

Identifikace příčin znečištění ovzduší oxidem siřičitým v Českém Těšíně

Zpráva v rámci dílčího cíle 2.1 Zlepšení identifikace zdrojů znečištění

V období od 24. 10. 2023 do 15. 1. 2024 byla v Českém Těšíně a v Třinci provedena imisní měření pro určení příčiny občasné zvýšených koncentrací oxidu siřičitého. Naměřené údaje byly zpracovány v rámci imisně-meteorologického hodnocení, při kterém byla testována použitelnost nových metod měření a využití dat.

Projekt: SS02030031: Integrovaný systém výzkumu, hodnocení a kontroly kvality ovzduší
Autoři: Radim Seibert, Vladimíra Volná, Daniel Hladký, Blanka Krejčí
Datum: 15. 2. 2024

Obsah

1. Úvod	5
2. Hodnocená oblast a měřicí lokality	6
3. Rozsah a metodika prací.....	8
4. Výsledky.....	10
4.1. Korelace SO ₂ s ostatními měřenými znečišťujícími látkami	11
4.2. Souvislost SO ₂ se znečišťujícími látkami a směrem větru.....	12
4.2.1. Souvislost s plynnými polutanty.....	12
4.2.2. Souvislost s uhlíkatými částicemi	14
4.3. Špičkové koncentrace SO ₂ ve vztahu k rychlosti a směru větru.....	17
4.3.1. Časové řady	17
4.3.2. Směrová analýza.....	19
4.3.3. Zpětné trajektorie proudění	21
5. Závěr	24

Seznam obrázků

Obr. 1	Měsíční počet případů s průměrnou hodinovou koncentrací SO ₂ v lokalitě Český Těšín (TCTN) nad 50 μg.m ⁻³	5
Obr. 2	Umístění lokalit.....	6
Obr. 3	Korelační matice	11
Obr. 4	Rozptylový graf SO ₂ a NO (vlevo), resp. SO ₂ a NO ₂ (vpravo).....	12
Obr. 5	Rozptylový graf SO ₂ a CO.....	13
Obr. 6	Rozptylový graf SO ₂ a benzenu	13
Obr. 7	Rozptylový graf SO ₂ a ΔC	14
Obr. 8	Rozptylový graf SO ₂ a černého uhlíku ze spalování biomasy	15
Obr. 9	Rozptylový graf ΔC a BC ve vztahu k vysokým koncentracím SO ₂	16
Obr. 10	Rozptylový graf ΔC a BC ve vztahu ke směru větru	17
Obr. 11	Časové řady koncentrace SO ₂ s rozlišením směru větru.....	18
Obr. 12	Grafy funkce CPF	19
Obr. 13	Polární grafy hodinových koncentrací SO ₂ , 24. 10.2023 – 15. 1. 2024.....	20
Obr. 14	Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO ₂ , Karviná, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024.....	21
Obr. 15	Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO ₂ , Český Těšín, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024.....	22
Obr. 16	Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO ₂ , Český Těšín, ul. Pod Zvonek, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024	22
Obr. 17	Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO ₂ , Třinec-Kanada, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024.....	23
Obr. 18	Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO ₂ , Třinec-Kosmos, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024.....	23

Seznam tabulek

Tab. 1	Měřené znečišťující látky, metody měření, meze detekce, nejistoty měření	9
Tab. 2	Hodinové průměry koncentrace SO ₂ [μg.m ⁻³]	10
Tab. 3	Hodinové průměry koncentrace měřených polutantů v lokalitě Český Těšín, ul. Pod Zvonek [μg.m ⁻³]	10
Tab. 4	Koncentrace SO ₂ v závislosti na směru větru (koncentrace v μg.m ⁻³), 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024	20

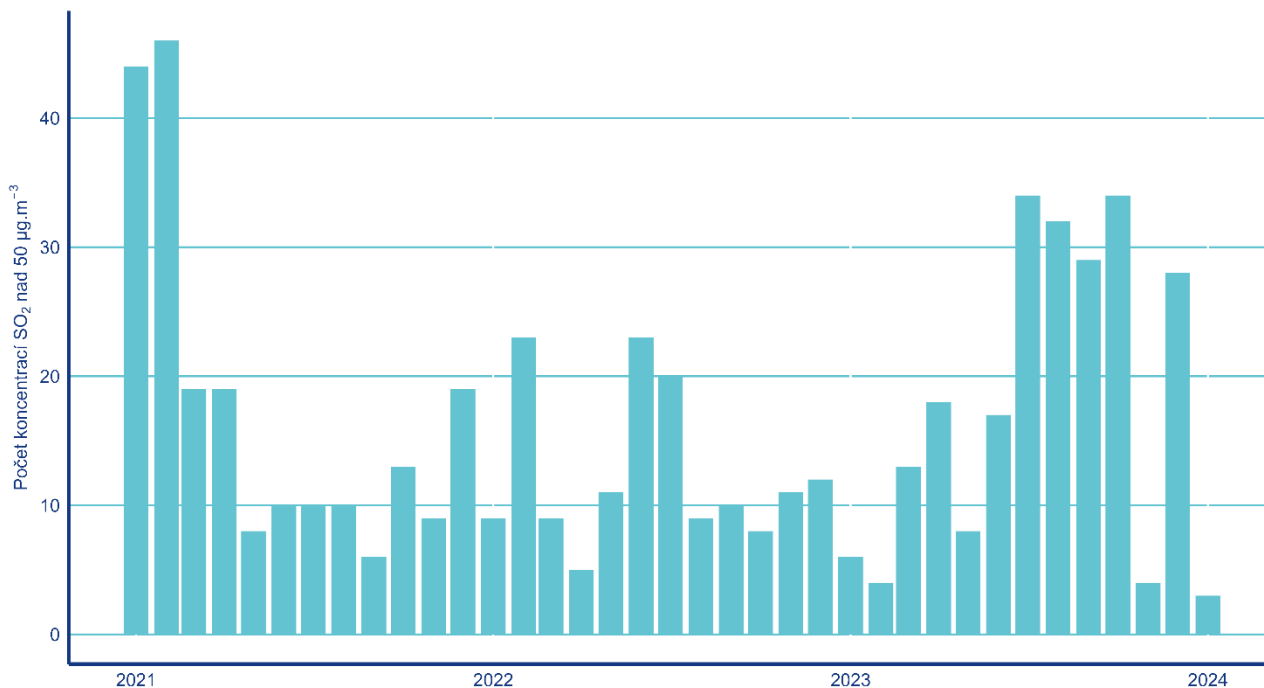
Seznam zkratek

I–XII	měsíce v roce (leden–prosinec)
BC	černý uhlík (black carbon)
CPF	Conditional Probability Function
ΔC	Delta C - rozdíl koncentrace naměřené v 1. a 6. kanálu Aethalometru AE33 (BC1 – BC6); tj. hnědý uhlík po odečtení černého uhlíku
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
PM ₁₀ /PM _{2,5}	suspendované částice frakce PM ₁₀ /PM _{2,5}
SSIM	Státní síť imisního monitoringu
UTC	světový čas (SEČ – 1hod)

1. Úvod

V rámci projektu ARAMIS¹, dílčího cíle 2.1, byla provedena identifikace zdrojů znečišťování ovzduší, s cílem odhalit příčinu občasné krátkodobě zvýšených koncentrací SO₂, zjištěných v uplynulém období měření v lokalitě Státní sítě imisního monitoringu Český Těšín (TCTN).

Po zlepšení v první polovině roku 2021 se v průběhu roku 2023 v uvedené lokalitě projevil opětovný nárůst počtu krátkodobých koncentračních špiček SO₂. Situaci dokumentuje Obr. 1, znázorňující počet případů, kdy průměrné hodinové koncentrace SO₂ přesáhly 50 µg.m⁻³.



Obr. 1 Měsíční počet případů s průměrnou hodinovou koncentrací SO₂ v lokalitě Český Těšín (TCTN) nad 50 µg.m⁻³.

Ve snaze nadále zlepšovat imisní situaci SO₂ byly využity zdroje projektu ARAMIS pro identifikaci příčiny výše uvedeného problému s využitím nových postupů, vhodných k otestování na reálném imisním problému. Jednalo se zejména o propracovanější statistické zpracování naměřených dat několika nezávislými metodami. Porovnání jejich výsledků umožnilo posoudit jejich vypovídací hodnotu a praktická omezení pro další použití. Kromě standardně měřených plyných polutantů bylo přístrojové vybavení měřicího vozu doplněno o Aethalometer AE33 k měření černého uhlíku (BC) k otestování, zda výsledky mohou přispět k přesnější nebo spolehlivější identifikaci původu SO₂ v hodnocené lokalitě. K identifikaci příčin znečištění bylo měření černého uhlíku kombinované s měřeními plyných polutantů a suspendovaných částic využito v rámci ČHMÚ poprvé.

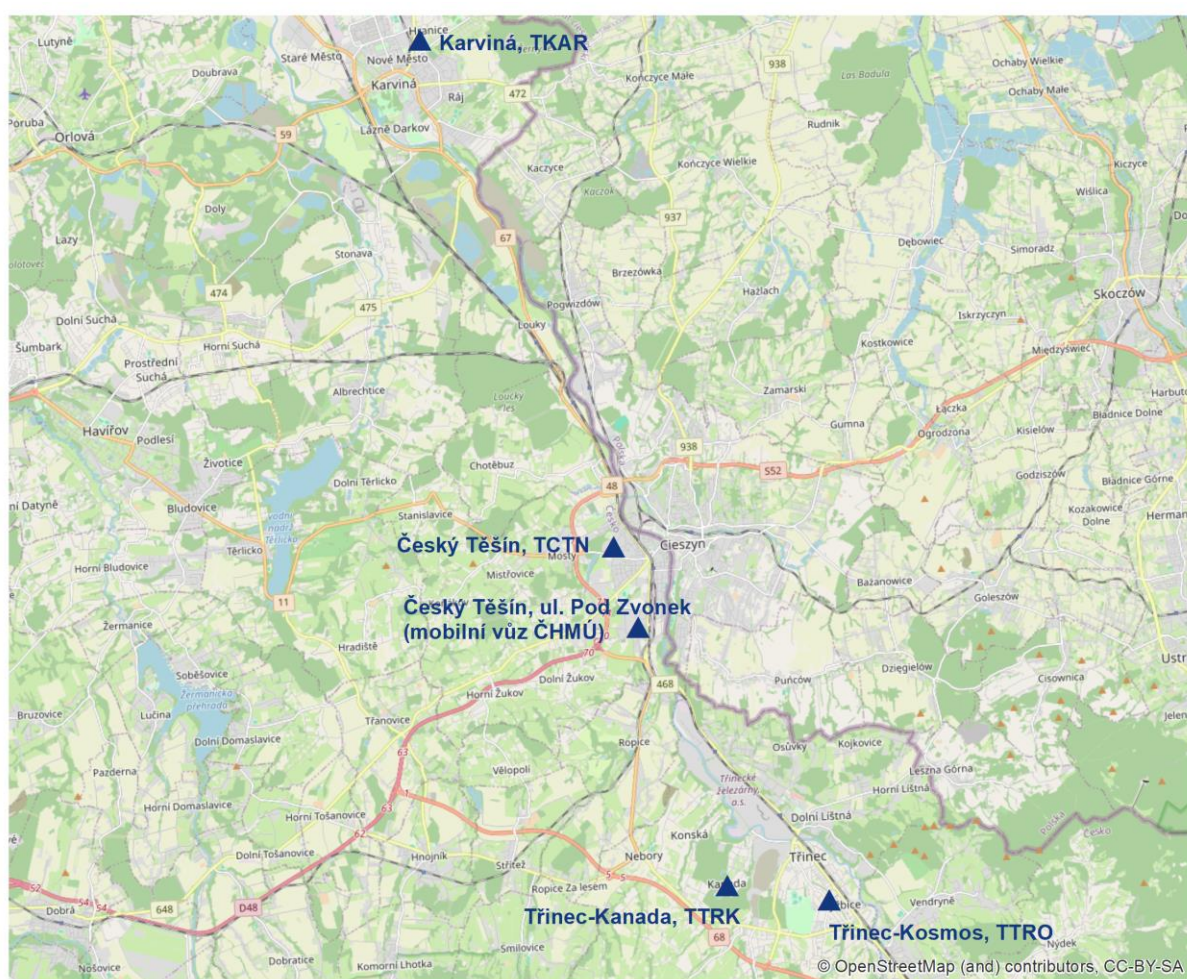
Na řešení projektových prací prezentovaných v předkládané zprávě se na straně ČHMÚ podíleli:

- Pavel Smolík, František Kuchryk – montáž, obsluha a údržba přístrojové techniky, technické konzultace k vyhodnocení,
- Vladimíra Volná, Daniel Hladký, Radim Seibert, Blanka Krejčí – imisně-meteorologické hodnocení.

¹ www.projekt-aramis.cz/

2. Hodnocená oblast a měřicí lokality

Hodnocená oblast zahrnovala území v okolí stanice Český Těšín, ve kterém se předpokládal možný vliv a lokalizace potenciálního zdroje špičkových koncentrací SO_2 . Území zahrnovalo několik kilometrů široký pás orientovaný podél údolí řeky Olše od města Karviná přes Český Těšín po město Třinec. Pro vyhodnocení byla využita data o koncentracích plyných znečišťujících látek (SO_2 , CO , NO , NO_2) a suspendovaných částic (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$) naměřená automatickými analyzátory umístěnými ve stávajících lokalitách Státní sítě imisního monitoringu (SSIM) Karviná (TKAV), Český Těšín (TCTN), Třinec-Kosmos (TTRO) a Třinec-Kanada (TTRK). V posuzovaném období od 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024 byl tento monitoring doplněn měřícím vozem, vybaveným automatickými analyzátory pro měření výše uvedených polutantů a černého uhlíku. Měřicí vůz byl umístěn v areálu školy v Českém Těšíně, na ulici Pod Zvonek (Obr. 2).



Obr. 2 Umístění měřicích lokalit

Bližší popis lokalit měření zahrnutých do zpracování (seřazeny dle umístění od severu k jihu):

Karviná (TKAV)

Stanice SSIM Karviná² (49.863796N, 18.551453E) je klasifikována jako průmyslová s reprezentativností okrskové měřítka (0,5 až 4 km). Stanice se nachází na pozemku školy a je lemována významnými liniovými zdroji. Na všechny světové strany do vzdálenosti 500 m od stanice je vybudovaná panelová zástavba. Česko-polská hranice se nachází přibližně 2 km na východ a 4 km na sever od stanice. V posledních letech, včetně první poloviny roku 2023, probíhaly v nejbližším okolí stanice intenzivní stavební práce spojené se stavbou a rekonstrukcí městského bazénu. Z tohoto důvodu byla původní stanice TKAR³ překlasifikována na TKAV².

Český Těšín (TCTN)

Stanice SSIM Český Těšín⁴ (49.7308211N, 18.6167814E) je klasifikována jako pozad'ová – městská s reprezentativností okrskové měřítka (0,5 až 4 km). Stanice je umístěna v sídlištní zástavbě města Český Těšín, v areálu školy, v západní části města. Nejbližší místo hranice s Polskem se nachází ve vzdálenosti asi 600 m SV směrem od stanice. Nejbližší zástavba s individuálním vytápěním se nachází zhruba ve vzdálenosti 450 m S, SZ a J směrem od stanice na území ČR. Daleko hustší zástavba s individuálním vytápěním se nachází v celém V sektoru (SV až JV) od stanice na polské straně hranice, zhruba ve vzdálenostech 1,5 až 2 km (a dál). Frekventované silnice se od stanice nachází jižním směrem ve vzdálenosti asi 180 m a západním směrem asi 900 m. Areál Třineckých železáren, a. s. leží ve vzdálenosti asi 5 km JJV směrem od stanice.

Český Těšín, ul. Pod Zvonek

Lokalita Český Těšín, ul. Pod Zvonek nespadá do SSIM. Byl zde umístěn mobilní měřicí vůz ČHMÚ (49.7308211N, 18.6167814E). Lokalita byla vybrána tak, aby se nacházela v ose spojnice mezi průmyslovým areálem v Třinci a stanicí Český Těšín (TCTN), která zároveň kopíruje směr převládajícího proudění ovlivněný polohou Jablunkovské brázdy a údolím řeky Olše. Mobilní vůz byl umístěn u krytého bazénu a Základní školy v blízkosti ulice Pod Zvonek. V severním sektoru směrem od stanice převládá zástavba sídlištního typu, v jižním sektoru ve směru od stanice převládá zástavba rodinných domů. JJV směrem od lokality se ve vzdálenosti necelých 2,5 km nachází nejsevernější část průmyslového areálu Třineckých železáren, a. s., východním směrem ve vzdálenosti cca 700 m hranice s Polskem, lemuující řeku Olši.

Třinec-Kanada (TTRK)

Stanice SSIM Třinec-Kanada⁵ (49.672379N, 18.643037E) je klasifikována jako pozad'ová – předměstská s reprezentativností okrskové měřítka (0,5 až 4 km). Stanice je umístěna téměř na okraji Třince, v západní části města a leží v blízkosti areálu střední odborné školy a zástavby s individuálním vytápěním, která je soustředěna převážně v S až V sektoru směrem od stanice v jeho bezprostřední blízkosti. JZ směrem od stanice se nachází ve vzdálenosti asi 1 km frekventovaná silnice č. 11; ve stejném směru od stanice se nachází ve vzdálenosti cca 700 m zástavba s lokálním vytápěním. Hlavní zdroje průmyslového podniku Třinecké železářny a. s. se nachází směrem S a SSV od stanice ve vzdálenosti asi 1,5 km. Ve V sektoru od stanice ve vzdálenosti asi 700 m se

² www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/loc_TKAV_CZ.html

³ www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/loc_TKAR_CZ.html

⁴ www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/loc_TCTN_CZ.html

⁵ www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/loc_TTRK_CZ.html

nachází rozsáhlý plošný zdroj Třineckých železáren, a. s.. Významným zdrojem minerální prašnosti v okolí je rozsáhlý hutní odval situovaný cca 600 m až 1 km jihovýchodně až severovýchodně od lokality.

Třinec-Kosmos (TTRK)

Stanice SSIM Třinec-Kosmos⁶ (49.668114N, 18.677799E) je klasifikována jako pozad'ová – městská s reprezentativností okrskové měřítka (0,5 až 4 km). Stanice je umístěna v centru města Třinec, v sídlištní zástavbě. Západním až jihozápadním směrem od stanice se ve vzdálenosti asi 30 m nachází komunikace sídlištního typu, jižním až jihovýchodním směrem od stanice leží parkoviště ve vzdálenosti asi 20 m od stanice. Areál průmyslového podniku Třinecké železářny a. s. se nachází v SZ sektoru směrem od stanice ve vzdálenosti asi 1,5 km. Nejbližší zástavba s individuálním vytápěním leží S až SV směrem od stanice ve vzdálenosti asi 500 m, další ve vzdálenosti asi 1 km JJZ až JV směrem od stanice. Nejbližší hraniční místo s Polskem se nachází SV směrem od stanice ve vzdálenosti asi 3 km.

3. Rozsah a metodika prací

Imisní měření probíhalo ve výše popsanych lokalitách od 24. 10. 2023 do 15. 1. 2024. V lokalitě Třinec-Kanada (TTRK) byla z technických důvodů zajištěna validní data pouze pro období 29. 11. 2023 – 13. 12. 2023. Měřicí kampaň byla navržena tak, aby umožňovala rozlišit zdroj nárazově zvýšených koncentrací SO₂ od jiných zdrojů znečišťování, aktivních v měřeném období. Hypotetické spektrum možných zdrojů SO₂ bylo následující:

- koksárenská výroba
- jiný průmyslový spalovací nebo technologický zdroj
- vytápění domácností uhlím

Aby bylo možné rozlišit emise z výše uvedených zdrojů, souběžně s měřením SO₂ probíhalo také měření NO, NO₂, CO, benzenu, PM₁₀ a PM_{2,5} a černého uhlíku. NO_x a CO byly do monitoringu zařazeny pro identifikaci zdroje předmětných špičkových koncentrací SO₂ podle kvality případného spalovacího procesu (podíl CO/SO₂, NO/NO₂), benzen sloužil jako marker koksárenských emisí a PM pro posouzení, zda jde o dobře řízený spalovací proces (nízký podíl PM/SO₂) nebo spíše technologický zdroj (SO₂ doprovázený suspendovanými částicemi). Měření černého uhlíku bylo využito pro posouzení, zda mají špičkové imisní koncentrace SO₂ spojitost se zdroji uhlíkatých částic, zejména vytápěním domácností.

Měřené znečišťující látky, přístroje a metody měření, včetně mezi detekce a nejistot měření [1] jsou uvedeny v Tab. 1.

⁶ www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/loc_TTRO_CZ.html

Tab. 1 Měřené znečišťující látky, metody měření, meze detekce, nejistoty měření

Znečišťující látka	Metoda měření	Mez detekce [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Rozšířená nejistota abs. [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Rozšířená nejistota rel. [%]
Oxid siřičitý (SO_2)	Teledyne API T100 / UV fluorescence	2.5	3.2	9.9
Oxidy dusíku (NO_x)	Teledyne API T200 / UV fluorescence	1.0	2.3	12.3
Oxid dusičitý (NO_2)	Teledyne API T200 / UV fluorescence	2.0	2.8	14.7
Oxid dusnatý (NO)	Teledyne API T200 / UV fluorescence	2.0	1.5	8.1
Oxid uhelnatý (CO)	Teledyne API T300 / IR korelační spektrometrie	100	41	8.4
Suspendované částice $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10}	ESA-MP101M / radiometrie	2.0	-	17
Suspendované částice $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10}	PALAS – FIDAS 200 / optoelektronická metoda	2.0	-	14
Benzen	Syntech Spectras 955 / plynová chromatografie	0.2	0.2	25

Aethalometer AE33 je 7kanálový přístroj (kanály označené BC1 až BC7) pro měření koncentrace uhlíkatých částic na principu absorpce záření, převážně ve viditelné části spektra. Mez detekce je stanovena na $0,060\text{--}0,064 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v pásmech 370 nm a 950 nm (kanály BC7 a BC1). Relativní nejistota je 8,5 % pro hodinový a 7,5 % pro 12hodinový měřicí interval [2–3]. Kanál BC1 reprezentuje blízkou ultrafialovou, kanál BC7 naopak blízkou infračervenou oblast. Částice tvořené černým uhlíkem (typicky saze) bez příměsi uhlovodíků pohlcují všechny vlnové délky stejně. Tento „čistý black carbon“ je podle celosvětové praxe reprezentován kanálem BC6. Naproti tomu částice obsahující organické sloučeniny mají výrazně vyšší absorpci v opačné, ultrafialové části spektra (kanál BC1). Těto skutečnosti se využívá pro rozlišení různých druhů uhlíkatých částic, a tedy jejich původu. Často se využívá parametru označovaného jako ΔC , což je rozdíl koncentrací kanálů BC1-BC6. Rozdílné absorpce světla v různých vlnových pásmech využívá i algoritmus pro výpočet podílu uhlíkatých částic ze spalování biomasy, implementovaný výrobcem přímo do přístroje [4]. Součástí měřených hodnot je tak i parametr označovaný jako BB (biomass burning), který udává vypočtený podíl černého uhlíku ze spalování biomasy v procentech. Předpokládá se přitom, že celá zbývající část černého uhlíku pochází ze spalování fosilních paliv. Ačkoliv se jedná o určité zjednodušení, pro většinu praktických aplikací bez vysokých požadavků na přesnost je tento přístup plně vyhovující.

Výše uvedené spektrum analytů sloužilo pro rozlišení zdrojů podle kvalitativního složení znečištění. Pro odhad zdrojové oblasti znečištění SO_2 bylo součástí monitoringu také měření směru a rychlosti větru. Pro vyšší vypovídací hodnotu hodnocení, zejména určení přibližné polohy hlavního zdroje SO_2 , bylo do monitoringu zahrnuto celkem 5 měřicích míst. Stěžejní byla lokalita v areálu Základní školy na ulici Pod Zvonek v Českém Těšíně, ve které byl provozován mobilní měřicí vůz ČHMÚ s měřením kompletního výše uvedeného spektra měřených parametrů. Další čtyři měřicí místa byla zvolena v lokalitách výše popsaných stanic, kterými byly pro účely hodnocení monitorovány směr a rychlost větru a oxid siřičitý.

K výpočtu zpětných trajektorií větru byla využita interní aplikace ČHMÚ [5], která je pro řešení lokálních problémů vhodnější než celosvětově využívané modely, např. HYSPLIT. Výpočet zpětných trajektorií vychází z dat klimatologické databáze ČHMÚ CLIDATA doplněných údaji o směru a rychlosti větru z měření na stanicích kvality ovzduší v zájmovém území (Český Těšín a Třinec). Standardní výška měření směru a

rychlosti větru na pozemních stanicích je 10 m nad zemským povrchem. Hodinová data směru a rychlosti větru jsou dále interpolována do plochy ČR a z nich jsou vypočteny trajektorie proudění pro zvolené body (souřadnice zájmových lokalit) pro časový úsek 6 hodin.

Naměřená data byla zpracována standardními statistickými postupy v prostředí RStudio software.

4. Výsledky

Základní statistiky průměrných hodinových koncentrací SO₂ za dobu měřicí kampaně dokumentuje Tab. 2.

Tab. 2 Hodinové průměry koncentrace SO₂ [μg.m⁻³]

Stanice	Medián	Průměr	Q ₉₅	Q ₉₈	Maximum
Český Těšín (TCTN)	6.3	10.7	35	54	102
Český Těšín, ul. Pod Zvonek	5.0	10.7	43	58	139
Karviná (TKAV)	5.3	7.4	19	27	106
Třinec-Kanada (TTRK)	3.7	7.0	20	29	159
Třinec-Kosmos (TTRO)	2.7	4.1	13	21	39

Q₉₅, Q₉₈ ... 95. a 98. percentil

Jak je zřejmé z Tab. 2, průměrná úroveň znečištění SO₂ v době měřicí kampaně byla nízká. Nebylo zjištěno překročení hodinového ani denního imisního limitu a nebylo indikováno ani možné překročení imisního limitu pro rok a zimní období (1. 10. – 31. 3.). Při porovnání mediánu a průměru je zřejmá asymetrie statistického rozdělení, způsobená koncentračními špičkami, nejvíce v lokalitě Český Těšín, ul. Pod Zvonek, Třinec-Kanada (TTRK) a Český Těšín (TCTN). Tuto extremitu dokládají i uvedené vysoké percentily vůči středním hodnotám v československých lokalitách, způsobené časově krátkými, občasné silně zvýšenými koncentracemi oproti průměrným hodnotám.

Statistiky ostatních měřených látek jsou shrnuty v Tab. 3.

Tab. 3 Hodinové průměry koncentrace měřených polutantů v lokalitě Český Těšín, ul. Pod Zvonek [μg.m⁻³]

Polutant	Medián	Průměr	Q ₉₅	Q ₉₈	Maximum
CO	262	414	1183	1617	2510
NO	1.3	5.0	24	37	136
NO ₂	13	18	46	54	73
benzen	1.1	1.6	4.9	6.5	8.5
PM _{2.5}	10	19	76	110	188
PM ₁₀	12	22	82	117	199
BC	1.0	2.0	7.3	9.7	17.8
ΔC	0.65	1.2	4.6	6.8	11.4

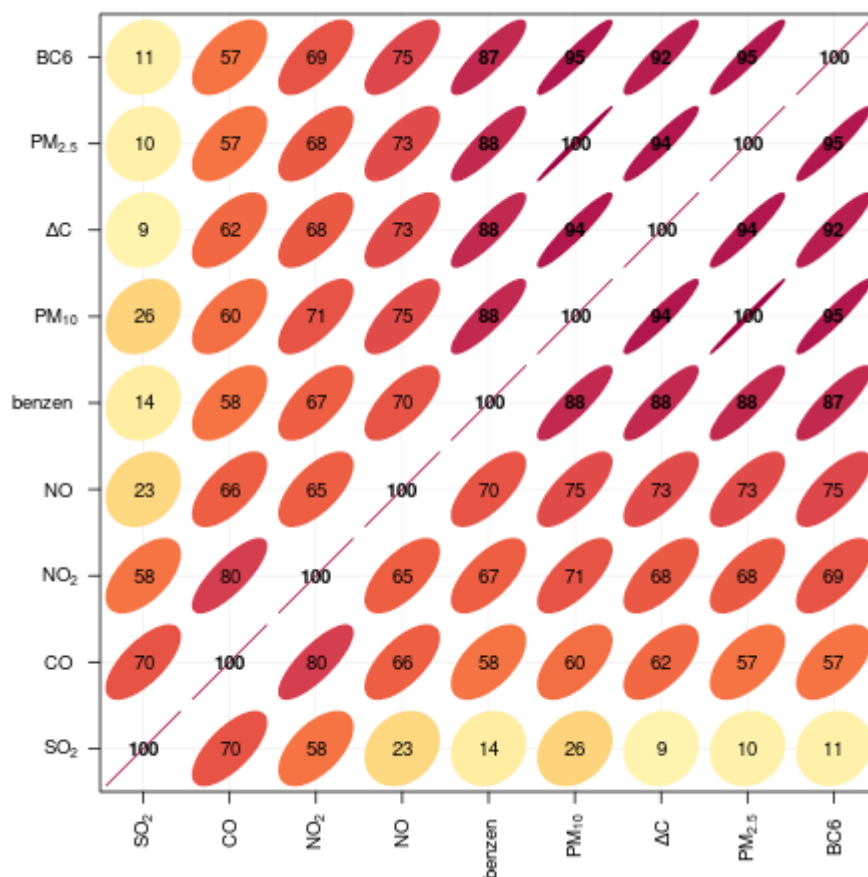
Q₉₅, Q₉₈: 95. a 98. percentil; BC: černý uhlík (black carbon); ΔC: hnědý uhlík (brown carbon) po odečtení černého uhlíku

Střední koncentrace všech měřených látek v kontextu zimního období a hodnocené oblasti nevybočovaly z běžných hodnot. Významná byla ale jejich kolísavost, nejvyšší u oxidu dusnatého a suspendovaných částic,

včetně černého a hnědého uhlíku. V případě NO mohlo jít o důsledek silně lokálního charakteru těchto emisí (místní vytápění budov zemním plynem), v případě PM stály za vysokými hodnotami a jimi vyvolanou kolísavostí pravděpodobně dvě smogové situace, které nastaly v období kampaňového měření (7.–8. 12. 2023 a 9.–11. 1. 2024).

4.1. Korelace SO₂ s ostatními měřenými znečišťujícími látkami

Základní představu o vzájemném vztahu jednotlivých měřených látek umožňuje korelační matice v Obr. 3, sestavená z Pearsonových korelačních koeficientů.



Obr. 3 Korelační matice

Nejtěsnější vzájemný vztah mají podle očekávání koncentrace uhlíkatých částic měřené aethalometrem AE33 a suspendované částice. Je zřejmé, že koncentrace uhlíkatých částic vůbec nesouvisely s koncentracemi SO₂ (korelační koeficienty 0,09, resp. 0,11). To indikuje, že mají odlišný původ. Významná korelace SO₂ nebyla zjištěna ani v případě NO_x (slabá pouze u NO₂, vyjádřená korelačním koeficientem 0,58). Statisticky významnou souvislost měly koncentrace SO₂ s koncentracemi CO (koeficient 0,70).

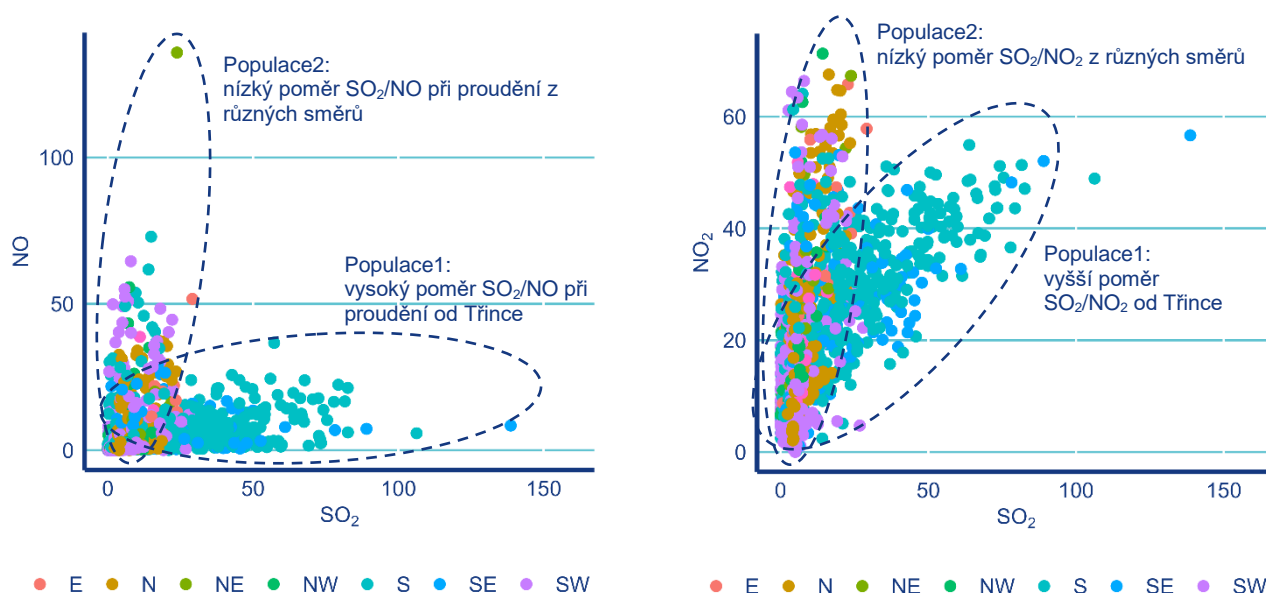
Uvedené souvislosti indikují, že znečištění SO₂ nepocházelo z čistě spalovacího procesu (u průmyslového spalování uhlí lze očekávat doprovod NO_x, u vytápění domácností navíc také PM a uhlíkaté částice). V případě původu SO₂ při výrobě koxu by bylo možno očekávat spojitost SO₂ a benzenu, kterou ale měření nepotvrdilo (koeficient $r=0,14$). Souběh SO₂ a CO bez korelace s dalšími plyny typickými pro spalovací procesy, by mohl indikovat výrobu surového železa (vysoké pece).

4.2. Souvislost SO₂ se znečišťujícími látkami a směrem větru

4.2.1. Souvislost s plynnými polutanty

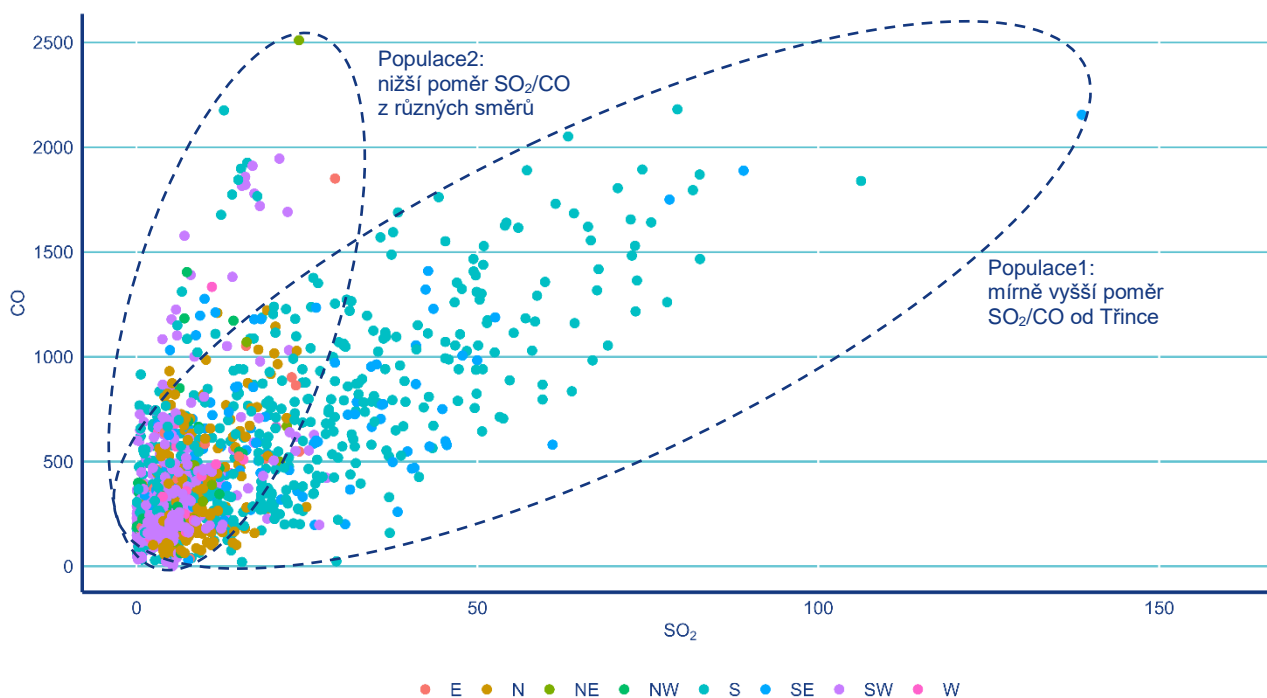
Rozptylové diagramy hodinových koncentrací SO₂ vůči NO_x v lokalitě Český Těšín, ul. Pod Zvonek (viz Obr. 4), zřetelně ukazují dvě populace hodnot. Dominantní většina vysokých koncentrací SO₂, přinášejících do Českého Těšína od jihu a jihovýchodu, tedy od Třince, podle těchto grafů nezávisí na NO (koncentrace NO z těchto směrů jsou relativně velmi nízké, většinou do 25 μg.m⁻³). Proudění z jiných směrů přináší spolu s nižšími koncentracemi SO₂ podstatně vyšší koncentrace NO, tedy čerstvé znečištění (pravděpodobně lokální emise z vytápění nebo dopravy).

Rozptylové grafy ukazují, že při jižním a jihovýchodním proudění je SO₂ doprovázen NO₂, ale s výrazně vyšším podílem SO₂/NO₂ oproti jiným směrům. Populace s nízkým poměrem SO₂/NO₂ souvisí pravděpodobně s vytápěním domácností uhlím v okolí, která je umístěna prakticky všemi směry od měřicího místa, zatímco vysokým poměrem SO₂/NO₂ se vyznačuje znečištění transportované údolím Olše od Třince.



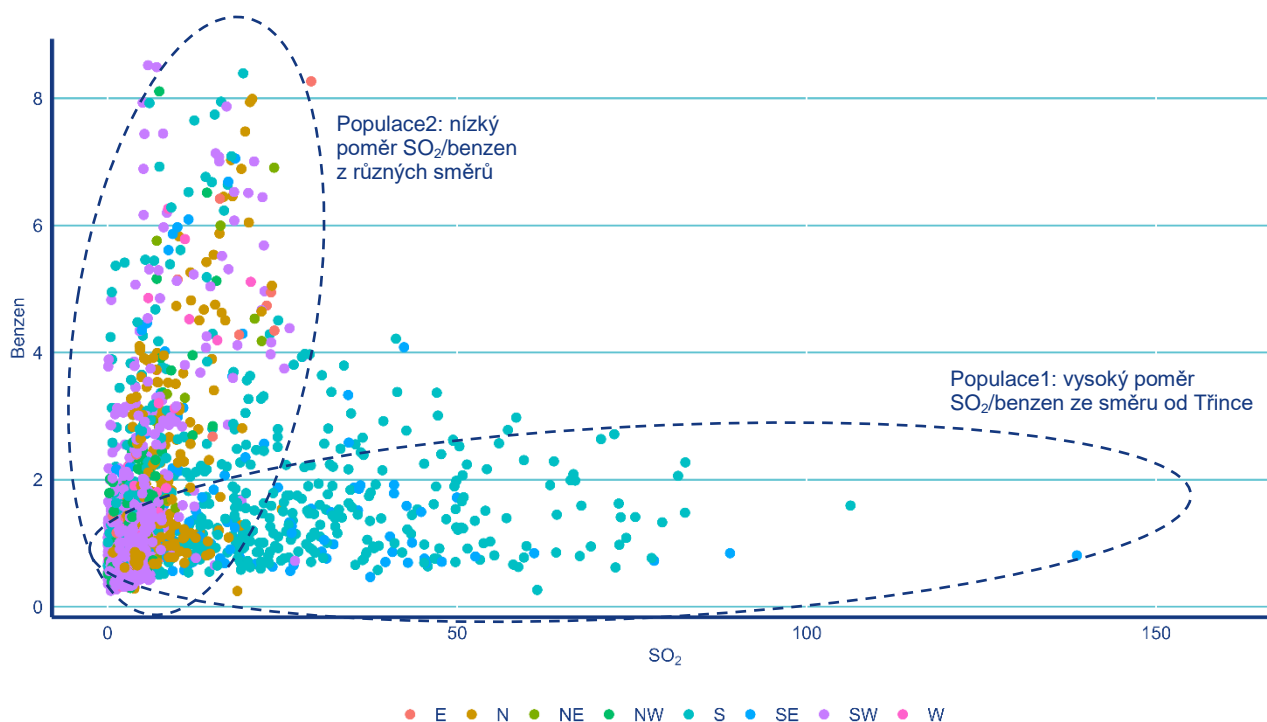
Obr. 4 Rozptylový graf SO₂ a NO (vlevo), resp. SO₂ a NO₂ (vpravo)

Zvýšené koncentrace SO₂ jsou doprovázeny také zvýšenými koncentracemi CO, jak ukazuje Obr. 5. Podobně jako v případě NO₂ platí, že znečištění přenášené od Třince má nejvyšší poměr SO₂/CO, směrový rozdíl ale není tak výrazný jako u NO₂. Spojitost znečištění SO₂ a CO podtrhuje také fakt, že při nejvyšších koncentracích SO₂ byly zaznamenány také nejvyšší koncentrace CO (s výjimkou jedné odlehlé hodnoty).



Obr. 5 Rozptylový graf SO_2 a CO

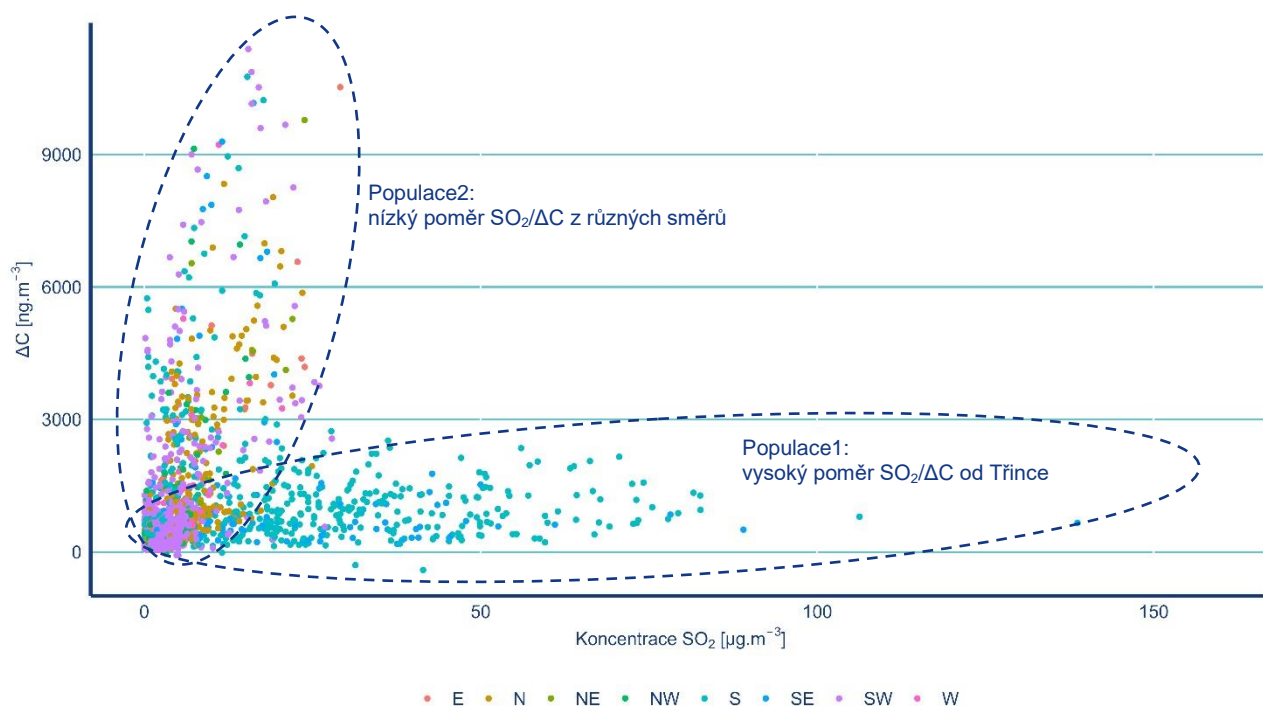
Jak ukazuje ve shodě s korelační analýzou v kap. 4.1 a Obr. 6, koncentrace benzenu s koncentracemi SO_2 nesouvisely. U vysokých koncentrací SO_2 při proudění od Třince byly koncentrace benzenu nízké a naopak je zřetelně vidět, že při nízkých koncentracích SO_2 a proudění z jiných směrů dosahovaly násobně vyšších hodnot než při špičkách SO_2 .



Obr. 6 Rozptylový graf SO_2 a benzenu

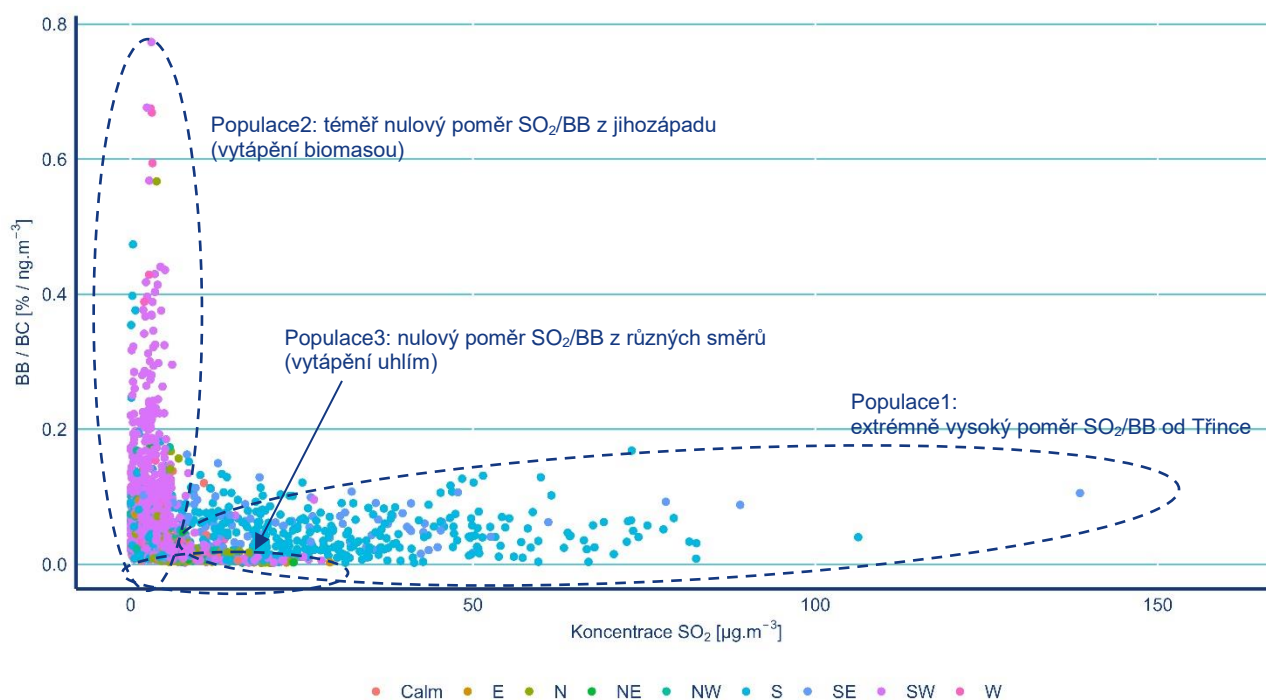
4.2.2. Souvislost s uhlíkatými částicemi

Následující Obr. 7 ukazuje, že intenzivní znečištění SO_2 přinášené od jihu až jihovýchodu bylo doprovázeno velmi nízkými koncentracemi uhlovdíků tvořících tzv. hnědý uhlík (jeho ukazatelem je zde parametr ΔC). Naopak jejich vysoký poměr vůči SO_2 , který je typický např. pro nedokonalé spalování při vytápění domácností, byl zjištěn i při všech ostatních směrech proudění. Vytápění domácností proto pravděpodobně nebylo zdrojem špičkových emisí SO_2 v Českém Těšíně.



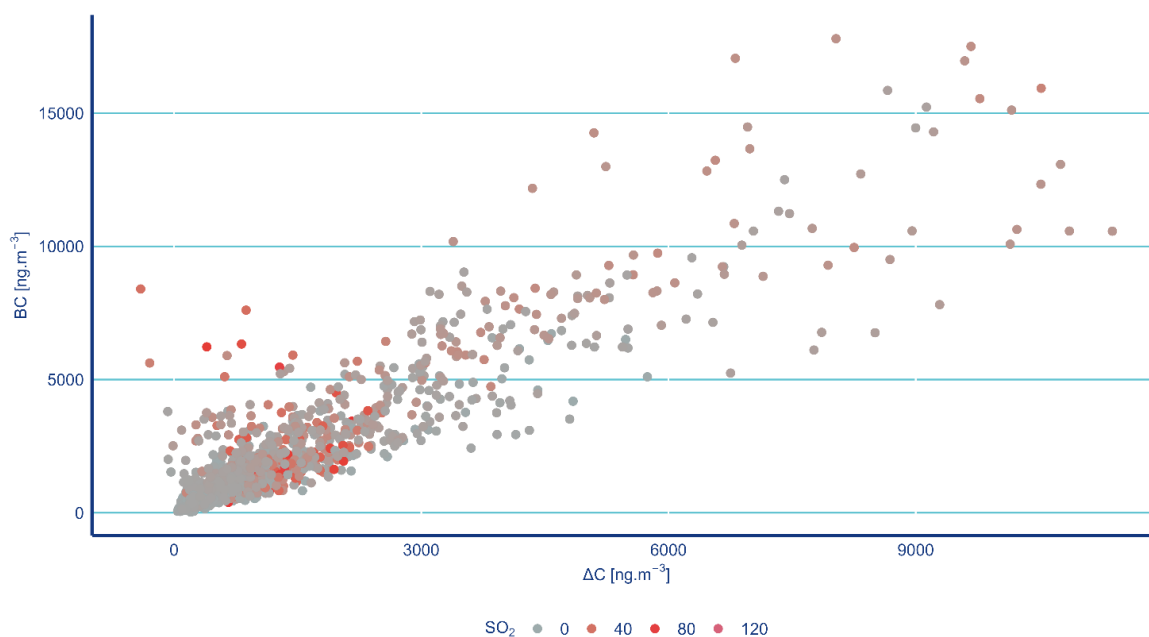
Obr. 7 Rozptylový graf SO_2 a ΔC

K podobnému závěru lze dojít vynesáním koncentrací černého uhlíku ze spalování biomasy vůči koncentracím SO_2 , jak je provedeno v Obr. 8. Spalování biomasy může být ve srovnání se spalováním uhlí pouze zanedbatelným zdrojem SO_2 , proto je zde rozlišení ještě výraznější než v případě grafu SO_2 vůči ΔC . Na základě tohoto grafu je zřejmý dominantní vliv zdroje spalování biomasy jihozápadně od měřicí lokality (Český Těšín, ul. Pod Zvonek). Uhlenné vytápění domácností se projevuje v grafu téměř nulovým podílem BB/BC a koncentracemi SO_2 do cca $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, a to při různých směrech větru. Z grafu je dobře patrné, že populace nejvyšších naměřených hodnot SO_2 souvisí výhradně s přenosem znečištění od jihu až jihovýchodu a nemá vazbu na vytápění domácností uhlím ani biomasou.



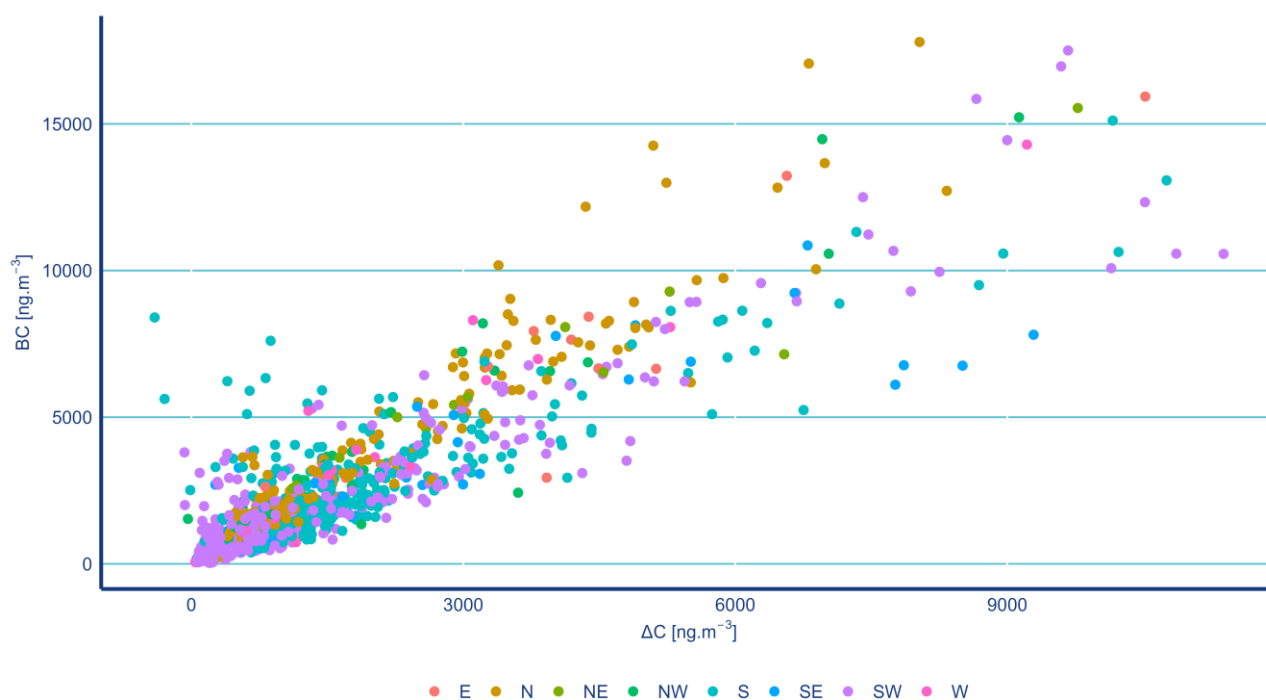
Obr. 8 Rozptylový graf SO_2 a černého uhlíku ze spalování biomasy

Také následující Obr. 9 využívá data z měření černého uhlíku. Ukazuje, že špičkové koncentrace SO_2 byly v lokalitě Český Těšín, ul. Pod Zvonek, doprovázeny nízkými koncentracemi černého uhlíku (asi třetinovými oproti obdobím s obvyklými koncentracemi SO_2). Tyto uhlíkaté částice ale obsahovaly pouze velmi nízký podíl uhlovodíků (asi pětinové koncentrace ΔC oproti obdobím s obvyklými koncentracemi SO_2). Uvedená skutečnost indikuje, že uhlíkaté částice, které doprovázely vysoké koncentrace SO_2 , pocházely z vysokoteplotního procesu. Snadněji oxidovatelné uhlovodíky byly termicky rozloženy a zůstal pouze stabilnější „čistý“ elementární uhlík, tedy BC. To spolu s doprovodem CO bez výrazných koncentrací ostatních plynů (viz kap. 4.1) podporuje hypotézu o původu špičkových koncentrací SO_2 v Českém Těšíně při vysokopecní výrobě železa.



Obr. 9 Rozptylový graf ΔC a BC ve vztahu k vysokým koncentracím SO_2

Vytápění domácností je hlavním zdrojem uhlíkatých částic v ovzduší předmětného regionu, jak dokazují dřívější studie [6, 7]. Z následujícího Obr. 10 vyplývá, že při proudění z různých směrů se uhlíkaté částice produkované tímto segmentem zdrojů kvalitativně liší. Při proudění ze severního směru byly v lokalitě Český Těšín, Pod Zvonek, zjištěny částice s menším podílem hnědého uhlíku oproti černému, tzn., že obsahovaly méně nespálených uhlovodíků a více „čistých sazí“, tedy elementárního uhlíku. Tuto skutečnost dokládá převaha hnědých bodů v horní části grafu (s výjimkou skupiny bodů, která souvisí se zdrojem SO_2 diskutovaným u předchozího Obr. 7). Může se jednat o vliv vyššího podílu uhlí v palivovém mixu domácností, nebo kvalitnějšího spalovacího procesu v Polsku, popř. na Karvinsku. Vzhledem k tomu, že nejsou objektivní důvody předpokládat výrazně kvalitnější spalování v severně položených lokalitách oproti jiným částem regionu, je pravděpodobnější vliv druhu paliva. Výsledky tak pravděpodobně ukazují, že v oblastech jihovýchodně až jihozápadně od měřicího místa (podhůří Beskyd a Jablunkovská brázda) je k vytápění ve větší míře využívána biomasa oproti Karvinsku a Polsku. To je v souladu i s výše uvedeným grafem v Obr. 6, kde je doložena dominance emisí z vytápění biomasou při proudění od jihozápadu (z podhůří Beskyd).



Obr. 10 Rozptylový graf ΔC a BC ve vztahu ke směru větru

4.3. Špičkové koncentrace SO₂ ve vztahu k rychlosti a směru větru

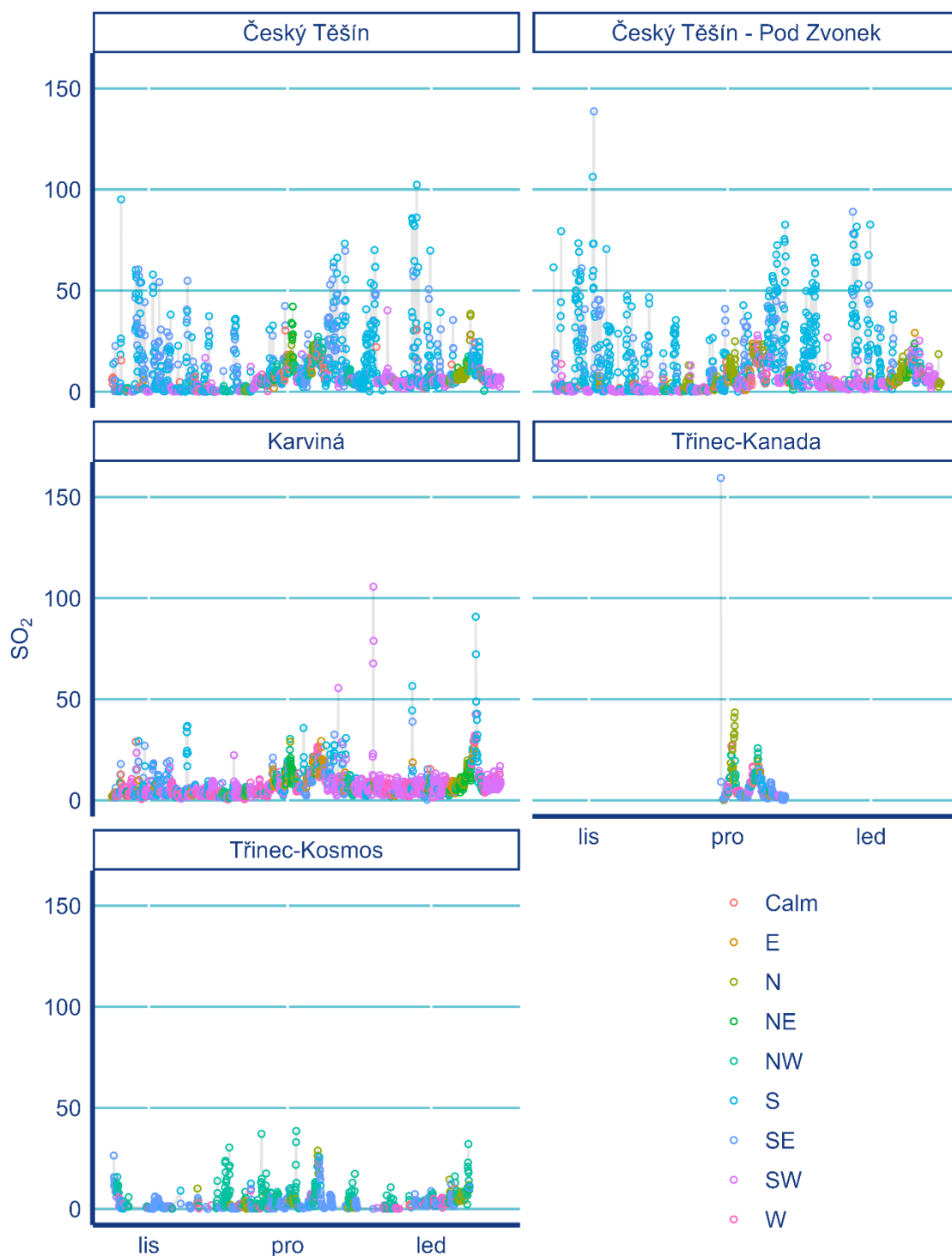
Rozbor směru větru při nejvyšších koncentracích umožňuje určit směr, odkud bylo znečištění do měřicích lokalit transportováno. Pokud je vhodně rozmístěných lokalit více, může být určen nejen směr, ale i přibližná poloha zdroje. Tohoto přístupu bylo využito i v případě předkládaného posouzení.

Pro navazující směrové vyhodnocení je v následujícím textu použito několik nezávislých metod:

- Grafy časových řad SO₂ s rozlišením směru větru
- Conditional Probability Function (CPF)
- Koncentrace SO₂ v závislosti na směru větru, polární grafy
- Zpracování zpětných trajektorií větru

4.3.1. Časové řady

Průběh koncentrací znázorňuje Obr. 11. V obou českotěšínských měřicích lokalitách nastávaly vysoké koncentrace SO₂ při proudění z jižního a jihovýchodního směru. V Karvině se jednalo o vysoké koncentrace částečně z jihu, částečně z jihozápadu, v obou případech s výrazně nižší četností oproti Českému Těšínu. V lokalitě Třinec-Kanada byly špičkové koncentrace oproti Českému Těšínu přibližně poloviční, s nízkou četností, a nastávaly při proudění z východního kvadrantu. V lokalitě Třinec-Kosmos docházelo ke kulminaci koncentrací SO₂ při proudění ze směru od severozápadu, výjimečně od severu, úroveň koncentrací přitom byla podobná jako v místě Třinec-Kanada (s výjimkou jediné odlehle hodnoty).



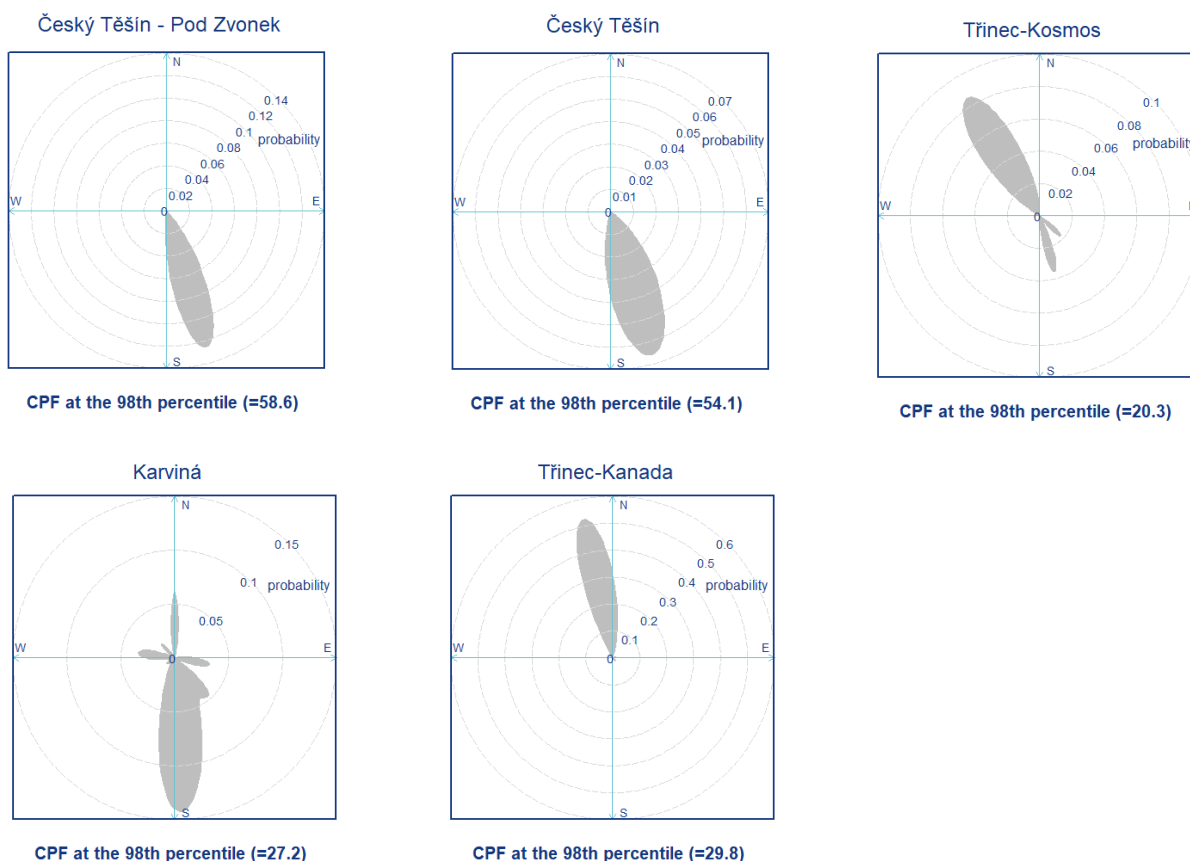
Obr. 11 Časové řady koncentrace SO₂ s rozlišením směru větru

Zdroj špičkových koncentrací SO₂ se tedy nachází jižně až jihovýchodně od Českého Těšína, severně od lokality Třinec-Kanada (TTRK), a severozápadně až severně od lokality Třinec-Kosmos (TTRO). V lokalitě Třinec-Kanada je vhodné zohlednit vyšší nejistotu odhadu, která je spojena s krátkou dobou validního měření v tomto místě (viz kap. 3). Průsečík uvedených směrů odpovídá přibližně poloze areálu Třineckých železáren a. s.

4.3.2. Směrová analýza

Grafické znázornění výsledku funkce CPF (viz Obr. 12) ukazuje, ze kterého směru bylo nejpravděpodobněji transportováno znečištění. Jedná se o standardně používanou metodu při hodnocení příčin znečištění. Její matematická podstata je popsána např. v [8]. Jako kritérium nejvyšších koncentrací SO₂ pro směrové posouzení byl zvolen 98. percentil naměřených průměrných hodinových hodnot.

Funkce CPF v tomto případě indikuje směr původu vysokých koncentrací SO₂ dosti jednoznačně. Směry ke zdroji z jednotlivých pěti monitorovaných lokalit se shodují s odhadem na základě časových řad koncentrací, který je uveden v předchozí podkapitole.



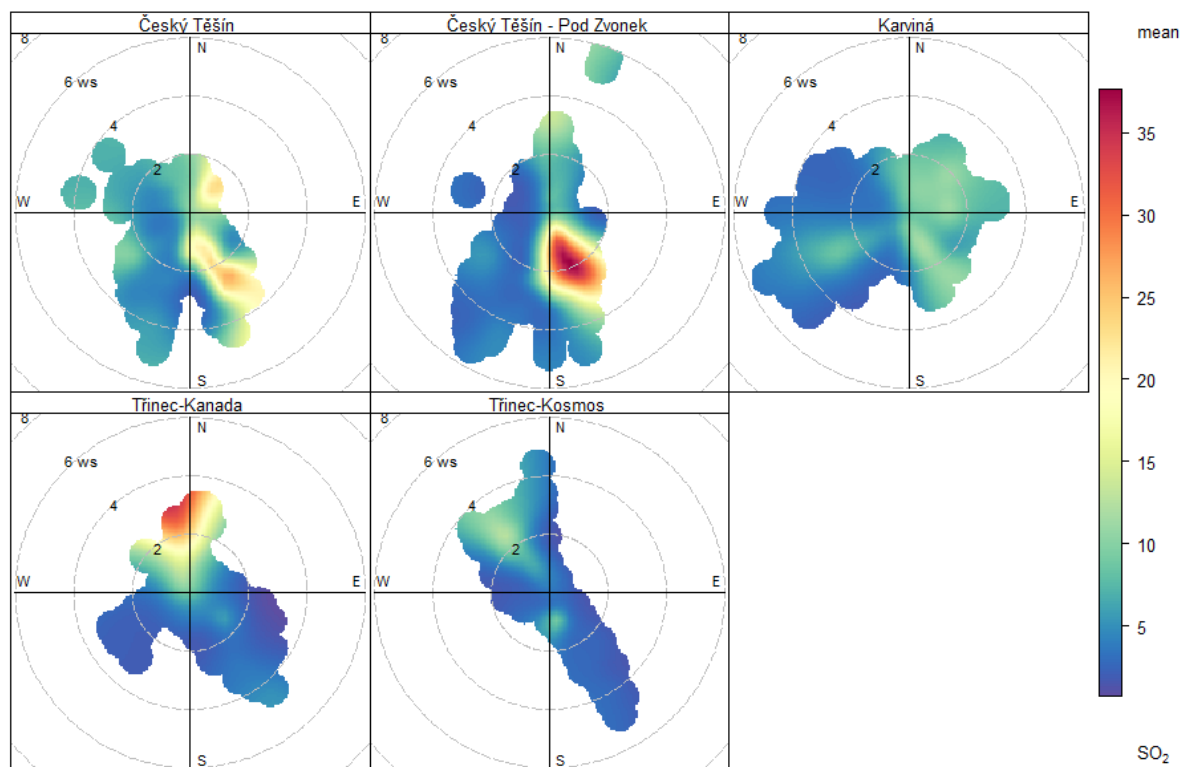
Obr. 12 Grafy funkce CPF

V Tab. 4 jsou uvedeny průměrné koncentrace SO₂ a počet hodinových koncentrací SO₂ pro daný směr proudění a jednotlivé lokality. Přestože v lokalitě Karviná je v hodnoceném období nejčtetnějším směrem měřených hodinových koncentrací SO₂ směr jihozápadní, nejvyšší průměrná koncentrace pochází ze směru jižního. Sice nižší, ale podobně vysoké (v průměru nižší maximálně o 2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) koncentrace se na stanici vyskytují při směrech SV, S a V. Na obou lokalitách v Českém Těšíně jsou nejčtetnějšími směry proudění z jižního sektoru (Český Těšín z jižního směru, Český Těšín, ul. Pod Zvonek z jihozápadního směru). Nejvyšší průměrná koncentrace v lokalitě TCTN 19,6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ je při severovýchodním proudění, jedná se však o datových set čítající 21 hodinových hodnot. Průměrné koncentrace SO₂ 17,2 a 13,7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pochází z jihovýchodního a jižního směru. V případě lokality Český Těšín, ul. Pod Zvonek jsou jednoznačně nejvyšší průměrné koncentrace SO₂ z jihovýchodního a jižního směru. U třineckých lokalit převažuje četnost proudění z jihovýchodního směru, avšak nejvyšší průměrná koncentrace SO₂ je v lokalitě Kosmos při jižním proudění, v Kanadě při proudění ze severu.

Názorně jsou hodinové koncentrace SO₂ v závislosti na směru a rychlosti větru zobrazeny na Obr. 13.

Tab. 4 Koncentrace SO_2 v závislosti na směru větru (koncentrace v $\mu g.m^{-3}$), 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024

Směr	Karviná průměr (počet)	Český Těšín průměr (počet)	Český Těšín, ul. Pod Zvonek průměr (počet)	Třinec-Kanada průměr (počet)	Třinec-Kosmos průměr (počet)
S	9.8 (58)	9.9 (95)	8.0 (207)	20.6 (119)	5.3 (95)
SV	10.1 (92)	19.6 (21)	6.8 (15)	4.4 (11)	9.4 (1)
V	9.8 (109)	3.7 (2)	4.8 (7)	3.6 (40)	-
JV	9.0 (146)	17.2 (259)	22.8 (107)	4.5 (688)	2.7 (1041)
J	11.8 (183)	13.7 (622)	21.6 (522)	4.7 (167)	14.8 (73)
JZ	6.4 (748)	4.6 (518)	3.7 (761)	3.9 (500)	2.1 (38)
Z	4.8 (332)	5.1 (70)	4.7 (43)	7.0 (189)	2.4 (216)
SZ	5.8 (158)	7.9 (216)	3.6 (95)	12.8 (191)	6.4 (413)
Bezvětří	8.7 (190)	10.4 (213)	7.4 (259)	9.3 (111)	4.6 (139)



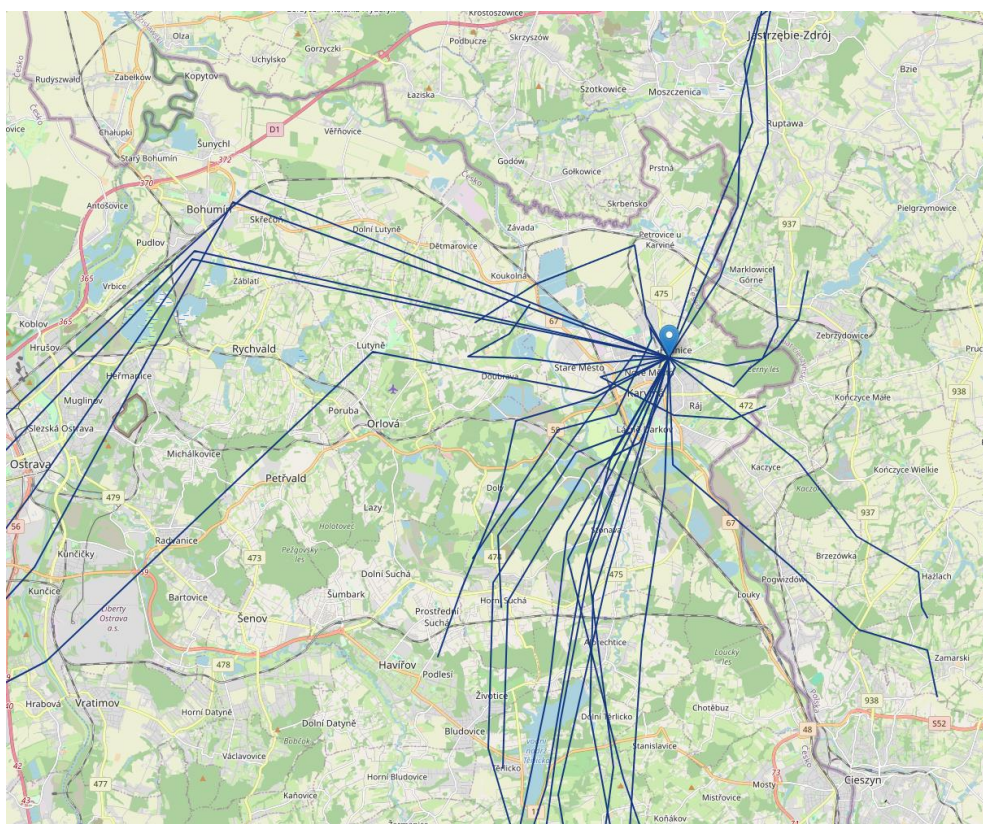
Obr. 13 Polární grafy hodinových koncentrací SO_2 , 24. 10.2023 – 15. 1. 2024

4.3.3. Zpětné trajektorie proudění

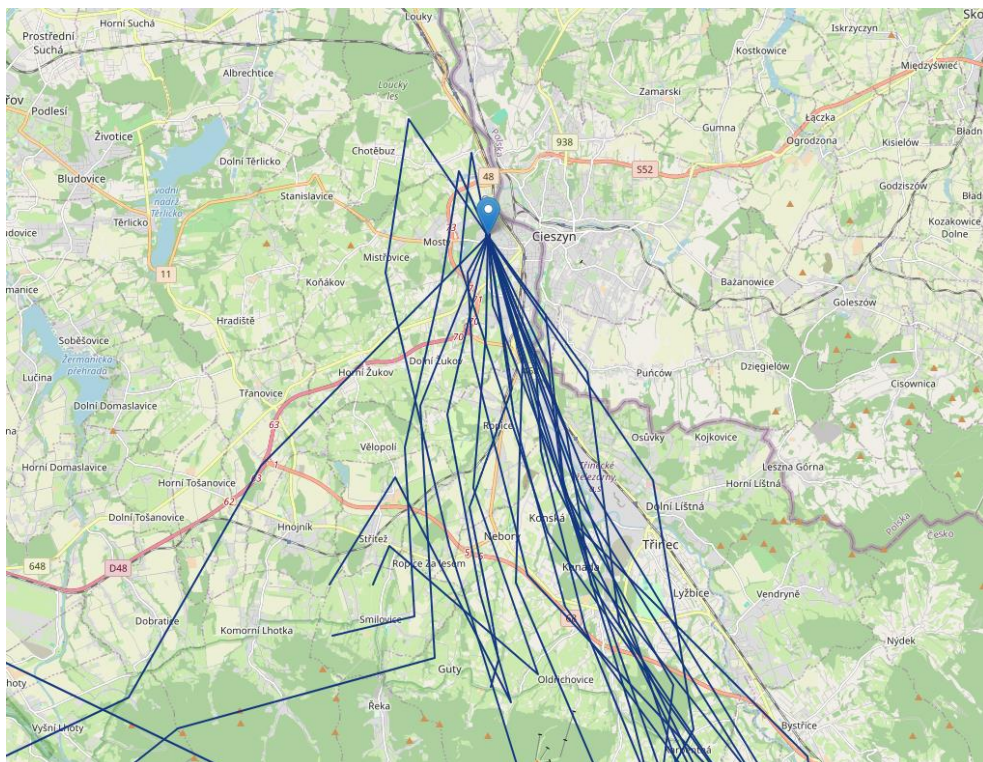
Na Obr. 14–18 jsou znázorněny zpětné trajektorie proudění pro termíny dosažení nejvyšších koncentrací (98. percentilu hodinových koncentrací) SO_2 na jednotlivých lokalitách. Jednotlivé linie vizualizují trajektorii postupu vzduchových hmot reprezentující výšku 10 m nad zemí za časový úsek posledních 6 hodin.

Nejvyšší počet trajektorií popisující nejvyšší hodinové koncentrace SO_2 přichází na stanici Karviná (Obr. 13) z jižního až jihovýchodního sektoru, dále se jedná o směry ze západu, severu až severovýchodu. U lokalit v Českém Těšíně (Obr. 14–15) popisují zpětné trajektorie pro nejvyšší koncentrace SO_2 převážně směry jihovýchodní, pro Třinec-Kanadu (Obr. 16) směr severní a Třinec-Kosmos (Obr. 17) severozápadní.

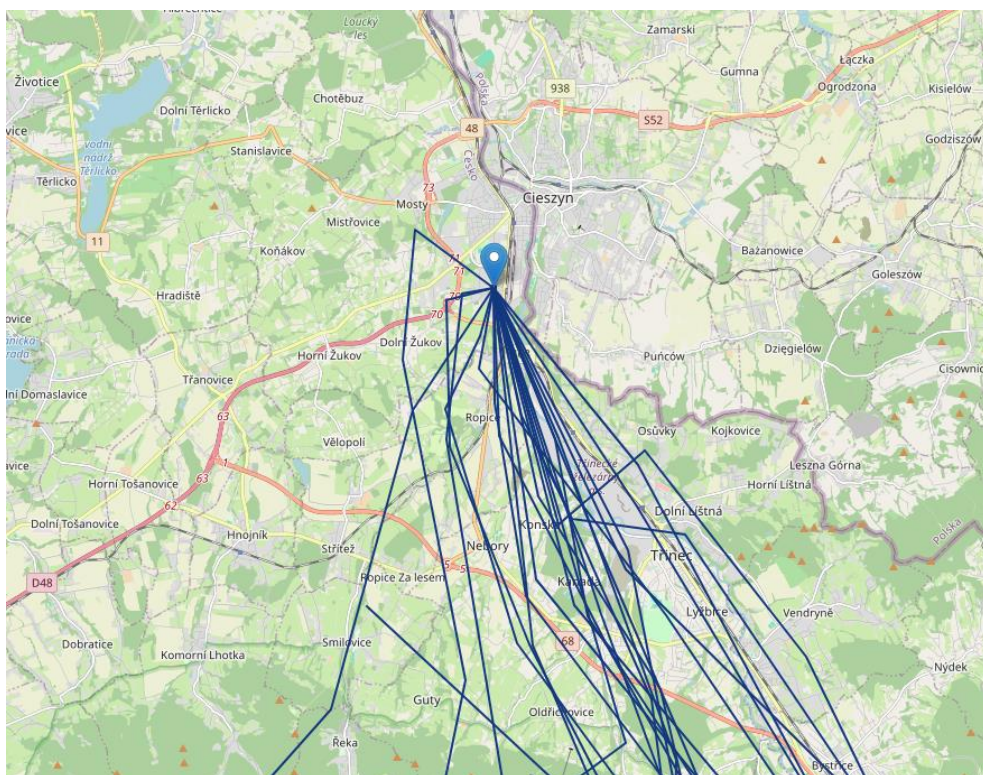
Znázornění menšího počtu trajektorií na Obr. 16 odpovídá menšímu počtu validních dat (za období 29. 11. – 13. 12. 2023) na lokalitě Třinec-Kanada, jak je popsáno v kap. 3.



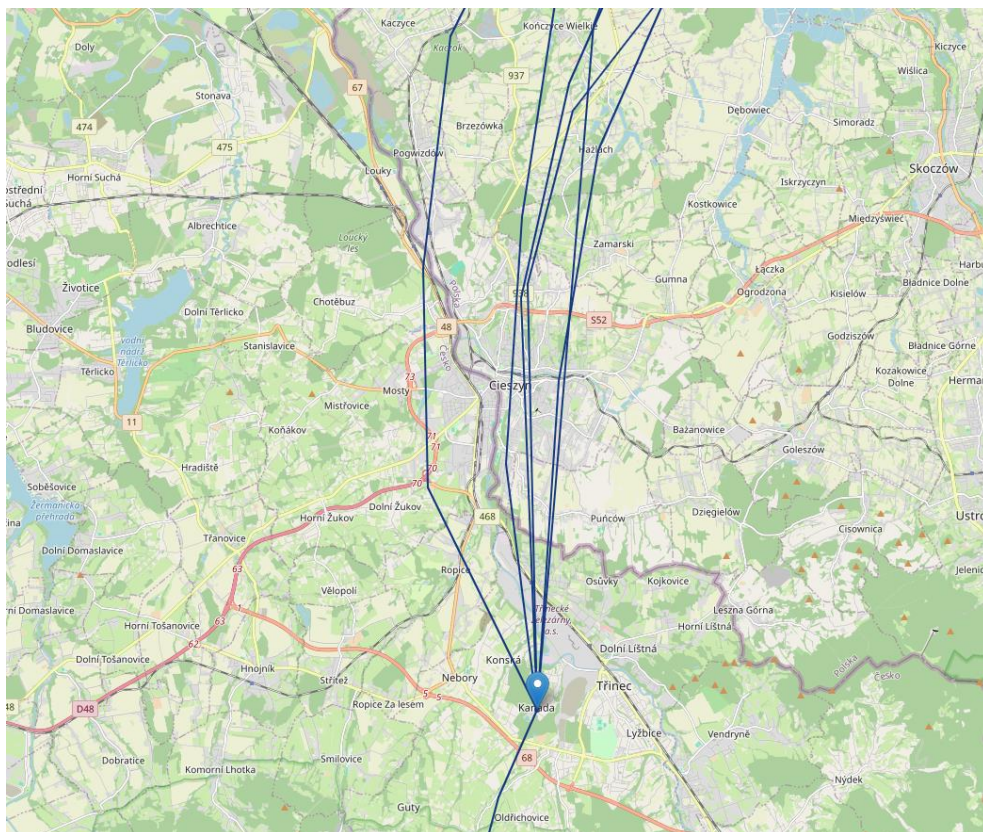
Obr. 14 Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO_2 , Karviná, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024



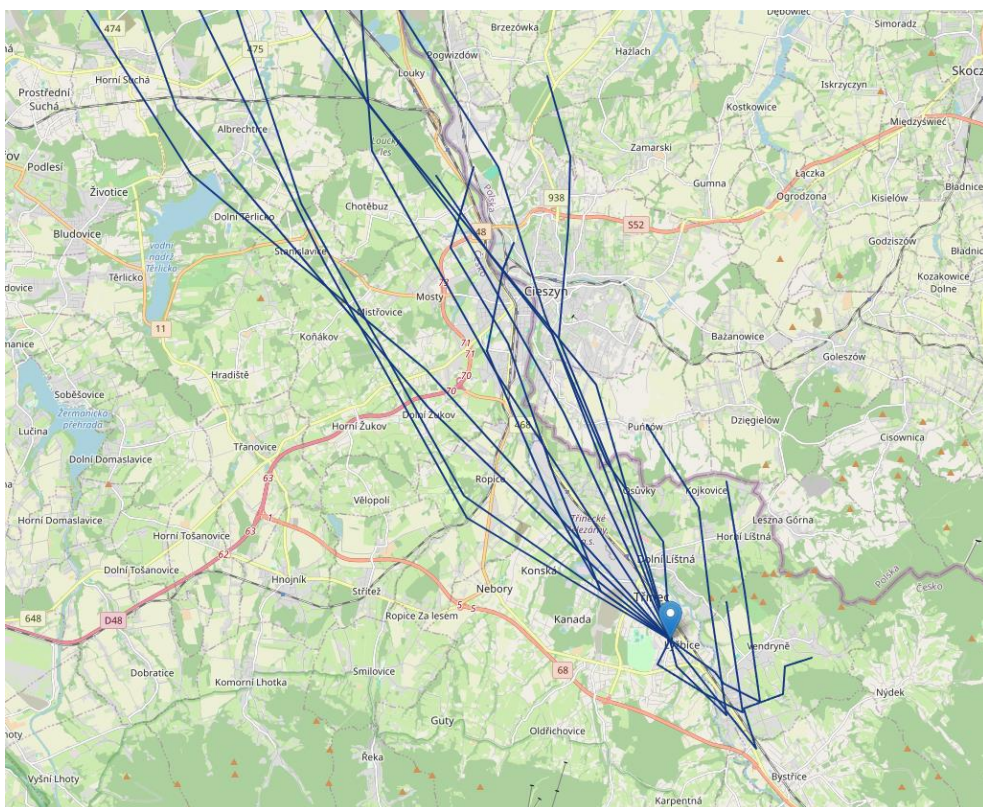
Obr. 15 Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO_2 , Český Těšín, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024



Obr. 16 Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO_2 , Český Těšín, ul. Pod Zvonek, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024



Obr. 17 Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO_2 , Třinec-Kanada, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024



Obr. 18 Zpětné trajektorie proudění pro 98. percentil hodinových koncentrací SO_2 , Třinec-Kosmos, 24. 10. 2023 – 15. 1. 2024

5. Závěr

V rámci projektu ARAMIS, dílčího cíle 2.1, byla identifikována příčina občasné krátkodobě zvýšených koncentrací SO₂, zjištěných v uplynulém období měření v lokalitě Státní síť imisního monitoringu Český Těšín (TCTN). Pro tento účel bylo využito imisní měření v lokalitách Karviná (TKAV), Český Těšín (TCTN), Třinec-Kosmos (TTRO), Třinec-Kanada (TTRK) a Český Těšín, ul. Pod Zvonek, provedené v období 24. 10. 2023 až 15. 1. 2024. Kromě SO₂ byly měřeny koncentrace dalších plynných polutantů a černého uhlíku.

V průběhu měření byly zjištěny obdobné špičkové koncentrace SO₂ jako v předchozích obdobích. Z hodnocených lokalit byl jimi nejvíce zatížen Český Těšín, ul. Pod Zvonek, ale projevovaly se různou intenzitou při různých podmínkách ve všech měřicích lokalitách. V žádné z lokalit nebylo zjištěno překročení hodinového ani denního imisního limitu a naměřené hodnoty neindikovaly ani možné překročení imisního limitu pro kalendářní rok a zimní období (1. 10. – 31. 3.).

Na základě velikosti imisních koncentrací při různých směrech a rychlostech větru na uvedených stanicích a pomocí vzájemných vztahů měřených parametrů byla identifikována zdrojová oblast emisí, které způsobují zmíněné občasné špičkové koncentrace SO₂. Polární grafy a zpětné trajektorie shodně ukazují na zdroj ve směru JV od českotěšínských lokalit, SZ od lokality Třinec-Kosmos a S až SSZ od lokality Třinec-Kanada. Pomyslný průsečík těchto přímků leží v údolí Olše, přibližně v polovině délky areálu společnosti Třinecké železárny a. s., orientovaného ve směru od SZ na JV. S ohledem na nejistoty měření směru větru nelze vyloučit, že se může jednat o jihovýchodní okraj průmyslové zóny Třinec-Baliny, která navazuje na SZ okraj areálu společnosti Třinecké železárny a. s. Vzhledem ke zjištěné skladbě emisí (souběh SO₂ a CO bez korelace s dalšími plyny typickými pro spalovací procesy) mají špičkové koncentrace SO₂ pravděpodobný původ ve zdroji, který souvisí s výrobou surového železa.

Z hlediska výzkumných cílů projektu ARAMIS je podstatným zjištěním, že měření černého uhlíku spolu s plynnými polutanty a směrem a rychlostí větru je dobře využitelné pro rozlišení primárních částic z vytápění domácností od průmyslových zdrojů a pro rozlišení vytápění domácností biomasou a uhlím. Odlíšitelnost těchto zdrojů od dopravních emisí nebyla prokázána, pravděpodobně z důvodu slabého vlivu dopravy v těchto lokalitách (dřívější výzkumy ukazují, že hmotnostní příspěvek dopravy k primárním aerosolům je s výjimkou dopravních hot-spotů velmi nízký a sekundární aerosoly nelze použitou metodou identifikovat). Vzhledem k vysokému časovému rozlišení měření černého uhlíku a plynů ve srovnání s odběry na filtry je měření aethalometrem doplněné o meteorologické parametry, NO_x, SO₂, CO a benzen vhodnou sestavou pro identifikaci a odhad velikosti vlivu lokálních zdrojů primárních aerosolů. Metoda je provozně spolehlivá a oproti odběrům na filtry relativně levná a personálně nenáročná. V rámci projektu budou proto hledány další příležitosti pro její testování a praktické využití.

Literatura

- [1] ČHMÚ, 2022. Znečištění ovzduší a atmosférická depozice v datech, Česká republika. [online]. https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2022_enh/pdf/CZ_2022_kom.pdf.
- [2] Cuesta-Mosquera, A., Močnik, G., Drinovec, L., Müller, T., Pfeifer, S., Minguillón, M.C., Briel, B., Buckley, P., Dudoitis, V., Fernández-García, J., Fernández-Amado, M., Ferreira De Brito, J., Riffault, V., Flentje, H., Heffernan, E., Kalivitis, N., Kalogridis, A.-C., Keernik, H., Marmureanu, L., Luoma, K., Marinoni, A., Pikridas, M., Schauer, G., Serfozo, N., Servomaa, H., Titos, G., Yus-Díez, J., Zioła, N., Wiedensohler, A., 2021. Intercomparison and characterization of 23 Aethalometers under laboratory and ambient air conditions: procedures and unit-to-unit variabilities. *Atmos. Meas. Tech.* 14, 3195–3216. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3195-2021>.
- [3] Cowen, K., Kelly T., Dindal, A. EPA/600/R-15/011, 2011. Environmental Technology Verification Report, ETV Advanced Monitoring Systems Center, Magee Scientific Model AE33 Aethalometer, Battelle Columbus, Ohio.
- [4] Sandradewi, J., Prévôt, A.S.H., Weingartner, E., Schmidhauser, R., Gysel, M., Baltensperger, U., 2008. A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer. *Atmospheric Environment* 42, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.034>
- [5] Martinková, E., Erban Kochergina, Y.V., Šebek, O., Seibert, R., Chrástný, V., Novák, M., Štěpánová, M., Čuřík, J., Pacherová, P., Přečková, E., Veselovský, F., Volná, V., Hladký, D., A. Petrash, D., Komárek, A., 2023. Winter-time pollution in Central European cities shifts the 208Pb/207Pb isotope ratio of atmospheric PM2.5 to higher values: Implications for lead source apportionment, *Atmospheric Environment*, Volume 310, 2023, 119941, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119941>.
- [6] Volná, V., Seibert, R., Hladký, D., Krejčí, B., 2024. Identification of Causes of Air Pollution in a Specific Industrial Part of the Czech City of Ostrava in Central Europe. *Atmosphere* 15, 177. <https://doi.org/10.3390/atmos15020177>
- [7] Seibert, R., Nikolova, I., Volná, V., Krejčí, B., Hladký, D., 2020. Air Pollution Sources' Contribution to PM2.5 Concentration in the Northeastern Part of the Czech Republic. *Atmosphere* 11. <https://doi.org/10.3390/atmos11050522>
- [8] Xie, Y., Berkowitz, C.M., 2007. The use of conditional probability functions and potential source contribution functions to identify source regions and advection pathways of hydrocarbon emissions in Houston, Texas. *Atmospheric Environment* 41, 5831–5847. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.03.049>