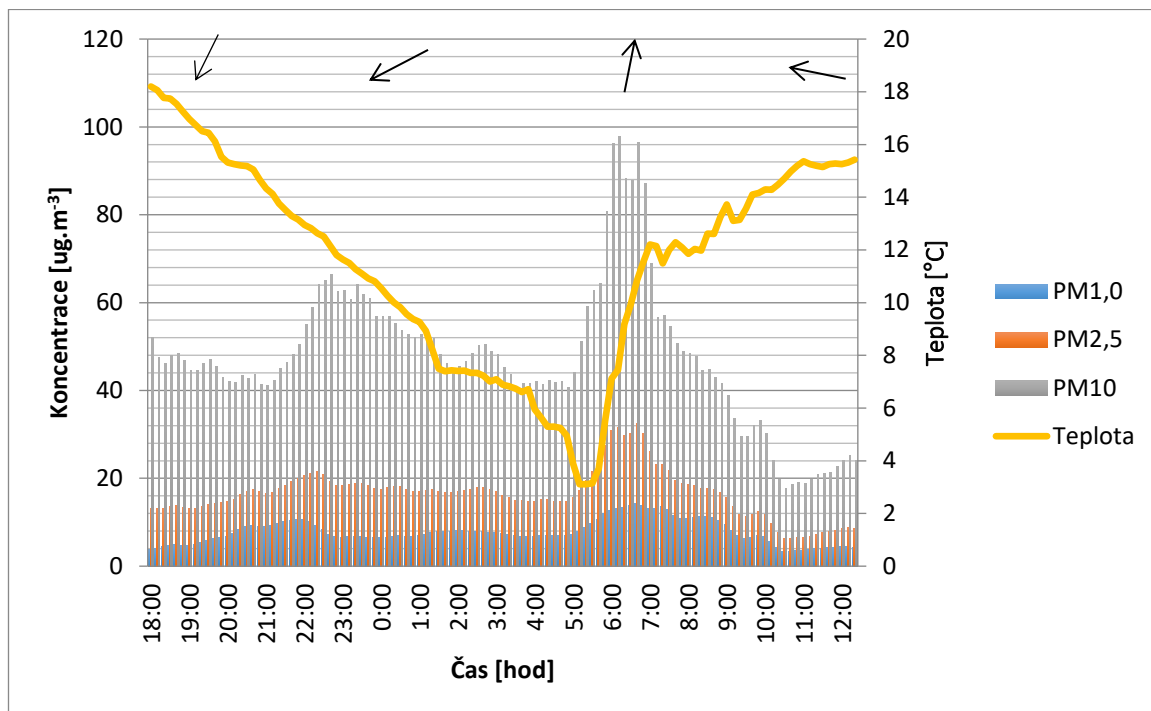
Obr. 52 a Obr. 53. Data na Obr. 54 z pozemní mobilní stanice ukazují dynamiku přízemního znečištění a prokazují vhodnost kombinace pozemního a letového měření.



Obr. 52: Vizualizace průběhu letu vzducholodě nad Trojhalím a naměřené koncentrace PM₁₀



Obr. 53: Vertikální profil rozložení frakcí PM a teploty během letu vzducholodě nad Trojhalím



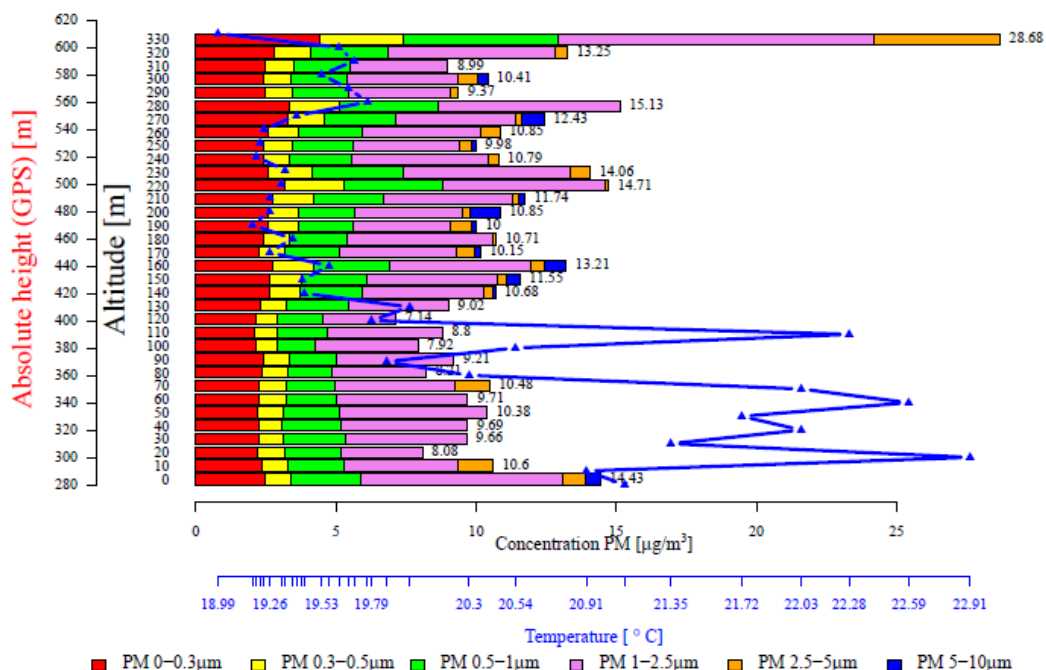
Obr. 54: Časový průběh koncentrací PM a teploty na pozemní stanici u Trojhalí s vyznačením změn směru větru

6.4.3 Identifikace průmyslových zdrojů

Měření proběhlo v okolí metalurgického průmyslového podniku Liberty Ostrava a.s. v Ostravě, na jeho závětné straně. Meteorologické podmínky: 3/8 kupovitě oblačnosti, JZ vítr 6 m/s, velmi dobré rozptylové podmínky. Výsledky ukazují dominantní vliv uvedeného hutního komplexu ve všech měřených hladinách. Výškový profil ukazuje průkazný výskyt vysokých koncentrací jemných částic ve výšce cca 300 m nad zemí - zřejmě vliv energetického zdroje. Viz Obr. 55 a Obr. 56. Nízké zdroje nebyly z technických důvodů proměřeny, na grafu vertikálního profilu je zaznamenán pouze start a přistání.



Obr. 55: Vizualizace průběhu letu vzducholodě nad hutí Liberty Ostrava a.s. a naměřené koncentrace PM_{10}



Obr. 56: Vertikální profil rozložení frakcí PM a teploty během letu vzducholoď nad hutí Liberty Ostrava a.s.

Během letu nad metalurgickým závodem Liberty Ostrava a.s. byly rovněž odebrány vzorky PM_{2,5} a PM₁₀ na filtry Ø 47 mm pro neutronovou aktivní analýzu v Spojeném ústavu jaderných výzkumů v Dubně (Rusko). Tyto vzorky byly analyzovány spolu se slepým stanovením stejného filtru pro odečet pozadí. Výsledné prvkové složení odebraného vzorků uvádí Tab. 8.

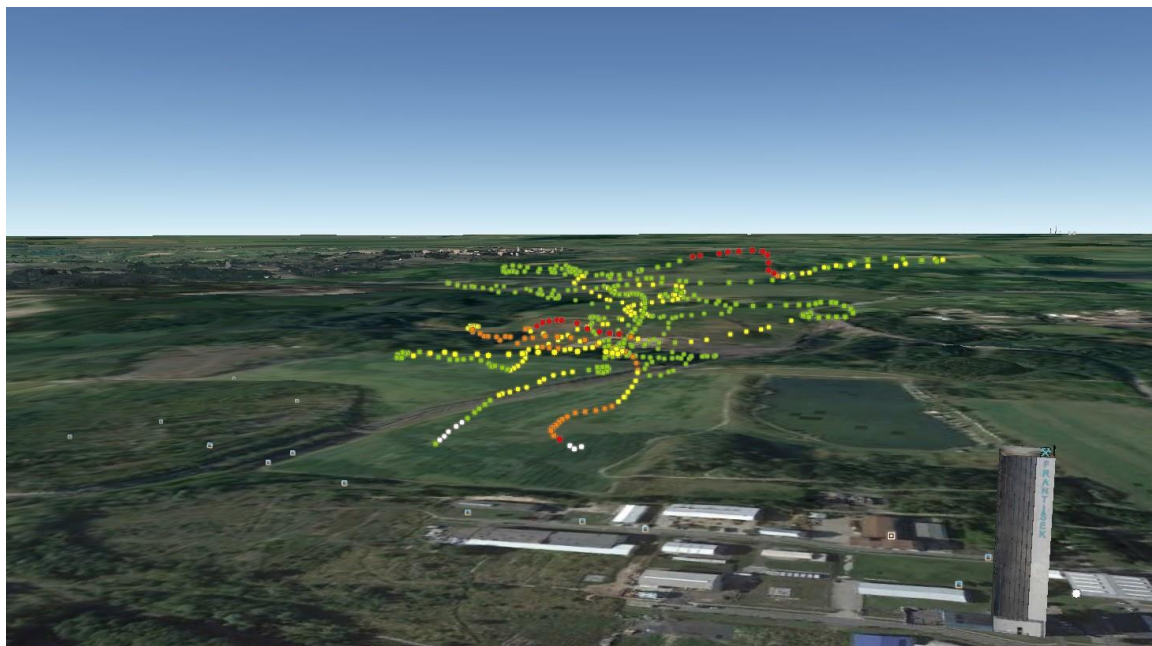
Tab. 8: Prvkové složení vzorků PM odebraných během letu vzducholoď nad hutí Liberty Ostrava a.s.

Prvek	PM _{2,5}		PM ₁₀	
	Koncentrace (µg/g)		Koncentrace (µg/g)	
Na	335	1150	882	913
Mg	68,4		178	217
Al	177	161	458	644
Cl	483	2490	2430	656
K				895
Ca	211	190	486	643
Sc	0,314	0,0788	0,14	0,161
Ti	8,16			16
V	0,349	0,282	0,645	0,818
Cr	13,6			
Mn	5,21	7,37	10,9	7,98
Fe	709	343	669	460
Co	0,469	0,267	0,43	0,332

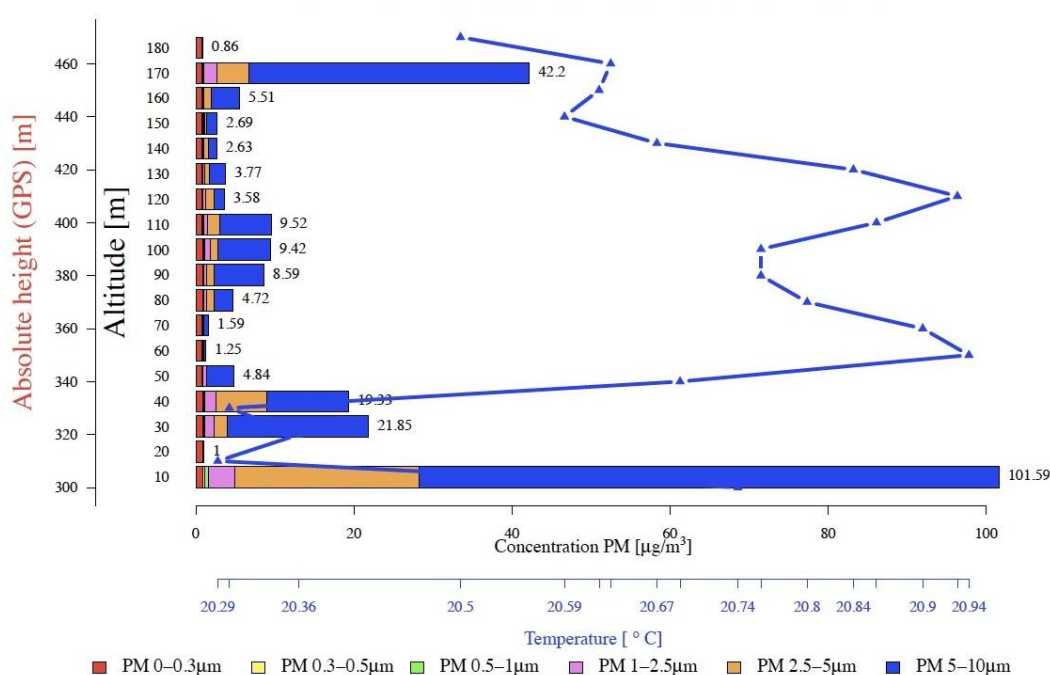
Cu	2,8		7,34	7,2
Zn	138	585	428	409
As	1,81	6,54	6,76	2,26
Se	0,801	1,5	1,48	0,786
Br	8,66	26,4	28,4	16,9
Rb	2,39	2,42	1,9	2,01
Mo	0,171	0,343	0,467	0,236
Cd	0,284	1,23	1,38	0,787
Sb	1,02	3,57	3,74	2,35
I	4,95	8,67	8,03	4,43
Cs	0,14	0,262	0,269	0,196
Ba	157	682	419	495
La	0,764	0,379	0,332	0,402
Sm	0,144	0,0462	0,044	0,0542
Tb	0,0218			
W	0,356		0,178	0,474
Au	0,00236	0,004	0,00151	0,00152
Th	0,221	0,0908	0,086	0,0929
U	0,0639	0,0493	0,0511	0,0508

6.4.4 Identifikace stavební činnosti

Měření bylo provedeno v rámci cvičného letu v průmyslovém areálu František. Při letu došlo k vážné technické závadě, která byla následně odstraněna a měření dokončeno. Výsledky jsou podobné jako u předchozího měření v areálu Karolina. Jedná se "bubliny" znečištění pravděpodobně z provozu na nebezpečných komunikacích v průmyslovém areálu při stavbě nové výrobní haly (vysoké koncentrace hrubých částic ve výškách 30 a 70 m). Viz Obr. 56 a Obr. 58.



Obr. 57: Vizualizace průběhu letu vzducholoďe nad průmyslovou zónou František a naměřené koncentrace PM_{10}



Obr. 58: Vertikální profil rozložení frakcí PM a teploty během letu vzducholoďe nad průmyslovou zónou František

6.5 Vyhodnocení letových měření

Ačkoli se s využitím vzducholoďi podařilo identifikovat znečištění ze specifických skupin zdrojů, ukázalo se, že vzducholoď je nespolehlivá a její provoz v důsledku závad a konstrukčních nedostatků náročný a drahý. Celý UAS ve stávající podobě je nevhodný pro běžný provoz a hodí se spíše k občasným výzkumným letům pod dohledem výrobce. Z uvedených důvodů bylo rozhodnuto v rámci projektu více letových měření neprovádět.

7 Vyhodnocení monitoringu suspendovaných částic v Horní Suché

Na monitorovacím stanovišti v Horní Suché byly suspendované částice PM sledovány kontinuálně (u paty věže a na věži) a zároveň probíhaly odběry částic PM₁₀ za účelem stanovení prvkového složení a následných analýz původu odebraných částic.

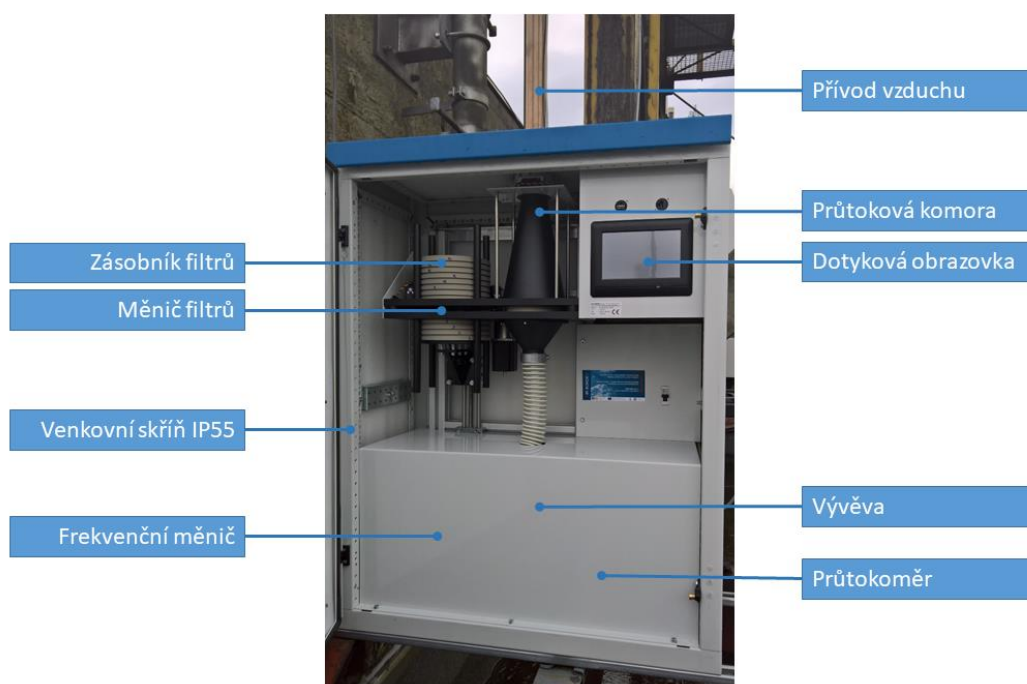
7.1 Měřicí zařízení

U paty a na střeše věže (ve výšce cca 86 m nad terénem) jsou hodnoty znečištění suspendovanými částicemi měřeny kontinuálně prostřednictvím zařízení Palas Fidas 200. Jedná se o standardní automatický optický analyzátor, který je schopen sledovat aerosolové částice o velikosti 180 nm až 18 µm. Jeho prostřednictvím jsou monitorovány koncentrace suspendovaných částic frakcí PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀ a TSP.

Na věži (ve výšce cca 90 m nad zemí) je dále nainstalováno prototypové zařízení pro odběr částic PM₁₀ v závislosti na směru větru - velkoobjemový vzorkovač SAM Hi30 AUTO WIND (Baghirra s.r.o., Praha, Česká republika). Tento vzorkovač byl naprojektován tak, aby umožnil zjistit, z jakých směrů a z jakých zdrojů znečištění přichází a přesněji vyčíslit jeho přenos v rámci regionu.

Vzorkovač pracuje v souladu s Metodikou velkoobjemového vzorkování, kterou uvádí Kompendium metod pro stanovení anorganických sloučenin ve venkovním ovzduší, vypracované US EPA (United States Environmental Protection Agency 1999); shrnutí výzkumu o účinnosti velkoobjemových vzorkovačů lze najít v článku (Krug et al. 2017).

SAM Hi 30 AUTO WIND je plně automatický dálkově ovládaný vzorkovač určený pro gravimetrické a chemické analýzy aerosolových částic. Zařízení odebírá částice o průměru < 10 µm (PM₁₀) pomocí odběrové hlavy typu DIGITEL DPM10/30/00 PM₁₀ (průtoky 30 m³/h) v souladu s příslušnou normou EN 12341 (European Committee for Standardization 2014). Vzorkovač byl navržen tak, aby fungoval v závislosti na povětrnostních podmínkách. Má zásobník pro 15 filtrů (skleněné mikrovlnné, Whatman GF/A, Ø150 mm), které jsou v držácích a automaticky se přemisťují do polohy vzorkování podle vyhodnocených povětrnostních podmínek. Vzorkovač je tedy schopen odebírat částice PM₁₀ z osmi základních směrů větru (S, SV, V, JV, J, JZ, Z, SZ) a bezvětrí (rychlost větru < 0,2 m.s⁻¹). Vzorkovač je vidět na Obr. 13.



Obr. 59: Vzorkovač SAM Hi 30 AUTO WIND

Rychlost i směr větru se měří pomocí anemometru WindSonic[™] SDI-12 (Gill Instruments s.r.o.). Rychlost a směr větru pro výběr konkrétního filtru ze zásobníku, na který se vzorkuje, jsou stanovovány podle hodinových klouzavých průměrů vypočítaných z 10minutových dat v souladu s metodikou US EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY et al. 2000). Navíc je jeden filtr určen pro epizody s extrémním znečištěním ovzduší, definované jako tři po sobě jdoucí průměrné hodinové koncentrace PM_{10} přesahující $100 \mu g \cdot m^{-3}$ (stanovené z 10minutových dat z pozemního monitoringu) – tzv. smogové situace.

Vzorky suspendovaných částic jsou na filtry odebírány vždy po dobu jednoho měsíce. Následně jsou podrobeny prvkové analýze s využitím neutronové aktivační analýzy v jaderném reaktoru v Rusku. Výsledky prvkové analýzy pak napomáhají určení původu vzorkovaných částic.

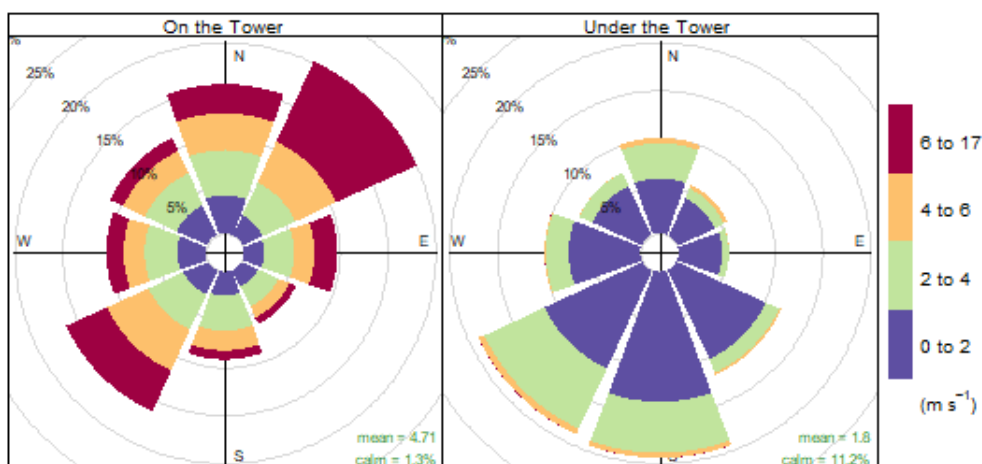
7.2 Kontinuální měření PM

Data z kontinuálního měření suspendovaných částic PM byla vyhodnocena za dvouleté období od března 2018 do února 2020. Měření probíhala u paty a na střeše věže, monitorovány byly koncentrace suspendovaných částic frakcí PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_{10} a celkové suspendované částice (TSP). Kromě znečištění byly sledovány také meteorologické veličiny – teplota, tlak, vlhkost, rychlost a směr větru. Rychlost a směr větru byly vyhodnoceny pouze za roční období 3/2019 – 2/2020, neboť za předešlé období nebyla naměřená data úplná. Zaznamenaná data byla podrobena analýze s využitím R-studia (Carslaw a Ropkins 2020; R Studio 2020).

7.2.1 Analýza směrovosti znečištění

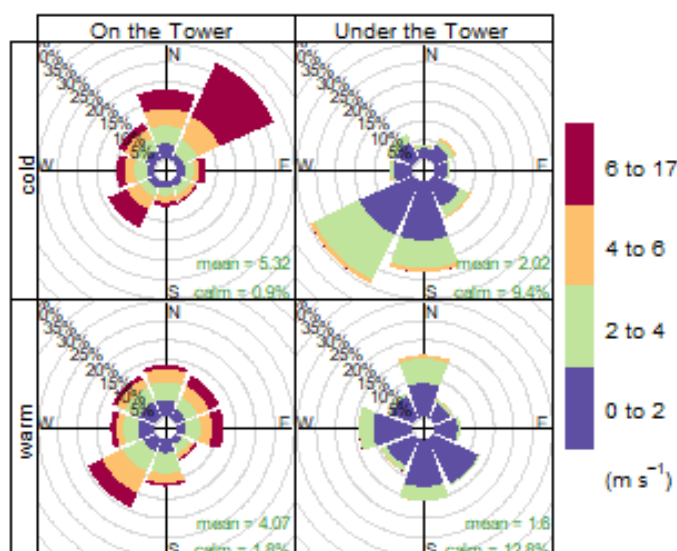
Horizontální rozptyl emisí je ovlivňován rychlostí a směrem větru. Vyšší rychlosti proudění všeobecně vedou k rychlejšímu naředění a tak ke snížení koncentrací znečišťujících látek v ovzduší. Silnější vítr vede také k rozvoji mechanické turbulence, a přispívá tak k vertikálnímu promíchávání atmosféry (Kurfürst 2008).

Na měřicím stanovišti na věži převažuje proudění v ose jihozápad – severovýchod, což odpovídá převládajícím regionálním směrům větru v oblasti česko-polské hranice (Blažek 2013; Czech Hydrometeorological Institute 2019), naměřené rychlosti proudění jsou však výrazně vyšší. To je patrné rovněž ve srovnání s měřením u paty věže, kde se rychlosti větru pohybují do 6 m.s^{-1} (viz Obr. 60). Ze sestavených větrných růžic je rovněž patrné, že měření u paty věže je ze severních směrů pravděpodobně stíněno přítomnými budovami, resp. z východu věží, a při interpretaci výsledků je nezbytné k této skutečnosti přihlídnout.



Obr. 60: Rychlostně členěné větrné růžice na věži (vlevo) a u paty věže (vpravo) za období 3/2019 – 2/2020

Jestliže rozdělíme rychlostní větrné růžice podle ročních období, vidíme chladné sezóně významný rozdíl v převládajícím směru větru na věži a pod věží, viz Obr. 61. Zatímco na věži jednoznačně převládá směr SV, následovaný severním prouděním, u paty věže je převládající směr proudění přesně opačný, tedy převládá jihozápad, resp. jih.

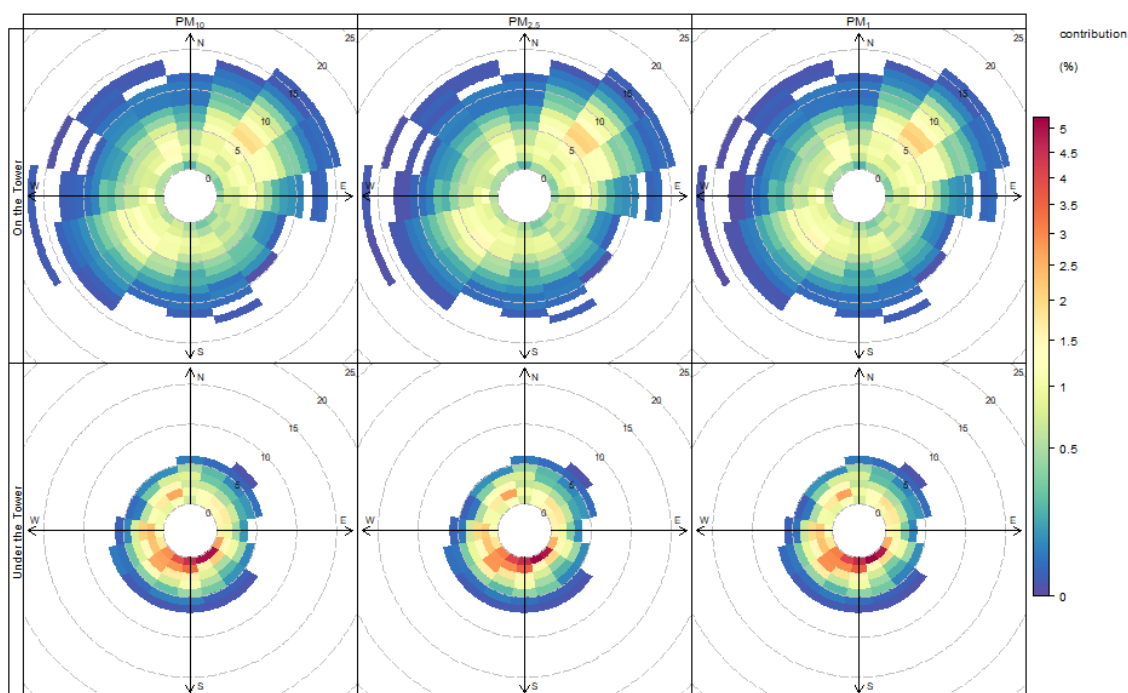


Obr. 61: Rychlostně členěné větrné růžice na věži (vlevo) a u paty věže (vpravo) a v chladném období (nahore) a teplém období (dole) za měření 3/2019 – 2/2020

Vliv rychlosti a směru větru na stanovené koncentrace znečišťující látky lze vyjádřit pomocí tzv. vážené koncentrační růžice, viz Obr. 62. Z takto zpracovaných dat je patrné, že nejvíce přispívaly k průměrným koncentracím PM u paty věže situace s jihovýchodním, jižním a jihozápadním prouděním při rychlostech větru do 2 m.s^{-1} . Projevuje se zde vliv přilehlé obslužné komunikace, po které v hodnoceném období jezdila zejména nákladní vozidla k probíhající stavbě haly v západní části průmyslové zóny.

Z vážených koncentračních růžic na Obr. 62 je také patrné, že příspěvky z jednotlivých směrů k průměrným koncentracím PM na věži jsou relativně rovnoměrně rozložené, projevuje se významnější přenos v nejčtetnějším jihozápadním a severovýchodním proudění, vyšší příspěvky jsou patrné u všech frakcí PM v rozmezí rychlostí proudění $7\text{--}8 \text{ m.s}^{-1}$ z severovýchodního směru, přičemž tento vliv se zvýrazní během chladné části roku (v topné sezóně). Tato skutečnost pravděpodobně poukazuje na přítomnost vzdálenějšího energetického zdroje v tomto směru.

Ze srovnání vážených koncentračních růžic na věži a u paty věže je také jasný výrazný rozdíl v příspěvcích při jednotlivých rychlostech větru, kdy pod věží jsou významné příspěvky při proudění do 4 m.s^{-1} , kdežto na věži až do 10 m.s^{-1} . Při porovnání jednotlivých frakcí PM jsou rozdíly pak minimální.



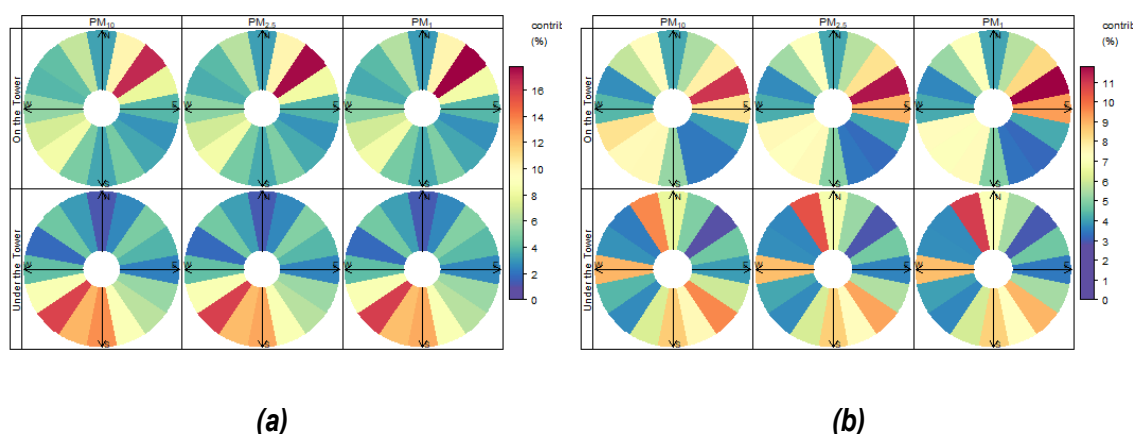
Obr. 62: Vážená koncentrační růžice pro PM_{10} (vlevo), $PM_{2,5}$ (střed) a PM_1 (vpravo) na věži (nahore) a u paty věže (dole)

Pokud zvážíme pouze samotný směr, ze kterého znečištění přišlo, dostaneme příspěvky podle směru větru (viz Obr. 63). Tyto příspěvky byly rozděleny podle sezón – na teplou (netopnou) sezónu: duben–srpen (Obr. 63 (a)), a studenou (topnou) sezónu: září–březen (Obr. 63 (b)). Z takto vážených růžic je vizuálně jasně patrný rozdíl ve směrovosti příspěvků jak mezi sezónami, tak mezi umístěním měřících zařízení. Pro upřesnění interpretace je třeba zdůraznit, že se v tomto případě jedná o vyjádření podílu, nikoli o absolutní výši koncentrací z daného směru.

V letním období jsou příspěvky u paty věže nejvýznamnější z jihu a jihovýchodu (od směru obslužné komunikace), vyšší příspěvky byly zaznamenány také ze západu, kde probíhala stavební činnost.

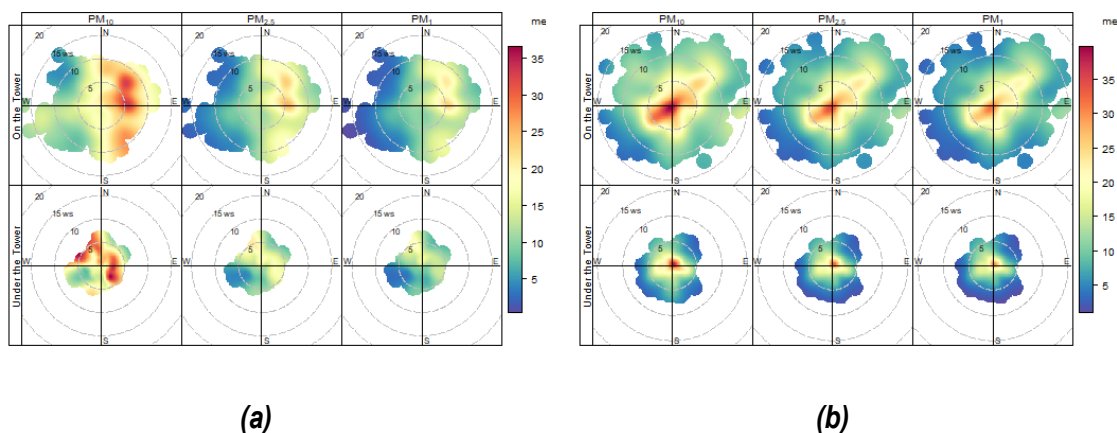
V zimním období jsou nejvýznamnější příspěvky u paty věže od jihu k jihozápadu, což poukazuje na vliv lokálních topenišť z přilehlé zástavby Horní, resp. Prostřední Suché. Rozdíly mezi jednotlivými frakcemi nejsou viditelné.

Na věži v letním období dominuje příspěvek ze severovýchodu. Může se jednat o vliv těžební činnosti (srovnej Obr. 3). V zimním období na věži dominuje příspěvek z východoseverovýchodu, pravděpodobně se jedná o zdroj spojený s vytápěním či dálkový přenos z Polska, neboť vliv je vyšší u menších frakcí částic.



Obr. 63: Směrově-vážená koncentrační růžice pro teplou (a) a studenou sezónu (b) – PM_{10} (na obrázcích vlevo), $PM_{2.5}$ (na obrázcích střed) a PM_1 (na obrázcích vpravo) na věži (na obrázcích nahoře) a u paty věže (na obrázcích dole)

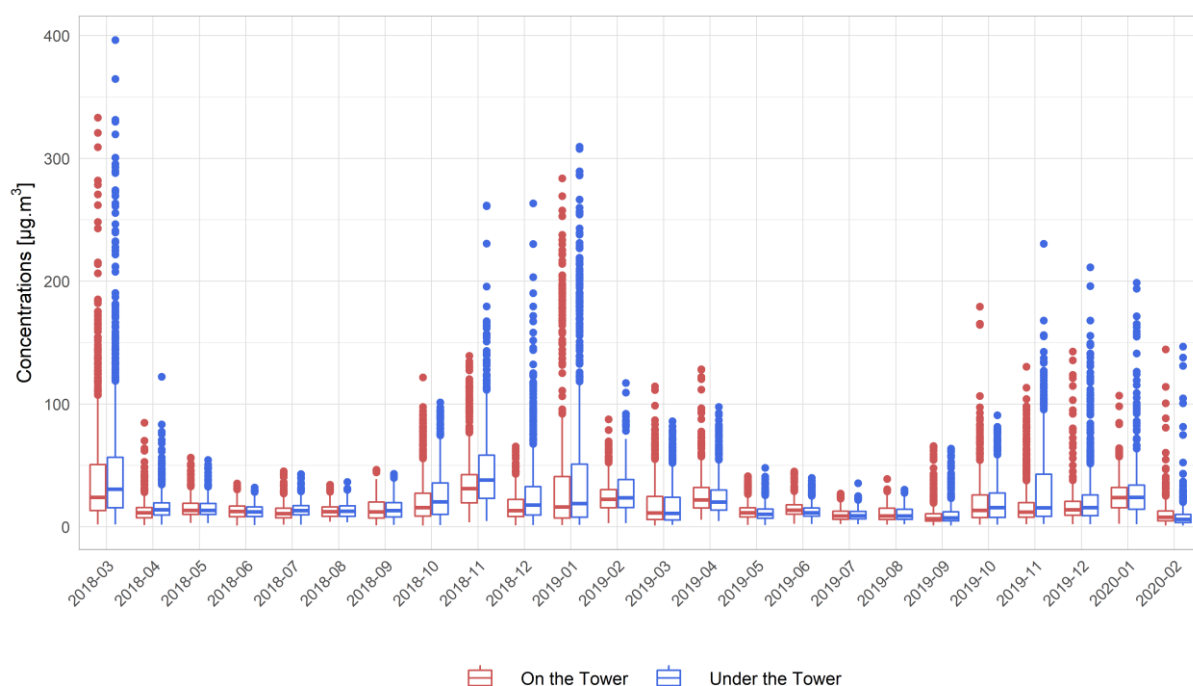
Koncentrační růžice rozdělená podle sezón (Obr. 64) ukazuje, že nejvyšší krátkodobé průměrné koncentrace PM přichází na věž v zimě ve směru převládajících větrů, tedy ze severovýchodu a jihozápadu a při nízkých rychlostech proudění po zhruba 5 m.s^{-1} . V teplé sezóně se na věži projevuje vliv zdrojů ze severovýchodu a východu (pravděpodobně těžební činnost) a jihozápadu (pravděpodobně hutní závod v Třinci), srovnej s Obr. 3. Nejvýraznější jsou vyšší koncentrace u částic PM_{10} . U paty věže jsou vyšší koncentrace při rychlostech proudění do 1 m.s^{-1} , v letním období se projevuje vliv zdrojů stavební činnosti okolo severozápadu, při vyšších rychlostech proudění, okolo 6 m.s^{-1} .



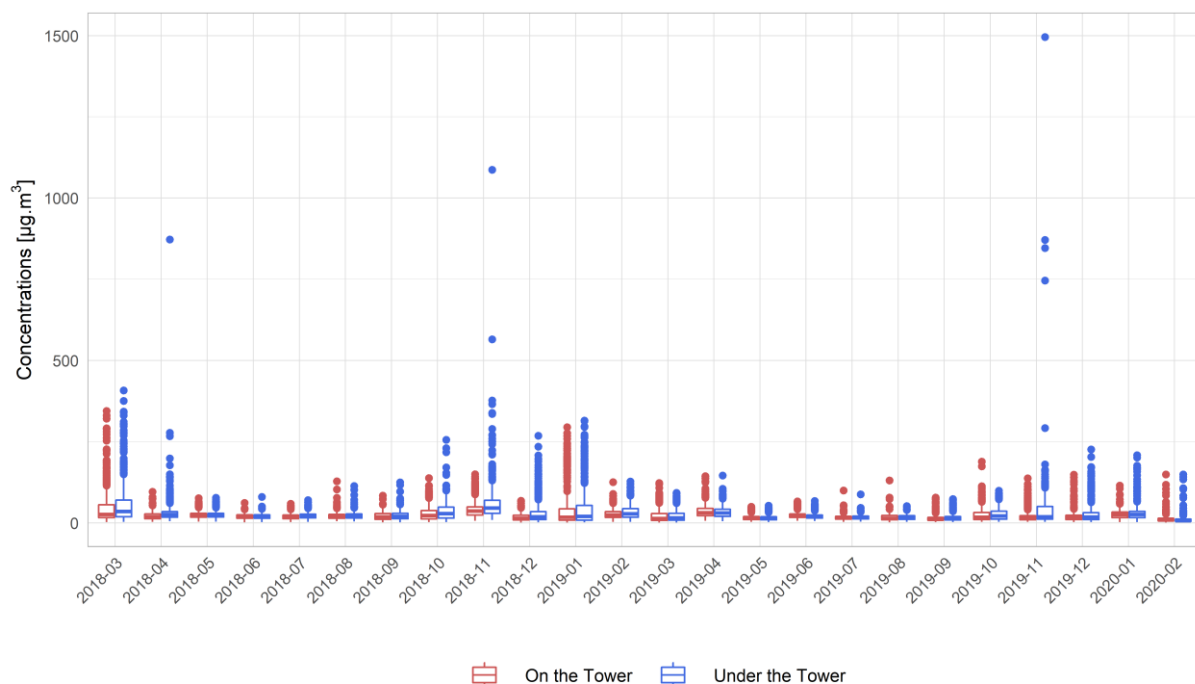
Obr. 64: Koncentrační růžice pro teplou (a) a studenou sezónu (b) – PM_{10} (na obrázcích vlevo), $PM_{2.5}$ (na obrázcích střed) a PM_1 (na obrázcích vpravo) na věži (na obrázcích nahoře) a u paty věže (na obrázcích dole)

7.2.2 Analýza časového chodu znečištění

Naměřené koncentrace PM vykazují dle očekávání významný roční chod s nejvyššími koncentracemi v průběhu topné sezóny (Obr. 65 a Obr. 66). Naopak nejnižší koncentrace byly zaznamenány v průběhu léta. Na stanici u paty věže byly v zimním období měřeny všeobecně vyšší koncentrace než na stanici na věži. Lze tak předpokládat, že nejvýznamněji se na nárůstu koncentrací v zimní sezóně podílí lokální topeniště, čemuž odpovídají také rozdíly v koncentracích mezi jednotlivými roky. Stanici u paty věže pravděpodobně ovlivňují lokální topeniště z blízkých obcí (Horní a Prostřední Suché), stanici na věži pak dálkový přenos z Polska (viz také Obr. 62). Z Obr. 65 je na stanici u paty věže patrný také výskyt několika špičkových koncentrací v dubnu a listopadu 2018, resp. listopadu 2019. Jednalo se o prашné stavební práce, které v dotčených měsících probíhaly v blízkém okolí stanice.

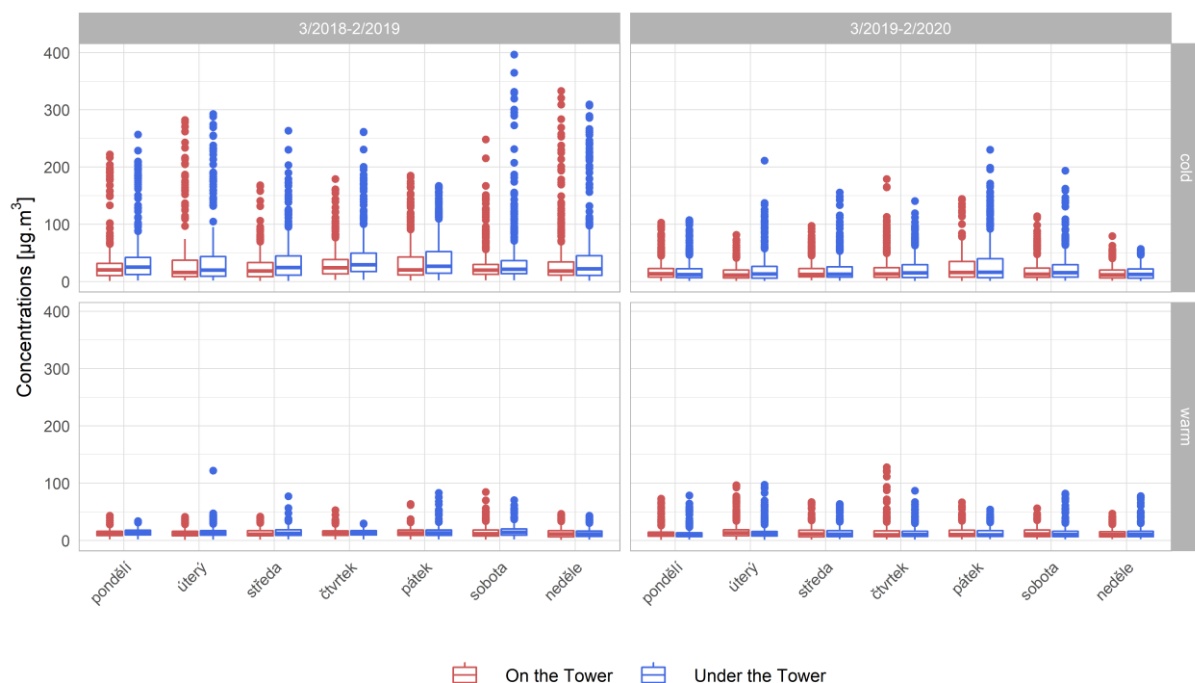


Obr. 65: Měsíční variabilita denních koncentrací částic $\text{PM}_{2.5}$ na věži a u paty věže

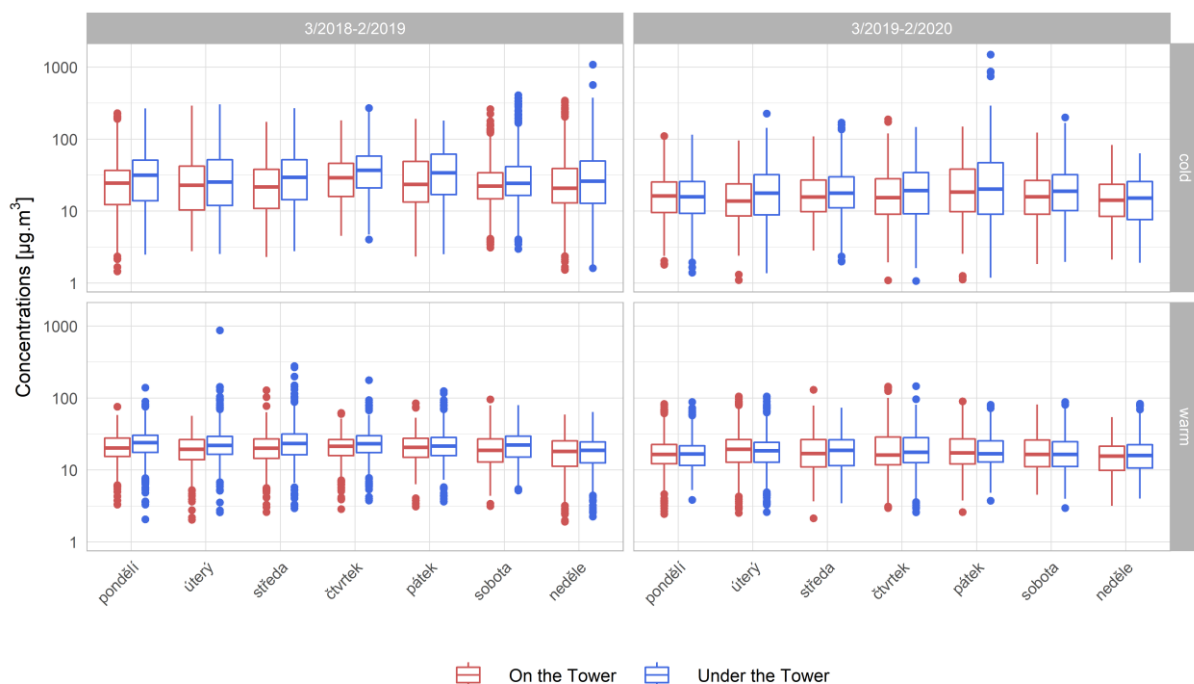


Obr. 66: Měsíční variabilita denních koncentrací částic PM_{10} na věži a u paty věže

Denní koncentrace PM vykazují také jistou variabilitu v rámci týdenního chodu Obr. 67 a Obr. 68. Tato skutečnost je patrná opět v rámci chladného zimního období a souvisí pravděpodobně s vytápěním. Zvláště v zimě 2019 si lze povšimnout nárůstu koncentrací o víkendech (především v sobotu na stanici u paty věže), v zimě 2020 však tento trend patrný není. Koncentrace PM naměřené v letním období týdenní chod nevykazují.



Obr. 67: Týdenní variabilita denních koncentrací částic $PM_{2,5}$ na věži a u paty věže



Obr. 68: Týdenní variabilita denních koncentrací částic PM_{10} na věži a u paty věže

7.2.3 Vyhodnocení měření

V rámci této aktivity byly kontinuálně měřeny koncentrace suspendovaných částic frakcí PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} a celkové suspendované částice (TSP). Navíc byly sledovány také základní meteorologické veličiny – teplota, tlak, vlhkost, rychlost a směr větru. Na základě provedených analýz lze konstatovat, že měřené koncentrace PM na stanici u paty věže jsou všeobecně vyšší než na stanici na věži, přičemž rozdíl je dle očekávání výraznější v případě větších částic (frakce PM_{10} a větší) a v zimním období. Na stanici u paty věže je měření ovlivňováno lokálními zdroji znečišťování, jako jsou lokální topeniště, doprava ze sousedící obslužné komunikace či stavební činnosti v areálu průmyslové zóny. Stanice na věži je pak ovlivňována spíše dálkovým přenosem.

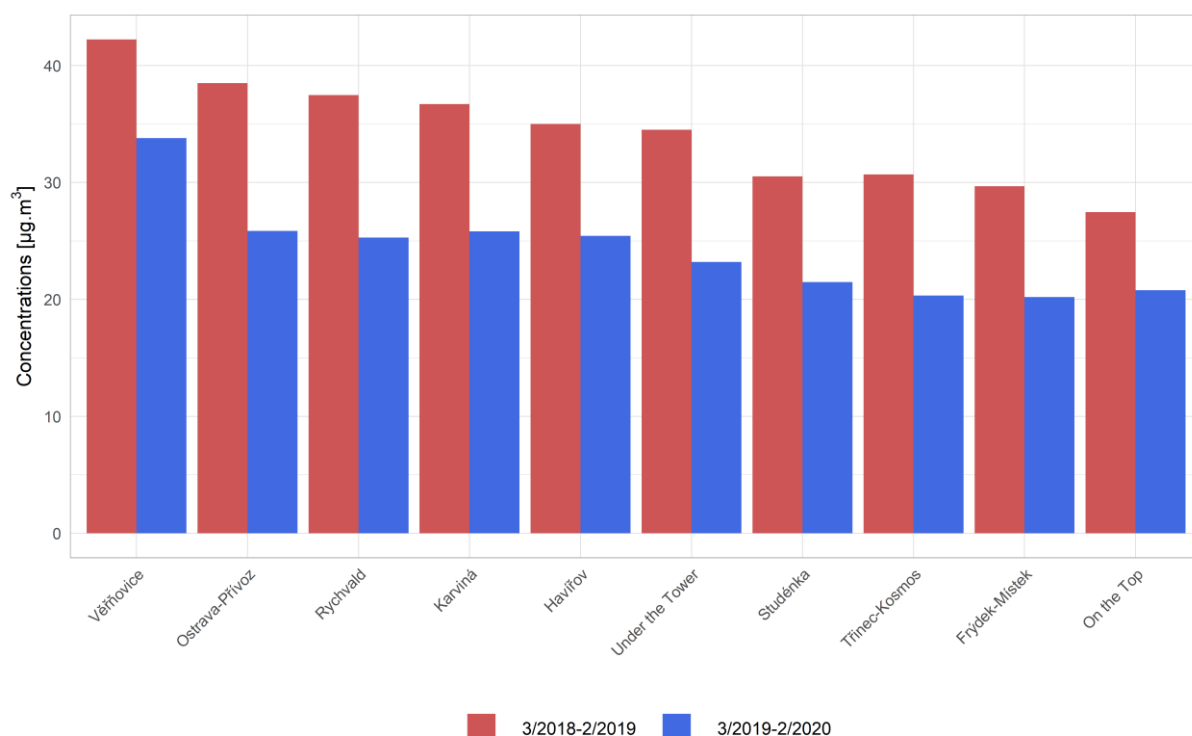
Ze zaznamenané rychlosti a směru větru na stanici na věži lze vysledovat, že v zimním období převládá proudění ze severovýchodu a severu, tedy od Polska, a koncentrace na věži jsou tak ovlivněny přeshraničním přenosem znečištění. V letním období na věži převládá naopak jihozápadní proudění. Ze zaznamenaných teplot lze stanovit rozsah a četnost teplotních inverzí a závislost koncentrací suspendovaných částic na teplotní diferencii. Dlouhodobá kontinuální pozorování meteorologických veličin v této nestandardní výšce cca 90 m nad zemí mohou následně napomoci k lepšímu porozumění procesům přenosu znečištění v regionu.

Pozorování směru a rychlosti větru na stanici pod věží je třeba interpretovat s přihlédnutím ke skutečnosti, že měření byla ovlivněna okolní zástavbou, zejména pak samotnou věží (z východního směru). Z hlediska měření znečištění a zajištění infrastruktury potřebné k provozu stanice se však jednalo o nejvhodnější místo pro její umístění.

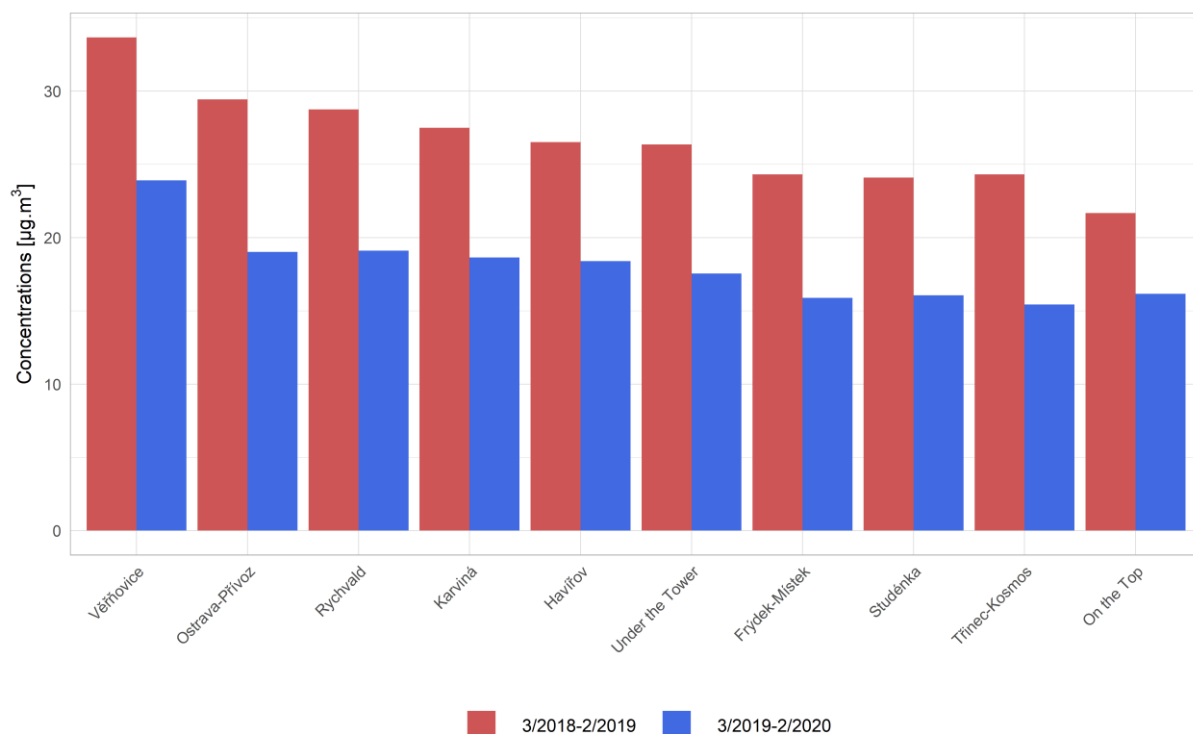
Při porovnání stanovených ročních koncentrací PM_{10} a $PM_{2.5}$ za sledované období (3/2018 – 2/2019 a 3/2019 – 2/2020) s ročními imisními limity pro tyto znečišťující látky (European Council 2008) lze konstatovat, že v případě PM_{10} byl limit $40 \mu\text{g.m}^{-3}$ dodržen, v případě $PM_{2.5}$ byl limit $20 \mu\text{g.m}^{-3}$ překročen (s výjimkou hodnoty stanovené za období 3/2019 – 2/2020 na stanici na věži). Viz Obr. 69 a Obr. 70. Je však třeba zohlednit, že se jedná o roční koncentrace stanovené pro období

pozorování, nikoli za legislativou stanovený kalendářní rok. Z Obr. 69 a Obr. 70 je patrné, že naměřené koncentrace PM odpovídají hodnotám měřeným ve sledovaných letech v regionu. Nejpodobnější hodnoty byly stanoveny na stanici ČHMÚ v Havířově, která je také stanici u paty věže nejbližší. Stanice na věži vykazuje všeobecně nižší hodnoty znečištění.

Při meziročním srovnání je z měření patrný pokles koncentrací suspendovaných částic jak na stanicích na Františku, tak v celém regionu. Dle konstatování ČHMÚ byly průměrné roční koncentrace PM₁₀ i PM_{2,5} v roce 2019 nejnižší za uplynulé desetiletí (Czech Hydrometeorological Institute 2020). Příčinou poklesu znečištění byly jednak dobré rozptylové podmínky daného roku a jednak všeobecný pokles emisí v regionu.



Obr. 69: Srovnání průměrných hodnot koncentrací PM₁₀ stanovených na věži a u paty věže za období pozorování s průměrnými ročními koncentracemi PM₁₀ na stanicích v regionu



Obr. 70: Srovnání průměrných hodnot koncentrací $PM_{2.5}$ stanovených na věži a u paty věže za období pozorování s průměrnými ročními koncentracemi $PM_{2.5}$ na stanicích v regionu

7.3 Odběr suspendovaných částic na filtry

S využití zařízení popsaného v kapitole 7.1 bylo v rámci realizace projektu na filtry odebráno a analyzováno 111 vzorků suspendovaných částic PM_{10} . Vzorky byly odebrány z 8 základních směrů větru a za bezvětrí, 3 vzorky byly odebrány během smogových situací. Filtry byly znečištěny vystaveny vždy po dobu jednoho měsíce v období od dubna 2018 do března 2019, tedy celkem za 12 měsíců. Vyhodnocení měření je provedeno na základě odborného článku (Pavlíková et al. 2020).

7.3.1 Koncentrace PM_{10}

Hmotnostní koncentrace PM_{10} byly stanoveny v souladu s EN 12341 (European Committee for Standardization 2014). Filtry byly váženy na analytických vahách (Sartorius MC 210P) před a po odběru vzorků. Před vážením byly filtry temperovány po dobu ≥ 48 hodin při kontrolované relativní vlhkosti ($50 \% \pm 5 \%$) a teplotě ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), poté byly poprvé zváženy, a po dalším temperování po dobu ≥ 12 h následovalo druhé vážení. Po odběru vzorků byly filtry váženy po 24 až 72 hodinách. V souladu s požadavky normy byl dodržen rozdíl výsledků vážení $\leq 40 \mu\text{g}$ pro filtry před odběrem vzorků a $\leq 60 \mu\text{g}$ pro filtry po odběru vzorků. Hmotnost filtru byla vypočtena jako průměr ze dvou měření. Zaznamenány byly také hmotnosti prázdných filtrů. Navážka PM_{10} byla vypočtena odečtením hmotnosti filtrů před expozicí hmotnosti po ní.

Hodnoty koncentrací PM_{10} odpovídající směrům větru, bezvětrí a inverzním situacím uvádí Tab. 9 jako roční průměr, průměr za teplé období (od dubna do září) a průměr za chladné období (od října do března) pro pozorování od dubna 2018 do března 2019.

Tab. 9: Průměrné koncentrace PM_{10} za předemětné období ($\mu\text{g.m}^{-3}$).

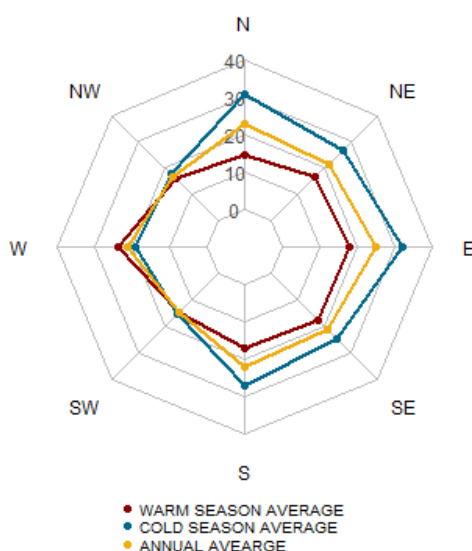
Povětrnostní podmínky	Průměr ¹	Průměr teplé období	Z-skóre ²	Průměr chladné období ¹	Z- skóre ²
Bezvětří	23,3	19,0	-0,35	27,6	1,16
S	22,9	14,6	-1,12	31,2	1,79
SV	21,7	16,5	-0,79	27,0	1,05
V	25,0	17,8	-0,56	32,3	1,97
JV	21,1	17,5	-0,60	24,6	0,64
J	21,9	16,9	-0,71	27,0	1,05
JZ	14,8	14,5	-1,14	15,1	-1,04
Z	21,3	23,6	0,45	19,0	-0,35
SZ	16,8	15,9	-0,89	17,8	-0,56

¹ Průměry vypočítané pro předmětné období (04/2018–03/2019), koncentrace za inverze nejsou zahrnuty.

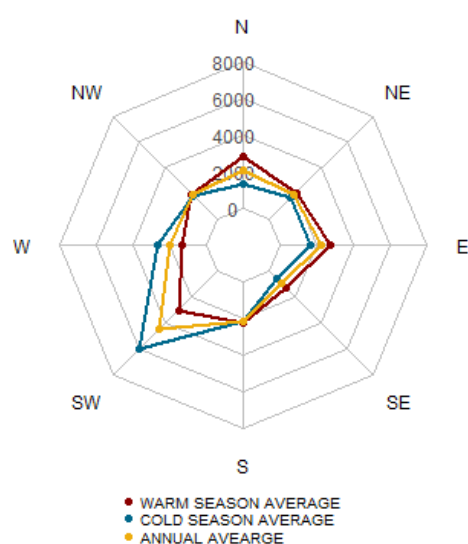
² Z-skóre průměrných hodnot vypočítané pro předmětné období (04/2018–03/2019).

7.3.2 Určení původu PM₁₀

Nejnižší hodnoty PM₁₀ byly pozorovány z JZ a SZ směru bez ohledu na roční období. Koncentrace byly v teplé části roku pod průměrem, s výjimkou západního směru kvůli vysoké koncentraci v srpnu 2018 (Obr. 71). Nejvyšší koncentrace byly v chladném období vzorkovány z východu a severu, i když v sezóně převládal směr větru JZ, viz Obr. 71 (b). Směr větru převládající v chladném období byl také převládajícím směrem větru za celou dobu pozorování, jak ukazuje Obr. 71 (b) (vyjádřeno jako objem vzorkovaného vzduchu). Bezvětří bylo zaznamenáno po dobu 12 % vzorkování.

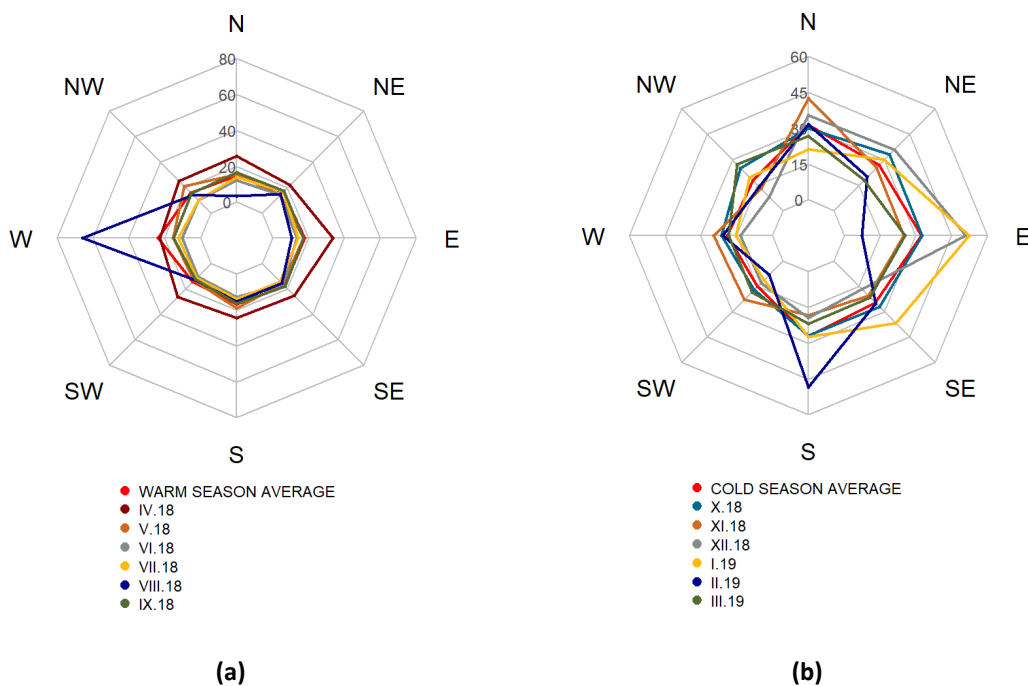


(a)



(b)

Obr. 71: Průměrné koncentrace PM₁₀ (a) a větrné růžice za sledované období (b).



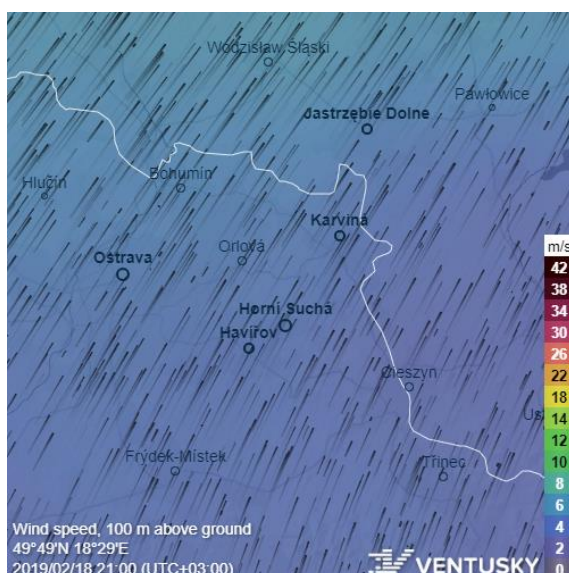
Obr. 72: Průměrné měsíční koncentrace PM_{10} pro teplé (a) a chladné (b) období.

Až na špičkovou koncentraci pozorovanou v srpnu 2018 není v teplé sezóně patrná žádná významná směrnost znečištění. Špičková srpnová koncentrace pocházela s největší pravděpodobností z metalurgického komplexu západně od monitorovací stanice (viz Obr. 3), jak napovídá i elementární složení tohoto vzorku. Podle meteorologických údajů se tato vysoká koncentrace objevila v období ustáleného cyklonového proudění vzduchu (rychlost větru od bezvětří do 2 m.s^{-1}), které předcházelo blížící se studené frontě.

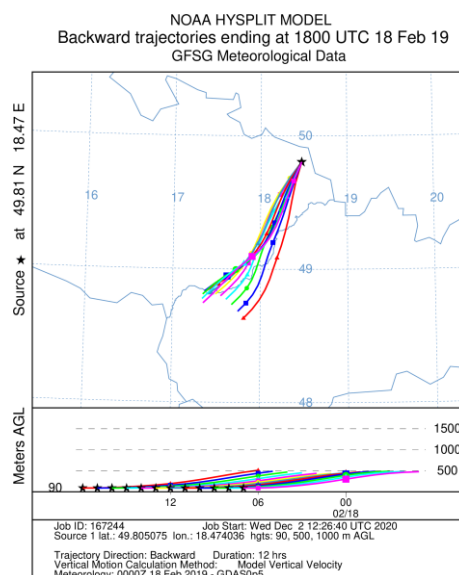
Dubnová koncentrační růžice má podobný průběh jako březnová (Obr. 72). S ohledem na prvky nalezené ve vzorcích lze předpokládat podobný původ znečištění. Dubnové koncentrace PM_{10} tedy souvisí spíše se zdroji znečišťování v chladném období.

Znečištění v zimním období pocházelo převážně ze severu, severovýchodu a východu, jak ukazují průměrné měsíční koncentrace PM_{10} na Obr. 72 (b). To potvrzuje význam přenosu PM z polského pohraničí. Zvýšení koncentrací PM_{10} z těchto směrů v zimním období činí v průměru o $14 \mu\text{g.m}^{-3}$, ačkoli převládající směr proudění v zimě je opačný (Obr. 71 (b)).

Vysoké koncentrace PM_{10} byly v zimním období odebrány během února 2019 také z jihu. Jelikož se v tomto směru nenachází žádný významný zdroj znečišťování, byly tyto koncentrace prozkoumány blíže. Meteorologické údaje ukázaly, že proudění bylo stabilní (rychlost větru $1\text{--}2 \text{ m.s}^{-1}$), přicházející Moravskou bránou od jihozápadu, doprovázené radiační inverzí (viz Obr. 73). To naznačuje, že špičková koncentrace pocházela z významného zdroje znečišťování v jižní části Moravské brány. Jednalo se pravděpodobně o cementárnu u Hranic na Moravě (asi 50 km od místa odběru), jak napovídá také elementární složení tohoto vzorku.



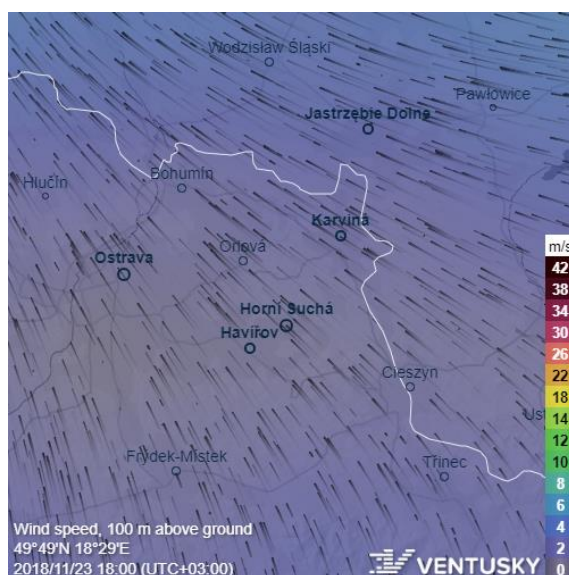
(a)



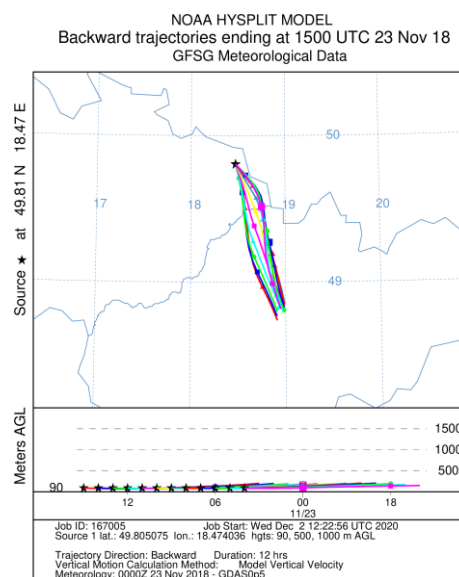
(b)

Obr. 73: Modelované větrné pole (a) a zpětné trajektorie (b) pro špičkovou koncentraci v únoru 2019 (InMeteo 2020; Stein et al. 2015; Rolph et al. 2017).

V zimní sezóně byly odebrány vzorky během dvou smogových situací, první ve dnech 19. a 23. listopadu 2018 (vzorkované na stejný filtr), přičemž koncentrace PM_{10} dosáhla $60,5 \mu g \cdot m^{-3}$, a druhá 23. března 2019 s koncentrací PM_{10} $57,4 \mu g \cdot m^{-3}$. V obou případech byla teplotní inverze spojená se stálým prouděním vzduchu (měřená rychlost větru $< 1 m \cdot s^{-1}$). V listopadu převládalo proudění vzduchu ze SV, V a JV směru. S největší pravděpodobností to představuje příliv znečištění z metalurgického komplexu na jihovýchod od místa odběru (viz Obr. 3), jak bylo potvrzeno modelováním zpětných trajektorií (viz Obr. 74). Pro březnovou smogovou situaci modelované proudění vzduchu ukazuje směr od SV a V, což naznačuje původ znečištění v polském pohraničí (viz Obr. 75). Elementární složení těchto vzorků je uvedeno v následující kapitole.

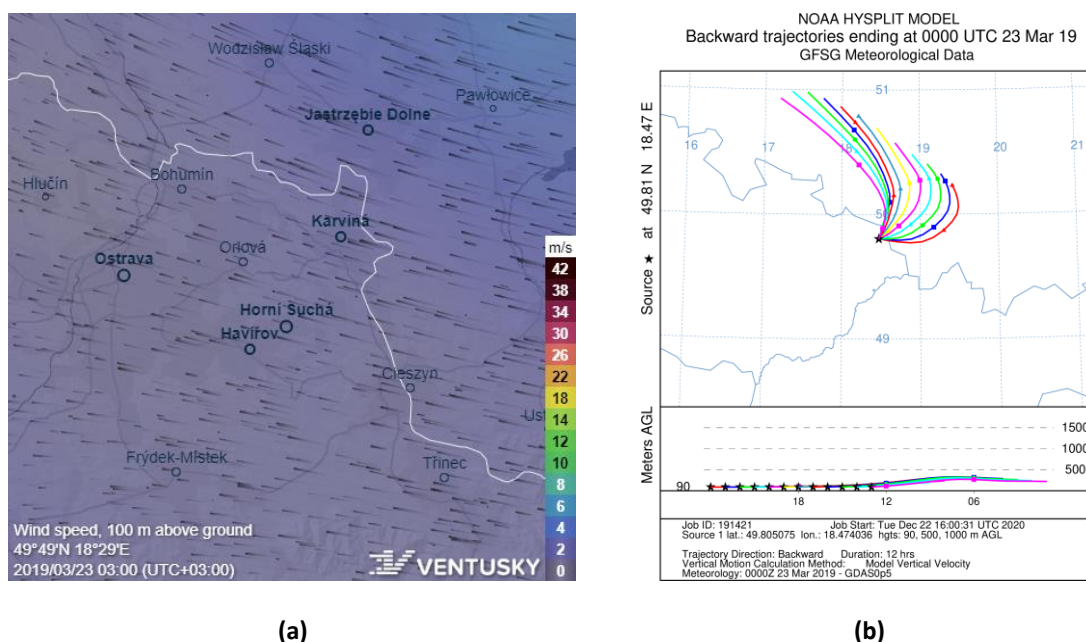


(a)



(b)

Obr. 74: Modelované větrné pole (a) a zpětné trajektorie (b) pro smogové situace v listopadu 2018 (InMeteo 2020; Stein et al. 2015; Rolph et al. 2017).



Obr. 75: Modelované větrné pole (a) a zpětné trajektorie (b) pro smogovou situaci v březnu 2019 (InMeteo 2020; Stein et al. 2015; Rolph et al. 2017).

7.3.3 Charakterizace prvkového složení pomocí neutronové aktivační analýzy

Jednou z klíčových aktivit projektu bylo charakterizovat vzorkované částice PM_{10} s využitím neutronové aktivační analýzy (NAA) provedené v reaktoru IBR-2 Spojeného ústavu pro jaderný výzkum (Rusko).

Před podrobením vzorků NAA byly připraveny dílčí vzorky exponovaných a prázdných filtrů, protože kapsle, které jsou používány pro pneumický transport vzorků k ozáření, mají omezený objem ($\varnothing$ 18 mm) a celý filtr se do nich nevejde. Příprava podvzorků rovněž umožnila vložit více dílčích vzorků do jedné kapsle, takže vzorky z jednoho měsíce a odpovídajícího prázdného filtru bylo možné ozářit společně za stejných podmínek. Za tímto účelem byla navržena a vyrobena speciální automatická vyrážecí hlava (použité materiály: nerezová ocel, teflon a povrchově upravená syntetická guma). Před vyražením byly filtry přeloženy na polovinu, aby se zabránilo ztrátě odebraného materiálu. Poté byly z přeloženého filtru pomocí vrstvení vyraženy 4 sady kroužků ($\varnothing$ 16 mm). Tímto způsobem byl připraven jeden dílčí vzorek z každého filtru (čítající osm vrstev exponovaného filtru) dosahující hmotnosti 0,06–0,07 g, v závislosti na navážce. Příprava filtrů probíhala při relativní vlhkosti 50 % ($\pm$ 5 %) a teplotě 20 °C ($\pm$ 1 °C). Po přípravě byl každý dílčí vzorek vakuově zabalen k přepravě na NAA.

Pro NAA byly vzorky rozbaleny, zváženy při kontrolované relativní vlhkosti a teplotě a vloženy do polyetylenových a hliníkových kelímků pro krátkodobé, resp. dlouhodobé ozařování. Následně byly umístěny do ozařovacích kapslí a transportovány do reaktoru.

Použitá NAA zajišťuje aktivaci epitermálními neutrony při nízkých teplotách a je proto vhodná pro tento typ vzorků. Kompletní informace o procesu ozařování, měření a řízení kvality lze najít v jiných pracích (Frontasyeva et al. 2010; Pavlov et al. 2016).

Pro krátkodobé ozáření byl použit Kanál 2 (epitermální neutrony, hustota toku $\varphi_{\text{epi}} = 2,0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) s dobou ozařování cca 3 minuty. Vzorky byly měřeny po 3 – 5minutovém rozpadu po dobu 15 minut. Tímto způsobem byly stanoveny izotopy Al, Ca, Cl, I, Mg, Mn, Si, Ti a V. Pro dlouhodobé ozařování byl použit kanál 1 zaštitěný Cd (epitermální neutrony, hustota toku $\varphi_{\text{epi}} = 2,0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) s dobou ozařování přibližně 4 dny. Po 4denním chlazení byly vzorky přebaleny a měřeny dvakrát. Poprvé byly měřeny přímo po přebalení po dobu 30 minut pro stanovení As, Br, K, La, Na, Mo, Sm, U a W, a podruhé 20 dní po ukončení ozařování po dobu 1,5 hodiny pro stanovení Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, Ni, Rb, Sb, Si, Sc, Se, Sr, Ta, Tb, Th, W, Zn a Zr.

Gama spektra aktivovaných vzorků byla měřena na detektorech HPGe (rozlíšení 1,9 keV pro vedení ^{60}Co 1 332 keV, účinnost 40 %). Získaná gama spektra byla poté zpracována pomocí softwaru GENIE-2K (CANBERRA) s ověřením shody píků v interaktivním režimu. Koncentrace prvků byly vypočítány pomocí certifikovaných referenčních materiálů ozářených současně se vzorky s využitím softwaru „CalcConc“ vyvinutého ve Frankově laboratoři neutronové fyziky, Spojeného ústavu jaderného výzkumu (Pavlov et al. 2016). Koncentrace prvků byly vypočteny odečtením odpovídajících hodnot prázdného filtru od stanovených hodnot prvku v podvzorku a přepočítáním pomocí hmotnostních koncentrací PM_{10} . V případě hodnot pod detekčním limitem byla použita polovina detekčního limitu. V případě chybějících hodnot (no data) způsobených technickými problémy během analýzy byla použita imputace dat, aby byly uchovány informace v datové sadě a umožněna vícerozměrná analýza (Dray a Josse 2015). Pro chybějící data, která nebyla pod detekčním limitem, byl použit algoritmus k-nejbližších sousedů (*knn*) (Hron et al. 2010).

Při NAA byla dodržována doporučení US EPA (Environmental Protection Agency 1999) s přihlédnutím k standardním pracovním postupům pracoviště. Kontrola kvality výsledků NAA byla zajištěna společnou analýzou třech různých standardů na každou šarži vzorků. Byly použity tyto standardní referenční materiály: 2709a–San Joaquin Soil Baseline Trace Element Concentrations z Národního ústavu standardů a technologií (NIST), 2710a–Montana I Soil Highly Elevated Trace Element Concentrations (NIST), 2711a–Montana II Soil Moderately Elevated Trace Element Concentrations (NIST), 1632c Trace Elements in Coal (Bituminous) (NIST), 1633c Trace Elements in Coal Fly Ash (NIST), AGV-2 Andesite z United States Geological Survey (USGS) a 433 z Ústavu pro referenční materiály a měření (IRMM). Bylo dosaženo uspokojivé shody mezi výsledky experimentu a certifikovaným materiálem. Přesnost vyjádřená jako procentní odchylka od certifikované hodnoty byla < 10 %.

Ačkoli použitá analytická metoda umožňuje stanovení široké škály prvků, má svá specifická omezení. V získaném prvkovém složení proto chybí některé důležité markery, které by usnadnily identifikaci zdrojů znečišťování. Jedná se o koncentrace Pb (nelze stanovit), Cd, Cu, Ni a Ti (stanovitelné pouze ve vysokých koncentracích).

Minimální a maximální hodnoty, průměry a mediány prvků stanovených v PM_{10} uvádí Tab. 10; korelace analyzovaných prvků uvádí Tab. 11.

Tab. 10: Souhrnná tabulka (minimum, maximum, průměr, medián) koncentrací prvků ($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$) stanovených v PM_{10} pomocí NAA

Prvek	Min	Max	Průměr	Medián
Al	$1,15 \times 10^{-2}$	873,83	15,35	0,73
As	$5,84 \times 10^{-4}$	5,17	0,34	0,04
Ba	$4,63 \times 10^{-2}$	350,98	18,76	0,52

Br	3,08 x 10 ⁻⁴	1,72	0,18	0,12
Ca	8,78 x 10 ⁻¹	87,38	13,47	7,33
Ce	6,47 x 10 ⁻³	1,01	0,12	0,07
Cl	5,39 x 10 ⁻²	150,66	15,73	2,12
Co	1,71 x 10 ⁻⁴	0,247	0,019	0,011
Cr	4,30 x 10 ⁻³	3,22	0,39	0,25
Cs	9,64 x 10 ⁻⁵	0,023	0,005	0,003
Eu	3,39 x 10 ⁻⁵	1,90 x 10 ⁻²	3,26 x 10 ⁻³	1,60 x 10 ⁻³
Fe	2,15 x 10 ⁻¹	92,77	19,32	13,42
Hf	5,49 x 10 ⁻⁴	0,121	0,013	0,004
I	7,19 x 10 ⁻⁴	0,64	0,09	0,05
K	5,42	524,77	74,20	46,06
La	4,37 x 10 ⁻⁴	0,67	0,04	0,01
Mg	3,65 x 10 ⁻¹	163,72	9,54	5,77
Mn	1,18 x 10 ⁻³	11,77	1,18	0,62
Na	1,30 x 10 ⁻¹	1074,73	62,80	1,58
Rb	3,02 x 10 ⁻³	0,666	0,057	0,028
Sb	4,73 x 10 ⁻⁵	0,198	0,050	0,035
Sc	3,18 x 10 ⁻⁴	0,021	0,003	0,002
Se	1,80 x 10 ⁻⁴	0,176	0,022	0,012
Si	1,69 x 10 ¹	6423,41	1529,79	1077,04
Sm	2,51 x 10 ⁻⁵	6,35 x 10 ⁻²	2,65 x 10 ⁻³	7,44 x 10 ⁻⁴
Sr	6,01 x 10 ⁻²	5,428	0,847	0,486
Ta	1,55 x 10 ⁻⁶	1,94 x 10 ⁻³	2,36 x 10 ⁻⁴	1,23 x 10 ⁻⁴
Tb	3,06 x 10 ⁻⁵	6,54 x 10 ⁻³	8,90 x 10 ⁻⁴	5,75 x 10 ⁻⁴
Th	2,57 x 10 ⁻⁴	2,90 x 10 ⁻²	3,67 x 10 ⁻³	1,97 x 10 ⁻³
U	9,78 x 10 ⁻⁵	1,51 x 10 ⁻¹	4,96 x 10 ⁻³	7,31 x 10 ⁻⁴
V	2,42 x 10 ⁻⁴	0,191	0,027	0,018
W	8,41 x 10 ⁻⁴	0,202	0,012	0,007
Zn	1,39 x 10 ⁻²	729,39	40,84	0,16
Zr	2,28 x 10 ⁻²	7,14	1,04	0,80

Tab. 11: Prvky s Pearsonovými korelačními koeficienty > 0,7 stanovenými pro příslušná období.

Teplé období

As	Cl	Cr	I	Mg	
Ba	Zn				
Br	Fe	La	Mn	Sm	Th

Chladné období

As	La	Sm	Sr	U		
Ba	Ce	Rb	Sc	Sm	Ta	U
Br	I					

Ca	K			Ce	Rb	Sc	Ta	Th	U	Zr
Ce	K	Rb	Th	Fe	Sc					
Cl	Cr	I	Mg	I	Sb	Se				
Cr	I	Mg		K	Na					
Fe	Sm	Th		La	Sr					
Hf	Si			Rb	Sc	Ta	U			
I	Mg			Sb	Se					
La	Sm	Th		Sc	Ta					
Rb	Sm			Sm	U					
Sm	Th			Ta	U					
Ta	V									

Obsahy prvků a koncentrace se liší v závislosti na ročním období. Data byla proto hodnocena samostatně.

Korelace obsahu stanovených prvků závisí na ročním období, což potvrzuje variabilitu zdrojů a odlišný původ znečištění. Byla zjištěna silná pozitivní korelace ($R > 0,7$) mezi As a Cr, Mn, Br a I v teplé sezóně a As koreloval s La, Sm, Sr a U v zimě. To naznačuje – spolu se směrovostí koncentrací těchto prvků, že výskyt As v teplém období souvisí s metalurgickými procesy (Bureš a Velíšek 2005; Alleman et al. 2010; Sylvestre et al. 2017), zatímco v zimních vzorcích jeho zdrojem spíše spalování černého uhlí (Bureš a Velíšek 2005; Hurst et al. 1991; Ritz et al. 2003; Horák et al. 2019; Ramme a Tharaniyil 2013; Robl et al. 2017).

Obsah prvků v produktech spalování uhlí, nebo přesněji v popílku, hraje v této studii důležitou roli pro stanovení původu znečištění, zejména v chladném období. Distribuce prvků během tohoto procesu je dobře popsána v mnoha pracích (Ritz et al. 2003; Ramme a Tharaniyil 2013; Robl et al. 2017; Juda-Rezler a Kowalczyk 2013) a je třeba vzít v úvahu řadu faktorů. Jedná se o obsah prvků v uhlí a jejich vazbu, teploty varu prvků a jejich sloučenin (v souvislosti s teplotou spalování). Dalšími důležitými faktory ovlivňujícími výsledné emise jsou také typ pece, jmenovitý výkon, teplota spalování, typ odlučovače a jeho provozní teplota, fyzikálně-chemické reakce s jinými látkami (příspěvy, síra nebo halogeny) a další. V závislosti na těchto podmínkách jsou v literatuře popsána různá elementární složení emisí popílku (Ritz et al. 2003; Wang et al. 2019; Bray et al. 2019; Pernigotti et al. 2016; Simon et al. 2010). Prvky přítomné v popílku z černého uhlí uváděné ve většině informačních zdrojů jsou As, Cd, Se, Pb a Hg; ostatní prvky se liší. Pojmenované prvky lze tedy považovat za silné markery tohoto procesu. S ohledem na výše uvedená omezení NAA, je třeba prozkoumat i další méně běžné prvky. Při stanovení hlavních zdrojů znečištění na základě dalších prvků bylo tedy zohledněno prvkové složení emisí konkrétních zdrojů v regionu (Bureš a Velíšek 2005; Horák et al. 2019). Přítomnost nebo nepřítomnost prvku tak může indikovat nebo vyloučit původ z určitého zdroje.

V teplém období Fe silně korelovalo s Br, Sm a Th, zatímco v zimě pouze se Sc. Vzhledem ke směru, odkud pocházejí nejvyšší koncentrace těchto prvků (V, SV), lze předpokládat, že jejich výskyt je spojen s primární metalurgií (Bureš a Velíšek 2005; Alleman et al. 2010). Cr koreloval s As, I a Mg v teplé sezóně, zatímco u zimních vzorků nebyla nalezena žádná významná korelace. Nejvyšší koncentrace těchto prvků v teplé sezóně pocházela ze západního směru, což naznačuje vztah

k výrobě oceli a železa (Sylvestre et al. 2017; Ghosh a Chatterjee 2010; Mohiuddin et al. 2014). Další korelace viz Tab. 11 výše. Je třeba poznamenat, že hodnoty prvků vzácných zemin (REE) byly v dobré korelaci, což je důležité jak pro hodnocení kvality dat, tak pro pochopení procesu přenosu znečištění (Beijer 1986; Avino et al. 2008).

Zvláštní pozornost byla věnována vzorkům s nejvyššími koncentracemi PM_{10} . Vzorek odebraný v srpnu 2018 ze západního sektoru byl charakterizován vysokými koncentracemi Cr, Mg a I (nejvyšší ze všech souborů) a relativně vysokými koncentracemi Mn a Co. Cr a Co jsou důležité legury pro zajištění speciálních vlastností oceli; Cr i Mg jsou významnou součástí žáruvzdorné vyzdívky metalurgických zařízení (Ghosh a Chatterjee 2010; Bažan a Socha 2013). Kromě toho Mg (s Ca) představuje základní přísadu používanou téměř v každém kroku procesu výroby oceli od aglomerace a vysokých pecí (dolomitický vápenec, dolomit) až po finální výrobu oceli (magnezit). Mn je běžným prvkem v austenitických ocelích vyráběných v místních ocelárnách (Bureš a Velíšek 2005; Sylvestre et al. 2017; Ghosh a Chatterjee 2010; Bažan a Socha 2013). Přítomnost jodu může souviset s koksováním (Bureš a Velíšek 2005). Vzhledem k těmto skutečnostem je ocelárna západně od monitorovací stanice nejpravděpodobnějším původcem této špičkové koncentrace PM_{10} (viz Obr. 3 výše).

Elementární složení vzorku z jihu v únoru 2019 bylo charakterizováno vysokými koncentracemi Ca, Se a V (nejvyšší ze všech souborů) a relativně vysokými koncentracemi I a Sb. Vysoká koncentrace Ca je pravděpodobně spojena s cementárnou (Bureš a Velíšek 2005; Larsen et al. 2012; Samara et al. 2003; Yarkin a Bayram 2008) a vzhledem k výše zmíněným meteorologickým podmínkám tato vysoká vrchol koncentrace pravděpodobně pocházela z cementárny poměrně daleko od vzorkovací věže (asi 50 km na jihozápad). Tuto hypotézu lze podpořit faktem, že se při vypalování slínku v této továrně používají kromě uhlí i alternativní paliva na bázi odpadu či dehtu, čímž lze vysvětlit vysoké koncentrace ostatních stanovených prvků.

Vzorky odebrané během smogových událostí se ve svém elementárním složení významně lišily. PM_{10} odebrané v listopadu 2018 byly charakterizovány vysokými koncentracemi Ba, Ce, Fe, Hf, Rb, Sc, Ta, Th, U a Zr (nejvyšší ze všech souborů), zatímco vzorek v březnu 2019 vysokými koncentracemi Si, Sr, Zn a Eu. Elementární složení prvního vzorku naznačuje dva zdroje znečišťování: spalování uhlí a metalurgii (Seibert et al. 2020; Bureš a Velíšek 2005; Sylvestre et al. 2017; Horák et al. 2019). Tyto vysoké koncentrace byly odebrány během ustáleného proudění vzduchu ze směru SV, V a JV, což naznačuje původ znečištění v ocelárně na jihovýchod k místu odběru vzorků (viz Obr. 3) spolu se spalováním uhlí v lokálních topeništích. Původ znečištění v případě druhé inverzní situace není tak jasný; modelované proudění vzduchu nicméně směřuje do polského pohraničí (viz Obr. 75) (Bureš a Velíšek 2005; Ritz et al. 2003; Mohiuddin et al. 2014; Larsen et al. 2012).

7.3.4 Vyhodnocení měření

V rámci této aktivity bylo stanoveno elementární složení odebraných částic PM_{10} s využitím NAA a původ znečištění byl vysvětlen na základě určeného prvkového složení jako ukazatele zdrojů znečišťování, statistických analýz a meteorologických modelů. Častěji se původ znečištění zkoumá pomocí receptorového modelování (Pokorná et al. 2015; Seibert et al. 2020; Norris et al. 2014; European Commission. Joint Research Centre. 2019; Samara et al. 2003). S ohledem na specifika získaného datového souboru (dlouhá doba vzorkování, malý počet vzorků v každém sektoru), nepravidelné časové rozlišení vzorků a spornou konstrukci matice nejistot (různé váhy příslušných vzorků) využití této metody není vhodná.

I přes popsaná omezení použitých metod tato práce potvrdila, že znečištění v regionu ovlivňují specifické typy zdrojů znečišťování, včetně dvou metalurgických podniků (západně a jihovýchodně od místa odběru vzorků), které za jistých meteorologických podmínek zvyšují imisní zatížení v regionu a přispívají k přenosu znečištění ve vyšších vrstvách atmosféry. V určitých situacích však tento přenos pozemní monitorovací stanice nezachytí (ve srovnání s (Czech Hydrometeorological Institute 2018)). To potvrzuje oprávněnost umístění vzorkovacího zařízení v 90 m nad zemským povrchem. Odběrem vzorků v takové výšce je vyloučen příspěvek místních zdrojů (emise z domácností, doprava, stavební činnost, podzimní spalování odpadní biomasy apod.) (Seibert et al. 2020; Bernardoni et al. 2011; Cristina Colombi et al. 2010) a přenos znečištění v regionu lze vyšetřit přesněji.

Druhým specifickým typem znečištění v regionu je znečištění spojené s přeshraničním přenosem z Polska pocházejícím ze spalování uhlí v lokálních topeništích během zimního období. V chladné části roku se koncentrace PM_{10} pocházející z polského pohraničí (ze směru sever, severovýchod a východ) zvýšily téměř o 50 %, a to navzdory tomu, že převládající směr větru je podle pozemních pozorování opačný. Tato skutečnost již byla uvedena v mnoha předchozích studiích (Blažek 2013; Jančík et al. 2013; Černíkovský et al. 2016; Český hydrometeorologický ústav 2019b; Seibert et al. 2020). Měření na věži však ukázala, že v předmětném období byl převládající směr proudění v chladné části roku severovýchodního a severního směru, tedy právě od strany Polska. Toto zjištění tak může změnit náhled na interpretaci přenosu znečištění v regionu. Uvedené výsledky opět potvrzují význam přeshraničního vlivu na koncentrace PM v tomto regionu a poukazují na skutečnost, že nejde jen o problém blízké příhraniční oblasti, ale regionu jako celku.

Pro stanovení elementárního složení vzorků byla použita neutronová aktivační analýza a bylo stanoveno široké spektrum prvků. Tato metoda na jedné straně znamenala jistá omezení, ale na druhé straně napomohla identifikovat původ koncentrací prvků ve vzorcích pomocí stanovení koncentrací méně běžných prvků. Ačkoli je třeba poznamenat, že NAA neposkytuje data o některých důležitých prvcích, jako jsou Cd, Cu, Hg nebo Pb, získané informace však byly ve většině případů dostatečné k identifikaci zdroje znečišťování.

Aby bylo možné shromáždit více údajů o přenosu znečištění v oblasti během různých meteorologicky odlišných let a zpřesnit hodnocení, monitorování na měřicích zařízeních i nadále pokračuje.

8 Závěr

Oblast slezského česko-polského příhraničí je dlouhodobě řazena k územím s nejznečištěnějším ovzduším v Evropě. Míra znečištění ovzduší v této oblasti je proto bedlivě sledována s cílem najít příčiny tohoto problému a aplikovat taková opatření, která povedou k žádoucímu zlepšení přetrvávajícího neuspokojivého stavu. Lidé žijící v této oblasti si tento problém uvědomují a vnímají ho jako jeden z klíčových faktorů, který negativně ovlivňuje kvalitu života v regionu a představuje jistá zdravotní rizika. Z tohoto důvodu je třeba znalosti o příčinách zhoršené kvality ovzduší neustále prohlubovat a aktualizovat, aby bylo možné identifikovat konkrétní původce znečištění a problém efektivně řešit.

Výsledky prezentované v této studii povstaly na základě Společných česko-polských měření přeshraničního přenosu znečišťujících látek v ovzduší v rámci s akronymem „AIR BORDER“. Hlavním cílem projektu bylo lépe porozumět znečištění, které má původ v přeshraničním přenosu, a podrobněji popsat procesy přenosu částic PM_{10} v rámci zkoumaného regionu. Proto bylo v rámci projektu měřeno znečištění ovzduší suspendovanými částicemi a meteorologické údaje na stanicích po obou stranách hranice a doplňkově prostřednictvím vzducholodě. Stacionární měření byla na české straně prováděna na nově vybudované stanici v Horní Suché v průmyslové zóně František, na polské straně pak na stávající stanici IMGW-PIB v Ratiboři.

Na obou lokalitách byly kontinuálně měřeny koncentrace suspendovaných částic frakcí PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} a celkové suspendované částice (TSP) a základní meteorologické veličiny – teplota, tlak, vlhkost, rychlost a směr větru. Stanice v Ratiboři byla dále vybavena zařízením pro kontinuální měření vertikálního profilu teploty v mezní vrstvě atmosféry s cílem identifikovat inverzní vrstvu rozptýlu znečištění ovzduší, jakožto faktoru, který klíčově ovlivňuje přenos znečištění ve volné atmosféře (Blažek 2013; Volná a Hladký 2020). Jejím primárním účelem bylo tedy sledovat přenos znečištění z hlediska meteorologických parametrů. Stanice v Horní Suché byla více zaměřena na charakterizaci samotných částic. Sledovala znečištění z různých skupin zdrojů znečišťování ovzduší specifických pro daný region, s vyloučením vlivu místních zdrojů (Volná a Hladký 2020). Za tímto účelem byl použit k odběru speciálně navržený velkoobjemový vzorkovač (SAM Hi 30 AUTO WIND). Vzorkovač byl umístěn na vrcholu bývalé těžební věže ve výšce přibližně 90 m nad zemským povrchem. To umožnilo zkoumat regionální přenos znečištění a zároveň splnit předpoklad vyloučení vlivu lokálních zdrojů. Prvkové složení odebraných částic bylo stanoveno pomocí neutronové aktivační analýzy a výsledky byly společně se stanovenými koncentracemi PM_{10} a meteorologickými údaji (měřenými a modelovanými) použity k charakterizaci původu znečištění v oblasti. Byl pozorován významný rozdíl ve složení prvků: koncentrace prvků byly závislé jak na ročním období, tak na směru odběru vzorků. Byly identifikovány určité situace, kdy znečištění pocházelo z konkrétního zdroje znečišťování v okolí stanice.

Na základě představených výsledků měření v rámci projektu AIR BORDER jsme schopni lépe pochopit proces přeshraničního přenosu znečišťujících látek včetně faktorů, které jej ovlivňují. Z těchto zjištění je pak možné vycházet při tvorbě nástrojů vedoucích k řešení nepříznivého stavu ovzduší v regionu a zavedení konkrétních opatření. Vzhledem k poloze zájmové oblasti je zřejmé, že spolupráce odborné i laické veřejnosti, včetně politické reprezentace je při řešení problému znečištění ovzduší nevyhnutelná.

Literatura

- ALLEMAN, Laurent Y., Laure LAMAISON, Esperanza PERDRIX, Antoine ROBACHE a Jean-Claude GALLOO, 2010. PM10 metal concentrations and source identification using positive matrix factorization and wind sectoring in a French industrial zone. *Atmospheric Research* [online]. **96**(4), 612–625. ISSN 01698095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2010.02.008
- AVINO, P., G. CAPANNESI a A. ROSADA, 2008. Heavy metal determination in atmospheric particulate matter by Instrumental Neutron Activation Analysis. *Microchemical Journal* [online]. **88**(2), SELECTED PAPERS FROM THE 1st INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MULTIVARIATE ANALYSIS AND CHEMOMETRICS FOR CULTURAL HERITAGE AND ENVIRONMENT Nemi, Italy 2 - 4 October 2006, 97–106. ISSN 0026-265X. Dostupné z: doi:10.1016/j.microc.2007.11.005
- BAŽAN, Jiří a Ladislav SOCHA, 2013. *ZÁKLADY TEORIE A TECHNOLOGIE VÝROBY ŽELEZA A OCELI: Část II - Základy teorie a technologie výroby oceli*. 1. Ostrava, Czech Republic: VŠB – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3353-8.
- BEIJER, K, 1986. Sources, transport and transformation of metals in the environment. *Handbook of the Toxicology of Metals*. **1**, 68.
- BERNARDONI, Vera, Roberta VECCHI, Gianluigi VALLI, Andrea PIAZZALUNGA a Paola FERMO, 2011. PM10 source apportionment in Milan (Italy) using time-resolved data. *Science of The Total Environment* [online]. **409**(22), 4788–4795. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2011.07.048
- BLAŽEK, Zdeněk, ed., 2013. *Vliv meteorologických podmínek na kvalitu ovzduší v přeshraniční oblasti Slezska a Moravy =: Wpływ warunków meteorologicznych na jakość powietrza w obszarze przygranicznym Śląska i Moraw = The influence of meteorological conditions on air quality in the border region of Silesia and Moravia* [online]. Vydání první. Praha : Warszawa: Český hydrometeorologický ústav ; Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy. ISBN 978-80-87577-15-8. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/OCO/pdf_ooco/publikace.pdf
- BRAY, Casey D., Madeleine STRUM, Heather SIMON, Lee RIDDICK, Mike KOSUSKO, Marc MENETREZ, Michael D. HAYS a Venkatesh RAO, 2019. An assessment of important SPECIATE profiles in the EPA emissions modeling platform and current data gaps. *Atmospheric Environment* [online]. **207**, 93–104. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2019.03.013
- BUREŠ, Vladimír a Jan VELÍŠEK, 2005. *Reduction of emissions of pollutants into the air: 2nd stage, year 2005 (Omezování emisí znečišťujících látek do ovzduší: II. etapa, rok 2005)* [online]. listopad 2005. B.m.: TECHNICKÉ SLUŽBY OCHRANY OVZDUŠÍ PRAHA, a.s. Dostupné z: http://www.teso.cz/adm/data/files/others/zprava-vav-sm-9_14_04-2005.pdf
- CABALA, Jerzy, Cmiel S.R. a Adam IDZIAK, 2004. Environmental impact of mining activity in the Upper Silesian Coal Basin. *Geologica Belgica*. **7**, 225–230.
- CARSLAW, David a Karl ROPKINS, 2020. *Package 'openair'* [online]. 06 2020. Dostupné z: <https://cran.r-project.org/web/packages/openair/openair.pdf>
- COHEN, Aaron J, Jonathan M SAMET, Kurt STRAIF, a INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 2013. *Air pollution and cancer* [online]. Lyon: International Agency for Research on

- Cancer [vid. 2020-06-29]. ISBN 978-92-832-2161-6. Dostupné z: <http://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Scientific-Publications/Air-Pollution-And-Cancer-2013>
- CRISTINA COLOMBI, VORNE GIANELLE, CLAUDIO BELIS, a BO LARSEN, 2010. Determination of local source profile for soil dust, brake dust and biomass burning sources. *Chemical Engineering Transactions* [online]. **22**, 233–238. Dostupné z: doi:10.3303/CET1022038
- CZECH HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE, 2016. CHMI - Tabular survey, air pollution and atmospheric deposition in data, the Czech republic - 2015. *Czech Hydrometeorological Institute* [online] [vid. 2020-04-23]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2015_enh/index_GB.html
- CZECH HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE, 2018. CHMI - Tabular survey, air pollution and atmospheric deposition in data, the Czech republic - 2017. *Czech Hydrometeorological Institute* [online] [vid. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2017_enh/index_GB.html
- CZECH HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE, 2019. CHMI - Tabular survey, air pollution and atmospheric deposition in data, the Czech republic - 2018. *Czech Hydrometeorological Institute* [online] [vid. 2020-04-14]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2018_enh/index_GB.html
- CZECH HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE, 2020. CHMI - Tabular survey, air pollution and atmospheric deposition in data, the Czech republic - 2019. *Czech Hydrometeorological Institute* [online] [vid. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2019_enh/index_GB.html
- ČERNIKOVSKÝ, Libor, Blanka KREJČÍ, Zdeněk BLAŽEK a Vladimíra VOLNÁ, 2016. Transboundary Air-Pollution Transport in the Czech-Polish Border Region between the Cities of Ostrava and Katowice. *Central European Journal of Public Health* [online]. **24**(Supplement), S45–S50. ISSN 12107778, 18031048. Dostupné z: doi:10.21101/cejph.a4532
- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, 2019a. *Aktualizace programů zlepšování kvality ovzduší 2020+: Aglomerace Ostrava/Karviná/Frydek-Místek CZ08A* [online]. 2019. B.m.: Ministerstvo životního prostředí ČR. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/aktualizace_programu_zlepsovani_kvality_ovzdu_si_2020/\\$FILE/OOO-CZ08A-20191219.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/aktualizace_programu_zlepsovani_kvality_ovzdu_si_2020/$FILE/OOO-CZ08A-20191219.pdf)
- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, 2019b. *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2018* [online]. 2019. [vid. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/18groc/gr18cz/KO_rocenka_2018.pdf
- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV a UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI, 2007. *Atlas podnebí Česka (Climate atlas of Czechia)*. Vydání 1. Praha : Olomouc: Český hydrometeorologický ústav ; Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-80-86690-26-1.
- ČÍŽOVÁ, Helena, 1994. Projekt Slezsko/Silesia. (in Czech). *Zpravodaj Ministerstva životního prostředí ČR*. **1994**(3), 6–7.
- DRAY, Stéphane a Julie JOSSE, 2015. Principal component analysis with missing values: a comparative survey of methods. *Plant Ecology* [online]. **216**(5), 657–667. ISSN 1385-0237, 1573-5052. Dostupné z: doi:10.1007/s11258-014-0406-z

ŽURČANSKÁ, Daniela, ed., 2020. *Riadenie kvality ovzdušia / Zarządzanie jakością powietrza*. 1. Žilina, Slovakia: EDIS – vydavateľské centrum, Žilinská univerzita v Žiline. ISBN 978-80-554-1658-8.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999. *Method IO-3.7 - Determination of Metals in Ambient Particulate Matter Using Neutron Activation Analysis (NAA) Gamma Spectrometry* [online]. 1999. B.m.: Environmental Protection Agency. Dostupné z: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-11/documents/mthd-3-7.pdf>

EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE., 2019. *European guide on air pollution source apportionment with receptor models: revised version 2019*. [online]. LU: Publications Office [vid. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/439106>

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2014. *EN 12341:2014 - Ambient air - Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM10 or PM2,5 mass concentration of suspended particulate matter*. 2014. B.m.: European Committee for Standardization.

EUROPEAN COUNCIL, 2008. *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe* [online]. 11. červen 2008. [vid. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2008:152:TOC>

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019. *Air quality in Europe: 2019 report*. [online] [vid. 2020-04-14]. ISBN 978-92-9480-088-6. Dostupné z: https://op.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_THAL19012ENN

FRONTASYEVA, M. V., S. S. PAVLOV a V. N. SHVETSOV, 2010. NAA for applied investigations at FLNP JINR: present and future. *Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry* [online]. **286**(2), 519–524. ISSN 02365731. Dostupné z: doi:10.1007/s10967-010-0814-z

GHOSH, Ahindra a Amit CHATTERJEE, 2010. *Ironmaking and steelmaking: theory and practice*. 3. print. New Delhi: PHI Learning. Eastern economy edition. ISBN 978-81-203-3289-8.

GŁÓWNY URZĄD STATYSTYCZNY / STATISTICS POLAND, 2019. *Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2018 r. Energy consumption in households in 2018* [online]. Warszawa / Warsaw, Poland: Główny Urząd Statystyczny / Statistics Poland. ISSN 2084-8137. Dostupné z: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/zuzycie-energii-w-gospodarstwach-domowych-w-2018-roku,2,4.html>

HORÁK, Jiří, Lenka KUBOŇOVÁ, Stanislav BAJER, Milan DEJ, František HOPAN, Kamil KRPEC a Tadeáš OCHODEK, 2019. Composition of ashes from the combustion of solid fuels and municipal waste in households. *Journal of Environmental Management* [online]. **248**, 109269. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2019.109269

HRON, K., M. TEMPL a P. FILZMOSER, 2010. Imputation of missing values for compositional data using classical and robust methods. *Computational Statistics & Data Analysis* [online]. **54**(12), 3095–3107. ISSN 01679473. Dostupné z: doi:10.1016/j.csda.2009.11.023

HŮNOVÁ, Iva, 2020. Ambient Air Quality in the Czech Republic: Past and Present. *Atmosphere* [online]. **11**(2), 214. Dostupné z: doi:10.3390/atmos11020214

HURST, Richard W., Terry E. DAVIS a Ahmed A. ELSEEWI, 1991. Strontium isotopes as tracers of coal combustion residue in the environment. *Engineering Geology* [online]. **30**(1), Applied

- Geosciences for Low-Level Radioactive and Chemical Wastes, 59–77. ISSN 0013-7952. Dostupné z: doi:10.1016/0013-7952(91)90035-J
- INMETEO, 2020. VENTUSKY. VENTUSKY [online]. Dostupné z: <https://www.ventusky.com/?p=49.8;18.5;5&l=wind-10m>
- JANČÍK, Petr, Irena PAVLÍKOVÁ, Jan BITTA a Daniel HLADKÝ, 2013. *Atlas ostravského ovzduší*. Ostrava, Czech Republic: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3006-3.
- JIRÍK, Vítězslav, Ondřej MACHACZKA, Hana MITUROVÁ, Ivan TOMÁŠEK, Hana ŠLACHTOVÁ, Jana JANOUTOVÁ, Helena VELICKÁ a Vladimír JANOUT, 2016. Air Pollution and Potential Health Risk in Ostrava Region - a Review. *Central European Journal of Public Health* [online]. **24 Suppl**, S4–S17. ISSN 1210-7778. Dostupné z: doi:10.21101/cejph.a4533
- JUDA-REZLER, Katarzyna a Dominik KOWALCZYK, 2013. Size Distribution and Trace Elements Contents of Coal Fly Ash from Pulverized Boilers. *Polish Journal of Environmental Studies*. **22**(1), 25–40. ISSN 1230-1485.
- KLUSÁČEK, Petr, 2005. Downsizing of bituminous coal mining and the restructuring of steel works and heavy machine engineering in the Ostrava region. *Moravian Geographical Reports*. **13**, 3–11.
- KONDRACKI, Jerzy, 2014. *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN. ISBN 978-83-01-16022-7.
- KOTTEK, Markus, Jürgen GRIESER, Christoph BECK, Bruno RUDOLF a Franz RUBEL, 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* [online]. **15**(3), 259–263. ISSN 0941-2948. Dostupné z: doi:10.1127/0941-2948/2006/0130
- KRUG, Jonathan D., Andrew DART, Carlton L. WITHERSPOON, Jerome GILBERRY, Quentin MALLOY, Surender KAUSHIK a Robert W. VANDERPOOL, 2017. Revisiting the size selective performance of EPA's high-volume total suspended particulate matter (Hi-Vol TSP) sampler. *Aerosol Science and Technology* [online]. **51**(7), 868–878. ISSN 0278-6826, 1521-7388. Dostupné z: doi:10.1080/02786826.2017.1316358
- KURFÜRST, Jiří, 2008. *Kompendium ochrany kvality ovzduší*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor. ISBN 978-80-86832-38-8.
- KUSKOVA, Petra, Simone GINGRICH a Fridolin KRAUSMANN, 2008. Long term changes in social metabolism and land use in Czechoslovakia, 1830–2000: An energy transition under changing political regimes. *Ecological Economics* [online]. **68**(1), 394–407. ISSN 0921-8009. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolecon.2008.04.006
- LARSEN, B.R., S. GILARDONI, K. STENSTRÖM, J. NIEDZIALEK, J. JIMENEZ a C.A. BELIS, 2012. Sources for PM air pollution in the Po Plain, Italy: II. Probabilistic uncertainty characterization and sensitivity analysis of secondary and primary sources. *Atmospheric Environment* [online]. **50**, 203–213. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2011.12.038
- LEONI, Cecilia, Petra POKORNÁ, Jan HOVORKA, Mauro MASIOL, Jan TOPINKA, Yongjing ZHAO, Kamil KŘŮMAL, Steven CLIFF, Pavel MIKUŠKA a Philip K. HOPKE, 2018. Source apportionment of aerosol particles at a European air pollution hot spot using particle number size distributions and chemical composition. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)* [online]. **234**, 145–154. ISSN 1873-6424. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2017.10.097

MAYNARD, Robert, Michal KRZYŻANOWSKI, Nadia VILAHUR, Marie-Eve HÉROUX, WELTGESUNDHEITSORGANISATION, a REGIONALBÜRO FÜR EUROPA, 2017. *Evolution of WHO air quality guidelines past, present and future* [online] [vid. 2020-06-02]. ISBN 978-92-890-5230-6. Dostupné z: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0019/331660/Evolution-air-quality.pdf?ua=1

MIKUŠKA, P., K. KŘŮMAL a Z. VEČEŘA, 2015. Characterization of organic compounds in the PM_{2.5} aerosols in winter in an industrial urban area. *Atmospheric Environment* [online]. **105**, 97–108. ISSN 13522310. Dostupné z: [doi:10.1016/j.atmosenv.2015.01.028](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.028)

MOHIUDDIN, K., V. STREZOV, P. F. NELSON a E. STELCER, 2014. Characterisation of trace metals in atmospheric particles in the vicinity of iron and steelmaking industries in Australia. *Atmospheric Environment* [online]. **83**, 72–79. ISSN 1352-2310. Dostupné z: [doi:10.1016/j.atmosenv.2013.11.011](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.011)

MORAVSKOSLEZSKÝ KRAJ, 2021. *Atlas Moravskoslezského kraje: Lidé, podnikání, prostředí* [online]. 1. Česká republika: Moravskoslezský kraj. ISBN 978-80-270-9454-7. Dostupné z: <https://geoportal.msk.cz/Public/Apps/atlasmsk/tematicky-atlas-msk.pdf>

NORRIS, Gary, Rachelle DUVALL, Steve BROWN a Song BAI, 2014. *Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide* [online]. duben 2014. B.m.: United States Environmental Protection Agency. Dostupné z: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf

PAVLÍKOVÁ, Irena, Daniel HLADKÝ, Oldřich MOTYKA, Konstantin N. VERGEL, Ludmila P. STRELKOVA a Margarita S. SHVETSOVA, 2020. Characterization of PM₁₀ Sampled on the Top of a Former Mining Tower by the High-Volume Wind Direction-Dependent Sampler Using INNA. *Atmosphere* [online]. **12**(1), 29. ISSN 2073-4433. Dostupné z: [doi:10.3390/atmos12010029](https://doi.org/10.3390/atmos12010029)

PAVLOV, Sergey, Andrey DMITRIEV a Marina FRONTASYEVA, 2016. Automation system for neutron activation analysis at the reactor IBR-2, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia. *Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry* [online]. **309**(1), 27–38. ISSN 02365731. Dostupné z: [doi:10.1007/s10967-016-4864-8](https://doi.org/10.1007/s10967-016-4864-8)

PERNIGOTTI, Denise, Claudio A. BELIS a Luca SPANÒ, 2016. SPECIEUROPE: The European data base for PM source profiles. *Atmospheric Pollution Research* [online]. **7**(2), 307–314. ISSN 13091042. Dostupné z: [doi:10.1016/j.apr.2015.10.007](https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.007)

PINTO, J.P., R.K. STEVENS, R. D. WILLIS, R. KELLOGG, Y. MAMANE, J. NOVAK, J. ŠANTROCH, I. BENEŠ, J. LENICEK a V. BUREŠ, 1998. Czech air quality monitoring and receptor modeling study. *Environmental Science & Technology*. **32**(7), 843. ISSN 0013936X.

POKORNÁ, P., J. HOVORKA, M. KLÁN a P. K. HOPKE, 2015. Source apportionment of size resolved particulate matter at a European air pollution hot spot. *The Science of the Total Environment* [online]. **502**, 172–183. ISSN 1879-1026. Dostupné z: [doi:10.1016/j.scitotenv.2014.09.021](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.021)

R STUDIO, 2020. *Package 'ggplot2'* [online]. 06 2020. Dostupné z: <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/ggplot2.pdf>

RAMME, Bruce W. a Mathew P. THARANIYIL, 2013. *Coal Combustion Products Utilization Handbook* [online]. 3rd Edition. Milwaukee, United States of America: We Energies. Dostupné z: https://www.we-energies.com/environmental/ccp_handbook.pdf

RITZ, Michal, Lucie BARTOŇOVÁ a Zdeněk KLIKA, 2003. EMISSIONS OF HEAVY METALS AND POLYAROMATIC HYDROCARBONS DURING COAL COMBUSTION IN INDUSTRIAL AND SMALL SCALE FURNACES (EMISE TĚŽKÝCH KOVŮ A POLYAROMATICKÝCH UHLOVODÍKŮ PŘI SPALOVÁNÍ UHLÍ V PRŮMYSLÝCH A MALÝCH TOPENÍŠTÍCH). *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava*. **2003**(1), Řada hornicko-geologická, 69–82. ISSN 0474-8476.

ROBL, Thomas L., Anne OBERLINK a Rod JONES, ed., 2017. *Coal combustion products (CCPs): characteristics, utilization and beneficiation*. Duxford, United Kingdom ; Cambridge, Massachusetts: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier. Woodhead series in energy. ISBN 978-0-08-100945-1.

ROLPH, Glenn, Ariel STEIN a Barbara STUNDER, 2017. Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling & Software* [online]. **95**, 210–228. ISSN 13648152. Dostupné z: doi:10.1016/j.envsoft.2017.06.025

ROMER, Eugeniusz, 1949. *Regiony Klimatyczne Polski. [With Maps.]*. [online]. Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego. ser. B. no. 16. Dostupné z: <https://books.google.ru/books?id=m6MazQEACAAJ>

SAMARA, C, Th KOUIMTZIS, R TSITOURIDOU, G KANIAS a V SIMEONOV, 2003. Chemical mass balance source apportionment of PM10 in an industrialized urban area of Northern Greece. *Atmospheric Environment* [online]. **37**(1), 41–54. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/S1352-2310(02)00772-0

SAMMON, J.W., 1969. A Nonlinear Mapping for Data Structure Analysis. *IEEE Transactions on Computers* [online]. **C-18**(5), 401–409. ISSN 0018-9340. Dostupné z: doi:10.1109/T-C.1969.222678

SEIBERT, Radim, Irina NIKOLOVA, Vladimíra VOLNÁ, Blanka KREJČÍ a Daniel HLADKÝ, 2020. Air Pollution Sources' Contribution to PM2.5 Concentration in the Northeastern Part of the Czech Republic. *Atmosphere* [online]. **11**(5), 522. Dostupné z: doi:10.3390/atmos11050522

SIMON, Heather, Lee BECK, Prakash V. BHAVE, Frank DIVITA, Ying HSU, Deborah LUECKEN, J. David MOBLEY, George A. POULIOT, Adam REFF, Golam SARWAR a Madeleine STRUM, 2010. The development and uses of EPA's SPECIATE database. *Atmospheric Pollution Research* [online]. **1**(4), 196–206. ISSN 1309-1042. Dostupné z: doi:10.5094/APR.2010.026

STEIN, A. F., R. R. DRAXLER, G. D. ROLPH, B. J. B. STUNDER, M. D. COHEN a F. NGAN, 2015. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. **96**(12), 2059–2077. ISSN 0003-0007, 1520-0477. Dostupné z: doi:10.1175/BAMS-D-14-00110.1

STULL, Roland B., 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. B.m.: Springer Science & Business Media. ISBN 978-90-277-2768-8.

SYLVESTRE, Alexandre, Aurélie MIZZI, Sébastien MATHIOT, Fanny MASSON, Jean L. JAFFREZO, Julien DRON, Boualem MESBAH, Henri WORTHAM a Nicolas MARCHAND, 2017. Comprehensive chemical characterization of industrial PM2.5 from steel industry activities. *Atmospheric Environment* [online]. **152**, 180–190. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2016.12.032

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999. *Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air: SAMPLING OF AMBIENT AIR FOR TOTAL SUSPENDED PARTICULATE MATTER (SPM) AND PM10 USING HIGH VOLUME (HV)*

SAMPLER [online]. červen 1999. B.m.: United States Environmental Protection Agency. Dostupné z: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/epa-io-2.1.pdf>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, OFFICE OF AIR AND RADIATION, a OFFICE OF AIR QUALITY PLANNING AND STANDARDS, 2000. *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications* [online]. únor 2000. B.m.: UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/scram001/guidance/met/mmgrma.pdf>

VOLNÁ, Vladimíra a Daniel HLADKÝ, 2020. Detailed Assessment of the Effects of Meteorological Conditions on PM10 Concentrations in the Northeastern Part of the Czech Republic. *Atmosphere* [online]. **11**(5), 497. ISSN 2073-4433. Dostupné z: doi:10.3390/atmos11050497

WANG, Jinxi, Zhen YANG, Shenjun QIN, Balaji PANCHAL, Yuzhuang SUN a Hongya NIU, 2019. Distribution characteristics and migration patterns of hazardous trace elements in coal combustion products of power plants. *Fuel* [online]. **258**, 116062. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2019.116062

WORLD HEALTH ORGANIZATION, ed., 2006. *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide* [online]. Copenhagen, Denmark: World Health Organization. ISBN 978-92-890-2192-0. Dostupné z: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2013. *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project Technical Report* [online]. REVIHAAP Project: Technical Report. Copenhagen, Denmark: World Health Organization. Dostupné z: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2016. *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease* [online]. Geneva, Switzerland: World Health Organization. ISBN 978-92-4-151135-3. Dostupné z: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1>

YATKIN, Sinan a Abdurrahman BAYRAM, 2008. Determination of major natural and anthropogenic source profiles for particulate matter and trace elements in Izmir, Turkey. *Chemosphere* [online]. **71**(4), 685–696. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2007.10.070