

Identifikace příčin znečištění ovzduší ve východní části Ostravy

Závazný výsledek Dílčího cíle 2.1 Zlepšení identifikace zdrojů znečištění

Na třech monitorovacích lokalitách bylo v období přibližně od poloviny ledna do poloviny dubna 2021 provedeno inovativní měření znečištění ovzduší. Na základě následných laboratorních analýz bylo provedeno vyhodnocení emisně-imisních vztahů a matematické modelování pomocí statistické metody PMF (Positive Matrix Factorization). Těmito nezávislými metodami byly vypočteny imisní příspěvky zdrojů znečišťování ovzduší, které se v měřeném chladném období roku v posuzované oblasti podílely na znečištění aerosolovými částicemi PM₁₀ a benzo[a]pyrenem.

Projekt: SS02030031: Integrovaný systém výzkumu, hodnocení a kontroly kvality ovzduší

Autoři: Radim Seibert, Vladimíra Volná, Dan Hladký, Blanka Krejčí

Datum: 30. 6. 2022

Hlavním uživatelem výstupů tohoto projektu je
Ministerstvo životního prostředí

Ministerstvo životního prostředí

Obsah

1. Úvod.....	4
2. Hodnocená oblast a měřicí lokality	5
3. Rozsah a metodika prací.....	7
3.1. Terénní práce	7
3.2. Laboratorní práce	8
3.3. Metodika hodnocení imisně-meteorologických dat a vztahů.....	8
3.4. Metodika identifikace zdrojů znečišťování metodou PMF.....	9
4. Výsledky a hodnocení prací.....	12
4.1.1. Hodnocení meteorologických podmínek a kvality ovzduší	12
4.1.2. Identifikace zdrojů na základě imisně-meteorologických vztahů.....	18
4.1.3. Identifikace zdrojů metodou PMF.....	24
5. Shrnutí a diskuse výsledků.....	30
5.1. Územní a časová reprezentativnost výsledků	30
5.2. Shrnutí příčin znečištění v zájmovém území	30
5.3. Odlišnost lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí.....	31
5.4. Porovnání příčin znečištění vyhodnocených nezávislými metodami.....	32
5.5. Interpretace a nejistoty modelu PMF.....	33
5.5.1. Interpretace faktoru C-Na-NO ₃	33
5.5.2. Rozdíl mezi modelem PMF a naměřenými imisními koncentracemi.....	34
5.5.3. Korelace faktorových příspěvků s naměřenými meteorologickými parametry a koncentracemi plynů	36
5.5.4. Analýza vážených koncentračních růžic faktorových imisních příspěvků	37
5.5.5. Analýza faktorových imisních příspěvků metodou CPF.....	39
5.5.6. Analýza hromadným zpracováním zpětných trajektorií	40
5.5.7. Otestování nových markerů znečištění	41
5.5.8. Porovnání s identifikací zdrojů provedenou izotopovou metodou.....	42
6. Závěr.....	44
Literatura.....	46

Přílohy

Příloha 1	Chemické profily identifikovaných faktorů
Příloha 2	Časové řady faktorových imisních příspěvků ke koncentraci PM ₁₀
Příloha 3	Grafy časově rozčleněných imisních příspěvků identifikovaných faktorů
Příloha 4	Vážené koncentrační růžice faktorových příspěvků ke koncentraci aerosolu PM ₁₀ [μg.m ⁻³]
Příloha 5	Grafy CPF pro faktorové příspěvky ke koncentraci aerosolu PM ₁₀ [μg.m ⁻³]
Příloha 6	Grafický výstup analýzy zpětných trajektorií

Seznam obrázků:

Obr. 1 Umístění lokalit	5
Obr. 2 Lokalita Ostrava-Bartovice (foto: ČHMÚ, březen 2021)	6
Obr. 3 Lokalita Ostrava-Kunčičky (foto: ČHMÚ, březen 2021)	6
Obr. 4 Lokalita Ostrava-Radvanice, Nad Obcí (foto: ČHMÚ, březen 2021)	7
Obr. 5 Přehled zpětných trajektorií reprezentujících období měřicí kampaně	11
Obr. 6 Větrná růžice, Ostrava-Bartovice, 14. 1.–14. 4. 2021	12
Obr. 7 Větrná růžice, Ostrava-Poruba, 14. 1.–14. 4. 2012–2021	13
Obr. 8 Statistické rozložení průměrných 3hodinových koncentrací PM_{10} , 14. 1.–14. 4. 2021	14
Obr. 9 Denní chod a statistické rozložení 3hodinových koncentrací PM_{10} , 14. 1.–14. 4. 2021	14
Obr. 10 Průměrné koncentrace PM_{10} rozdělené do týdnů období 14. 1.–14. 4. 2021	15
Obr. 11 Statistické rozložení průměrných 3hodinových koncentrací BaP, 14. 1.–14. 4. 2021	16
Obr. 12 Denní chod a statistické rozložení 3hodinových koncentrací PM_{10} , 14. 1.–14. 4. 2021	16
Obr. 13 Průměrné koncentrace BaP rozdělené do týdnů období 14. 1.–14. 4. 2021	17
Obr. 14 Hmotnostní složení aerosolu PM_{10}	17
Obr. 15 Vážené koncentrační růžice (nahore), vážené koncentrační růžice bez zahrnutí rychlosti větru (uprostřed) a koncentrační růžice (dole) pro PM_{10} , 14. 1.–14. 4. 2021	18
Obr. 16 Statistické rozložení průměrných 3hodinových koncentrací PM_{10} rozdělené dle směrů proudění od a mimo areál Liberty Ostrava a.s., 14. 1.–14. 4. 2021	19
Obr. 17 Vážené koncentrační růžice (nahore), vážené koncentrační růžice bez zahrnutí rychlosti větru (uprostřed) a koncentrační růžice (dole) pro BaP, 14. 1.–14. 4. 2021	20
Obr. 18 Statistické rozložení průměrných 3hodinových koncentrací BaP rozdělené dle směrů proudění od a mimo areál Liberty Ostrava a.s., 14. 1.–14. 4. 2021	21
Obr. 19 Zpětné trajektorie proudění, 10minutový interval, 25. 2. 2021, 01–04 hod. SEČ	22
Obr. 20 Zpětné trajektorie proudění, 10minutový interval, 18. 1. 2021, 04–07 hod. SEČ	23
Obr. 21 Zpětné trajektorie proudění, 10minutový interval, 26. 2. 2021, 01–04 hod. SEČ	23
Obr. 22 Zpětné trajektorie proudění, 10minutový interval, 3. 3. 2021, 04–07 hod. SEČ	24
Obr. 23 Podíl identifikovaných faktorů na imisní koncentraci PM_{10} (Fpeak Run)	27
Obr. 24 Podíl identifikovaných faktorů na imisní koncentraci PM_{10} (Constrained Run)	28
Obr. 25 Podíl identifikovaných faktorů na imisní koncentraci benzo[a]pyrenu (Constrained Run)	29
Obr. 26 Časový průběh faktoru C-Na-NO ₃	34
Obr. 27 Klastrová spearmanova korelace faktorových příspěvků, meteorologických parametrů a plyných polutantů (TORE)	36
Obr. 28 Poměr benzo[a]anthracenu / indeno[1,2,3-cd]pyrenu u různých skupin zdrojů	41
Obr. 29 Poměr benzo[a]anthracenu / benzo[ghi]perylenu u různých skupin zdrojů	42
Obr. 30 Imisní příspěvek vytápění domácností uhlím a $\delta^{13}C$ v atmosférickém aerosolu PM_{10}	43

Seznam tabulek:

<i>Tab. 1 Průměrné koncentrace PM_{10} a procentuální vliv na imisní zatížení PM_{10} v lokalitách dle proudění od areálu Liberty Ostrava a.s. a z ostatních směrů, 14. 1.–14. 4. 2021</i>	19
<i>Tab. 2 Průměrné koncentrace BaP a procentuální vliv na imisní zatížení BaP v lokalitách dle proudění od areálu Liberty Ostrava a.s. a z ostatních směrů, 14. 1.–14. 4. 2021</i>	21
<i>Tab. 3 Porovnání naměřených a modelových koncentrací PM_{10} a benzo[a]pyrenu</i>	34

Seznam zkratk:

I–XII	měsíce v roce (leden–prosinec)
BaA	benzo[a]antracen
BaP	benzo[a]pyren
BeP	benzo[e]pyren
BbF	benzo[b]fluoranten
BghiPRL	benzo[g,h,i]perylene
BjF	benzo[j]fluoranten
BkF	benzo[k]fluoranten
BORA	výzkumný koncept hodnocení příčin zvýšeného znečištění ovzduší ve východní části Ostravy
COR	koronen
CRY	Chrysen
CWT	Concentration Weighted Trajectories
ČGS	Česká geologická služba
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
DBaA	dibenzo[a,h]antracen
DTP	denní typ proudění
I123cdP	indeno[1,2,3-cd]pyren
NO ₂	oxid dusičitý
O ₃	přízemní ozon
PAH	polycyklické aromatické uhlovodíky
PIC	picen
PM ₁₀ /PM _{2,5}	suspendované částice PM ₁₀ /PM _{2,5}
PRL	Perylen
PSCF	Potential Source Contribution Function
RET	reten
SEČ	středoevropský čas (UTC + 1 hod)
SO ₂	oxid siřičitý
TK	těžké kovy
UTC	světový čas (SEČ – 1hod)
WHO	Světová zdravotnická organizace
ZÚ	Zdravotní ústav

1. Úvod

V rámci projektu ARAMIS¹, dílčího cíle 2.1, byla v období 14. 1. 2021–30. 6. 2022 provedena identifikace zdrojů znečišťování ovzduší v okolí městské části Ostravy – Radvanic. Jedná se o dlouhodobě problematickou oblast z hlediska hodnocení příčin zdejšího výrazně nadlimitního znečištění ovzduší, především aerosolovými částicemi PM₁₀ a PM_{2,5} a benzo[a]pyrenem, přičemž dominují imisní příspěvky chladné části roku [2, 14–16]. Provedenými pracemi byly plněny tyto projektové úkoly:

- rozlišení a kvantifikace imisního podílu jednotlivých typů sekundárního aerosolu,
- otestování nových markerů pro zvýšení detailu a přesnosti identifikace zdrojů znečišťování,
- porovnání výsledků receptorového modelování s identifikací zdrojů izotopovou metodou,
- ověření použitelnosti a případné využití izotopových systémů pro zpřesnění identifikace zdrojů receptorovým modelováním.

Předkládaná zpráva byla po odsouhlasení garantem Dílčího cíle 2.1 vypracována v termínu odloženém o půl roku oproti původnímu harmonogramu. Důvodem byla především extrémní časová náročnost realizace použitého způsobu odběru a analýz vzorků v podmínkách doznívající pandemie COVID-19, která omezila kapacitu laboratorních prací zdržením externích servisních úkonů a zvýšenou nemocností personálu.

Inovativní způsob odběru vzorků spočíval v realizaci 3hodinových odběrů atmosférického aerosolu na filtry namísto obvyklých 24 nebo 12hodinových odběrů. Zvýšená technická náročnost tohoto řešení je pozitivně vykompenzována vyšší reprezentativností měření ve vztahu k meteorologickým podmínkám, a tedy vyšší jednoznačností a věrohodností hodnocení. Mimořádná spolehlivost vyslovených závěrů hodnocení byla dosažena také díky využití dvou zcela nezávislých metodických přístupů pro vyčíslení imisních podílů zdrojů znečišťování:

- identifikace zdrojů na základě imisně-meteorologických vztahů,
- identifikace zdrojů na základě modelu PMF (Positive Matrix Factorization).

Každé z těchto metod je v kapitole o vyhodnocení naměřených dat věnována samostatná část.

Provedené činnosti byly součástí širšího konceptu měření a hodnocení kvality ovzduší a příčin znečištění na Ostravsku s názvem BORA². V tomto konceptu jsou sdruženy činnosti několika projektů, aby bylo možno pokrýt financování a nashromáždit nezbytnou techniku i personální kapacity. Práce byly časově a věcně sladěny s projektem KAPOOO³, ve kterém ČHMÚ zodpovídá, mimo jiné, za měření znečištění v okolí průmyslových podniků. Společná naměřená data budou využita pro samostatná vyhodnocení v rámci projektů ARAMIS a KAPOOO. Činnosti v rámci obou zmíněných projektů probíhaly za podpory Krajského úřadu Moravskoslezského kraje, Statutárního města Ostravy, samospráv dotčených městských částí, Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě a společnosti Liberty Ostrava a.s.

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

- Pavel Smolík, Alois Medlen, František Kuchrýk, Roman Mainda – montáž, obsluha a údržba přístrojové techniky, technické konzultace k vyhodnocení
- Lucie Böhmová, Pavlína Podskočová, Václav Uher – příprava materiálu a laboratorní analýzy, konzultace k analytickým nejistotám

¹ www.projekt-aramis.cz/

² www.ovzdusi.cz/bora

³ www.msk.cz/cs/temata/zivotni_prostredi/krajsky-akcni-plan-pro-oblast-ochrany-ovzdusi---kapooo-10409/

- Irina Nikolova, Zdenka Rohanová – konzultace k organickým analýzám a molekulovým markerům
- Vladimíra Volná, Daniel Hladký, Blanka Krejčí – imisně-meteorologické hodnocení, konzultace k vyhodnocení
- Radim Seibert – návrh měření, koordinace prací, modelové a celkové vyhodnocení

Externí spolupracující subjekty:

- Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě: laboratorní analýzy PAH
- Česká geologická služba: pasivní odběry, laboratorní analýzy izotopového složení a navazující vyhodnocení

2. Hodnocená oblast a měřicí lokality

Lokality pro 3hodinová měření škodlivin byly vybrány s ohledem na polohu průmyslového areálu Liberty Ostrava a.s. a dalších stávajících zdrojů znečišťování ovzduší. Jednalo se o tři stanice umístěné v závětrí (Obr. 1, 7) areálu Liberty Ostrava a. s. a to ve směru severně (Ostrava-Kunčičky), severovýchodně (Ostrava-Radvanice, Nad Obcí) a východně (Ostrava-Bartovice) od areálu. Vzájemná vzdálenost lokalit Ostrava-Kunčičky a Ostrava-Radvanice, Nad Obcí je asi 2,3 km, Ostrava-Radvanice a Ostrava-Bartovice asi 2 km a Ostrava-Bartovice a Ostrava-Kunčičky asi 3,6 km (Obr. 1).



Obr. 1 Umístění lokalit

Ostrava-Bartovice (TOBA)

Stanice Ostrava-Bartovice byla umístěna v areálu sadu Kpt. Jaroše u hasičské stanice na ulici U Statku (49.7895992N, 18.3469469E, Obr. 2). Jedná se víceméně o okraj obce v blízkosti základní školy a pošty. V okolí jsou zemědělské plochy.



Obr. 2 Lokalita Ostrava-Bartovice (foto: ČHMÚ, březen 2021)

Ostrava-Kunčičky (TOKU)

Stanice Ostrava-Kunčičky byla umístěna v areálu hasičské zbrojnice na ulici Bořivojova (49.8084997N, 18.3069553E, Obr. 3). V okolí je nízkopodlažní obytná zástavba, služby, sběrné suroviny.



Obr. 3 Lokalita Ostrava-Kunčičky (foto: ČHMÚ, březen 2021)

Ostrava-Radvanice, Nad Obcí (TORE)

Stanice Ostrava-Radvanice, Nad Obcí byla umístěna v lokalitě stávající stanice dlouhodobého imisního monitoringu Statutárního města Ostrava a Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě Ostrava-Radvanice

ZÚ, která se nachází v ulici Nad Obcí (49.8070742N, 18.3392100E, Obr. 4)⁴. Stanice je klasifikována jako průmyslová, v zóně předměstská, s průmyslovou a obytnou charakteristikou. V okolí stanice je v jižní části Ostravy-Radvanice na svažitém terénu řídká nízkopodlažní zástavba převážně rodinných domů ve vzdálenosti cca 60 m od středně frekventované komunikace. Průmyslová charakteristika stanice je určena vzhledem k hlavnímu zdroji znečišťování ovzduší pocházejícího z hutního průmyslového komplexu, jehož areál se nachází v údolní poloze asi 1,5 km směrem na jihozápad. Účelem umístění stanice je vystihovat příspěvek z průmyslových zdrojů znečišťování ovzduší v mikroměřítku (několik m až 100 m) dle Vyhlášky č. 330/2012 Sb.



Obr. 4 Lokalita Ostrava-Radvanice, Nad Obcí (foto: ČHMÚ, březen 2021)

3. Rozsah a metodika prací

Na třech monitorovacích lokalitách bylo v období přibližně od poloviny ledna do poloviny dubna 2021 provedeno širokospektrální měření znečištění ovzduší. Na základě následných laboratorních analýz bylo provedeno vyhodnocení imisně-meteorologických vztahů a matematické modelování pomocí statistické metody PMF (Positive Matrix Factorization), kterými byly vypočteny imisní příspěvky zdrojů znečišťování ovzduší, které se v měřeném období v posuzované oblasti podílely na znečištění ovzduší aerosolovými částicemi PM₁₀ a benzo[a]pyrenem.

3.1. Terénní práce

V období 14. 1.–14. 4. 2021 byla provedena odběrová kampaň ve výše popsaných měřicích lokalitách. Automatickými sekvenčními vzorkovači Leckel SEQ (3 ks v každé lokalitě) zde byly odebírány vzorky prашného aerosolu frakce PM₁₀ na filtry. Jednalo se o 3hodinové vzorky odebírané každých 9 hodin při průtoku vzduchu cca 2,3 m³.h⁻¹. Časy odběrů všemi vzorkovači na všech třech lokalitách byly shodné. Veškeré terénní práce, jejichž výsledky jsou popsány v předkládané zprávě, byly provedeny pracovníky ČHMÚ.

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

3.2. Laboratorní práce

Odebrané vzorky na filtrech byly v laboratoři analyzovány pro stanovení hmotnostní koncentrace látek a sloučenin, které jsou nezbytné pro dostatečné rozlišení a přesnost navazujícího hodnocení, především matematického modelu PMF.

Rozsah laboratorně stanovených látek byl následující:

- gravimetrické stanovení koncentrace suspendovaných částic PM₁₀,
- OC, EC + teplotně rozlišené frakce OC1 až OC4, resp. EC1 až EC4 (termooptická analýza),
- ionty (iontová chromatografie): SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, Br⁻, F⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺,
- PAH (kapalinová chromatografie): fluoranten, pyren, benzo[a]antracen, chrysen, benzo[b]fluoranten, benzo[k]fluoranten, benzo[a]pyren, dibenzo[a,h]antracen, benzo[ghi]perylene, indeno[1,2,3-cd]pyren,
- prvkové složení (ED XRF): Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, In, Sb, Ba, Pb,
- anhydrosacharidy (iontová chromatografie HPAE-PAD): levoglucosan, mannosan, galactosan.

Laboratorně stanovené imisní koncentrace ve vzorcích prашného aerosolu na filtrech byly v případě lokality TORE doplněny o imisní koncentrace plynů sledovaných v této lokalitě v rámci provozu stálé stanice imisního monitoringu. Počet validních vzorků pro hodnocení se pohyboval v rozmezí 206 (TOBA) až 239 (TORE).

Analytické práce byly provedeny v laboratoři ČHMÚ, pobočky Ostrava, s výjimkou rozborů PAH, realizovaných Zdravotním ústavem se sídlem v Ostravě.

3.3. Metodika hodnocení imisně-meteorologických dat a vztahů

Významným přínosem provedeného hodnocení je možnost hodnocení koncentrací benzo[a]pyrenu v závislosti na meteorologických veličinách (směr a rychlost větru) v kratším datovém intervalu, konkrétně v 3hodinovém kroku. Doposud byly vždy k dispozici pouze 24hodinové průměry této škodliviny, které tedy nebylo možné plnohodnotně navázat na krátkodobé (hodinové, případně 10minutové) měření směru a rychlosti větru. Pro hodnocení denních koncentrací je možné využít metodu výpočtu denního typu proudění (převládající denní proudění) [4]. Tato metoda ovšem není dostatečně přesná pro případnou identifikaci zdrojů znečišťování ovzduší v dané oblasti.

Ve zpracování byly využity 3hodinové průměrné koncentrace benzo[a]pyrenu a PM₁₀ a hodinové hodnoty meteorologických veličin. Hodnoty jsou v UTC a jsou vztaženy k začátku měřicího intervalu, tzn., že průměrná koncentrace PM₁₀ pro hodinu 0 hod. je průměrnou koncentrací PM₁₀ za období 0 až 3 hod. UTC.

Přímá meteorologická měření ČHMÚ probíhala v lokalitě Ostrava-Bartovice. Pro všechny tři lokality byla s ohledem na nekomplikovanou orografii a malou vzdálenost využita měření směru a rychlosti větru v této lokalitě. Vhodnost použití této větrné růžice byla ověřena porovnáním s reprezentativní větrnou růžicí pro Ostravu z klimatologické stanice Ostrava-Poruba pro stejné období. Pro potřeby porovnání s 3hodinovými průměrnými hodnotami měřených škodlivin byly vytvořeny pro dané 3hodinové intervaly vektorové průměry směru větru.

Ve zpracování byly pro znázornění dat použity koncentrační růžice, které zobrazují rozložení maximálních příspěvků koncentrací PM₁₀ pro daný směr a rychlost větru. Použité vážené koncentrační

růžice, na rozdíl od koncentračních růžic, poskytují informace o tom, jak často se daná kombinace směru a rychlosti větru vyskytuje a udává, jakou měrou se koncentrace naměřené pro danou rychlost a směr větru podílejí na celkové průměrné koncentraci za dané období. Koncentrační růžice odhaluje, jaká byla imisní situace při maximálních koncentracích dané znečišťující látky v dané lokalitě. Vážená koncentrační růžice ukáže, ze kterého směru větru a při jaké rychlosti přicházelo znečištění v největší míře za celé období. Z výše popsaného je zřejmé, že se oba typy růžic pro stejnou lokalitu a období mohou výrazně lišit. Pro názornější představu byly zobrazeny také koncentrační růžice bez zahrnutí rychlosti větru. Vyhodnocení a srovnání uvedených typů růžic může ukázat na polohu zdrojů, které nejčastěji ovlivňují kvalitu ovzduší na dané lokalitě, ale také polohu zdrojů, odkud sice přichází koncentrace jen ojediněle, zato však v maximálních příspěvcích.

Pro hodnocení často diskutovaného možného vlivu emisí pocházejících z areálu Liberty Ostrava a.s. na imisní situace v lokalitách O.-Bartovice, O.-Kunčičky a O.-Radvanice, Nad Obcí, byly od každé stanice vytýčeny azimuty (výseče) zahrnující vymezení směrů proudění vzduchu od areálu Liberty Ostrava a.s. vzhledem ke stanicím. V případě O.-Bartovic se jedná o úhel 250°–305°, O.-Kunčiček 125°–160° a O.-Radvanic o výseč v úhlu 190°–250°. Zbývající úhly do 360° (mimo výseč zahrnující areál Liberty Ostrava a.s.) jsou zahrnuty a označeny „mimo přímý vliv areálu Liberty Ostrava a.s.“.

V hodnocení byla použita interní aplikace ČHMÚ pro výpočet zpětných trajektorií proudění [3]. Metoda umožňuje vyhodnotit zpětnou cestu proudění k zadanému místu. Aplikace je navázána na klimatologickou databázi CLIDATA a připravuje vstupní meteorologická data pro výpočet zpětných trajektorií v hodinovém nebo 10minutovém kroku. Meteorologická data jsou dále interpolována do plochy České republiky a pro zvolenou lokalitu se počítají zpětné (případně dopředu postupující) trajektorie větru. Aplikace zatím nepočítá s orografií terénu, ale s ohledem na nekomplikovaný terén zájmové oblasti je v tomto případě velmi dobře použitelná.

Statistické charakteristiky s rozložením koncentrací s vyznačením mediánových a odlehklých hodnot jsou vyjádřeny pomocí boxplotů. Statistické analýzy a jejich grafické zobrazení byly provedeny pomocí programovacího jazyka R, MS Excel a ArcGIS.

3.4. Metodika identifikace zdrojů znečišťování metodou PMF

Pro identifikaci zdrojů znečišťování ovzduší (posouzení, které zdroje se v hodnoceném místě podílejí na celkové imisní koncentraci hodnocených látek a jaká je velikost jejich imisních příspěvků) byl použit receptorový matematický model PMF. Jedná se o standardní statistickou metodu, mnohorozměrnou faktorovou analýzu, která je k tomuto účelu celosvětově běžně používána. Je založena na vzájemných korelacích časových řad imisních koncentrací jednotlivých analytů a jejich skupin. Analyty s podobným časovým průběhem jsou modelem seskupeny do tzv. faktorů. Tyto identifikované faktory (jejich složení a časový průběh) reprezentují konkrétní zdroje nebo skupiny zdrojů znečišťování ovzduší, které v posuzované lokalitě přispívají ke znečištění ovzduší zájmovou látkou. Pro každý faktor byl modelem vypočten absolutní i relativní podíl PM_{10} na imisní koncentraci hodnocených látek. Z vypočteného podílu benzo[a]pyrenu v jednotlivých faktorech byl následně vypočten podíl zdrojů na imisní koncentraci této škodliviny. Vypracován byl souhrnný model všech tří lokalit, který vede ke stabilnějším (spolehlivějším) výsledkům díky rozsáhlému datasetu a současně umožňuje přímé porovnání lokalit z hlediska podílů jednotlivých faktorů (typů zdrojů znečišťování).

Modelování bylo provedeno v souladu s požadavky manuálu k programu PMF 5.0 [5]. Matematicky stabilní a smysluplně interpretovatelné řešení bylo nalezeno pro 10 faktorů. Základní modelové řešení

(Base Run) se vyznačovalo poměrem Q/Qexp modelu ve výši 0,93. Přiléhavost modelem vypočtené koncentrace k naměřeným hodnotám je vyjádřena koeficientem determinace $R^2=0,97$ v případě PM_{10} a $R^2=0,78$ v případě benzo[a]pyrenu, což je v kontextu dřívějšího použití modelu PMF v jiných lokalitách ČR vyhovující (pro benzo[a]pyren) a až nadstandardně dobrá shoda (pro PM_{10}). Přidaná nejistota modelu dosahovala 12 %. Použito bylo celkem 41 analytů označených jako STRONG a 2 jako WEAK (Si a totální proměnná PM_{10}). Z důvodu nevyhovujícího poměru signál/šum nebo, důvodu nadbytečnosti (duplicita hmoty s jiným analytem, nespecifičnost původu) nebo nedostatečné datové sady (např. měření pouze na jedné z hodnocených lokalit) byly z měřených analytů vyřazeny Al, S, Ni, Cd, In, některé PAH (BbF, BjF, BkF, DBaH, CRY), fluoridy, chloridy, bromidy a plynné polutanty měřené automatickými analyzátoři v lokalitě TORE. Tyto vyřazené analyty byly v modelu označeny jako BAD. Naměřené koncentrace ostatních duplicitních a plyných analytů v datové sadě (např. síry stanovené metodou ED XRF, či oxidů dusíku) byly o 3 řády sníženy, aby významně neovlivňovaly kvantifikaci hmotnostních podílů v PM_{10} .

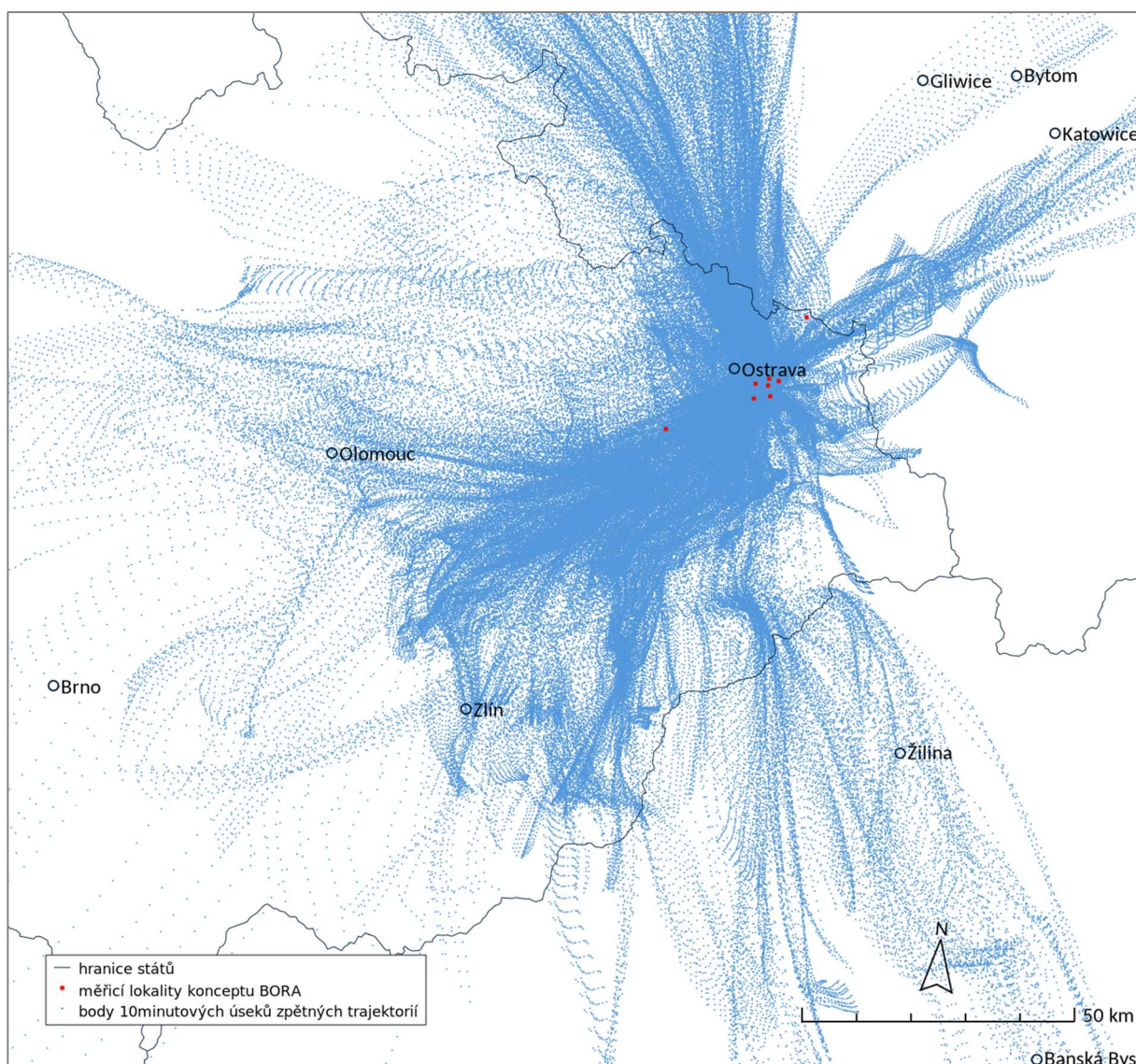
Stabilita řešení byla ověřována především metodou bootstrap (vždy použito 20 testovacích výběrů). Protože základní model (Base Run) nedosahoval v případě některých faktorů dostatečné shody, byla provedena jemná rotace modelového řešení s nejlepšími výsledky při hodnotě $F_{peak}=+0,5$. Přestože toto rotované řešení bylo po matematické stránce dostatečně stabilní (shoda bootstrap řešení $\geq 95\%$), v některých identifikovaných faktorech, které reprezentují primární částice emitované z blízkých zdrojů (jejich popis viz podkapitola 4.1.3.), se projevily méně významné nežádoucí interference některých faktorů. Proto byly stanoveny okrajové podmínky pro běh modelu - obsahy dusičnanů a síranů ve faktorech lokálního individuálního vytápění a obsah uhlíkatých částic ve faktoru reprezentující minerální prašnost byly nastaveny na hodnotu 0. Následně byl proveden takto podmíněný modelový výpočet (Constrained Run). V modelovém řešení upraveném zmíněnými okrajovými podmínkami došlo k přesunu hmoty dusičnanů a síranů z faktorů vytápění domácností do faktorů reprezentujících sekundární aerosol, což se jeví jako odborně správné a smysluplné. Takto upravený model přitom zůstal podle metody bootstrap dostatečně stabilní.

Po interpretaci faktorových profilů bylo provedeno ověření, zda směr, odkud byly do hodnocených lokalit transportovány modelem identifikované typy znečištění, odpovídá poloze skutečných zdrojů. Za tímto účelem byly výsledky modelu v podobě vypočtených imisních příspěvků spárovány s naměřenými hodnotami směru a rychlosti větru. S takto získanou datovou základnou byly provedeny následující analýzy:

- korelace faktorových příspěvků s naměřenými meteorologickými parametry a koncentracemi plynů,
- vážené koncentrační růžice imisních příspěvků jednotlivých faktorů,
- hodnocení metodou CPF (Conditional Probability Function),
- hromadné zpracování zpětných trajektorií, které kromě ověření správnosti interpretace posloužily také k vytěžení dalších užitečných informací z modelových výstupů.

Pro první tři z uvedených analýz byla použita reprezentativní meteorologická data z lokality O.-Bartovice (odůvodnění viz kapitola 4.1.1). Dosažené výstupy jsou obsahem podkapitol 5.5.3. až 5.5.5.

Zpětné trajektorie byly konstruovány pomocí software popsaného v kapitole 3.3., na ně navazující prostorové analýzy byly provedeny v GRASS GIS v. 8.0. Pro hodnocení byly vypracovány zpětné trajektorie s krokem 10 minut pro období celé měřicí kampaně. Souhrnný přehled zpětných trajektorií pro lokalitu TORE, reprezentující období odběru 3hodinových vzorků na filtry, je obsahem Obr. 5. V obrázku jsou vyznačeny body ohraničující 10minutové úseky trajektorií.



Obr. 5 Přehled zpětných trajektorií reprezentujících období měřicí kampaně

Při zpracování výsledků modelu PMF získaných v dřívějších projektech byl zjištěn nedostatek hodnocení spojený s tím, že v blízkosti hodnoceného místa je vysoká hustota trajektorií, která se s rostoucí vzdáleností od zájmového území postupně snižuje. Pro hromadné hodnocení zpětných trajektorií se obvykle využívá agregace dat v pravidelné síti. To v případě všech běžně používaných metod k hromadnému zpracování trajektorií (např. PSCF, CWT) vede k nežádoucímu průměrování vysokých i nízkých hodnot v blízkosti měřicích míst. Vliv bodových nebo plošně málo rozsáhlých plošných zdrojů znečišťování ovzduší je proto často potlačen velkým počtem trajektorií reprezentujících nižší koncentrace. Pro eliminaci tohoto nežádoucího vlivu je potřebná vyšší podrobnost hodnocení v blízkosti měřicích míst, tak, aby počet hodnocených zpětných trajektorií v blízkých a vzdálených buňkách gridu byl podobný. V předkládaném hodnocení byl tento problém vyřešen paprskovou radiální sítí, ve které plocha buňky roste se čtvercem vzdálenosti od měřicího místa, tedy nepřímě úměrně hustotě zpětných trajektorií. Její příprava byla provedena v GIS GRASS s využitím modulu v.voronoi. Analýza zdrojových oblastí znečištění byla provedena přiřazením vypočtených faktorových imisních příspěvků v konkrétním čase jednotlivým zpětným trajektoriím. Následně byl v každé buňce gridu vypočten aritmetický průměr takto přiřazených imisních příspěvků. Výsledné mapy pravděpodobných

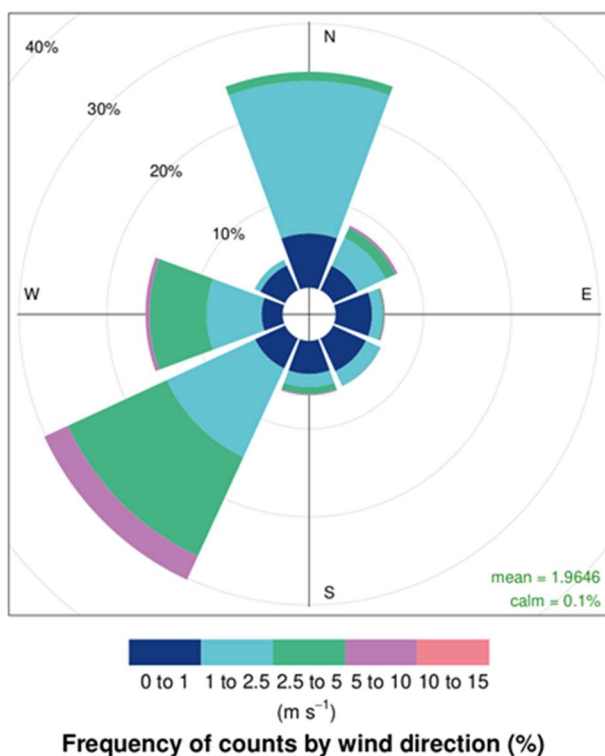
zdrojových oblastí znečištění reprezentovaného jednotlivými modelovými faktory jsou obsahem přílohy 6 a interpretovány v kapitole 5.5.6.

4. Výsledky a hodnocení prací

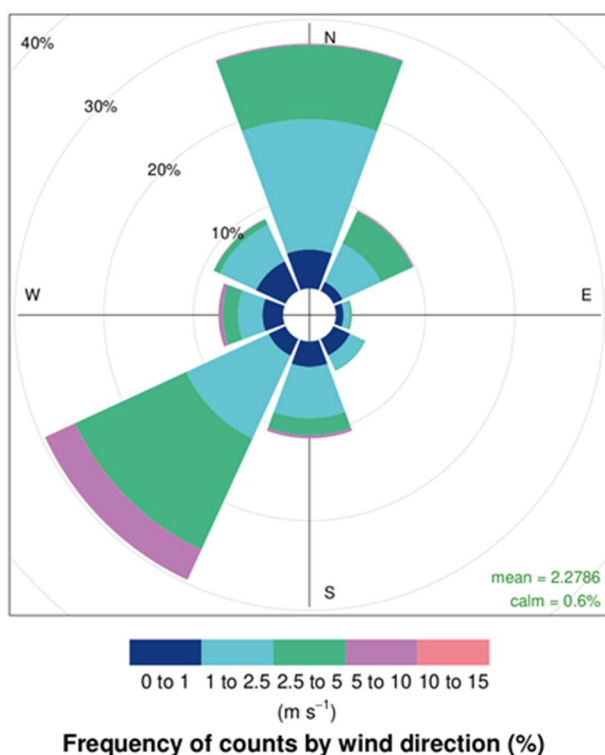
4.1.1. Hodnocení meteorologických podmínek a kvality ovzduší

Pro hodnocení vlivu zdrojů znečišťování na kvalitu ovzduší v dané lokalitě jsou nejdůležitějšími meteorologickými veličinami směr a rychlost větru. V období 14. 1. až 14. 4. 2021 převládalo proudění z jihozápadního sektoru, dále pak ze severního sektoru ve směru od stanic (Obr. 6).

Větrná růžice za uvedené období byla porovnána s větrnou růžicí pro desetiletý průměr stejného období za roky 2012–2021 z klimatologické stanice Ostrava-Poruba (Obr. 7), která je reprezentativní stanicí pro Ostravu. Smyslem hodnocení bylo posoudit, zda v období 14. 1.–14. 4. 2021 nedošlo k významným meteorologickým extrémům. Parametry směru a rychlosti větru za období 14. 1.–14. 4. 2021 nevykazují žádný extrém ani významné odchýlení od dlouhodobého desetiletého průměru za stejné období.

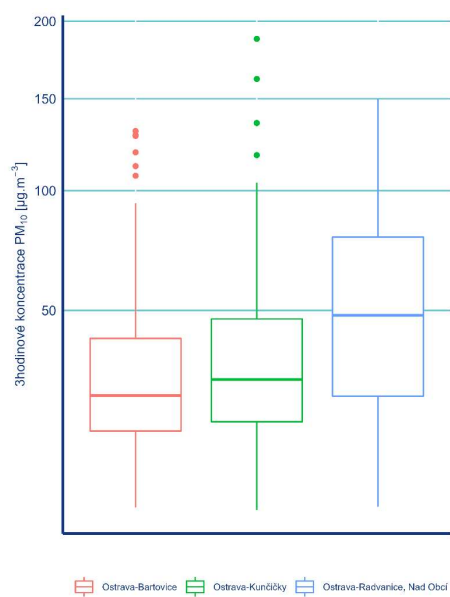


Obr. 6 Větrná růžice, Ostrava-Bartovice, 14. 1.–14. 4. 2021

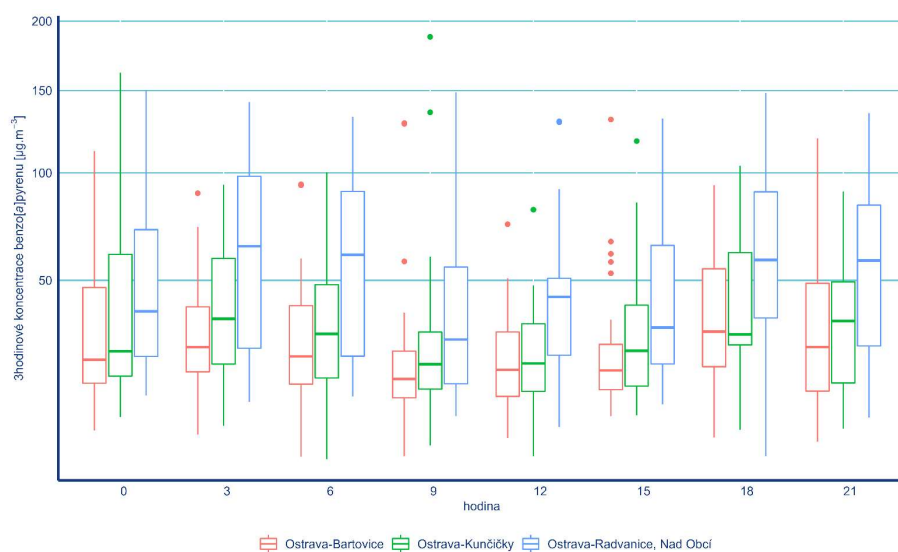


Obr. 7 Větrná růžice, Ostrava-Poruba, 14. 1.–14. 4. 2012–2021

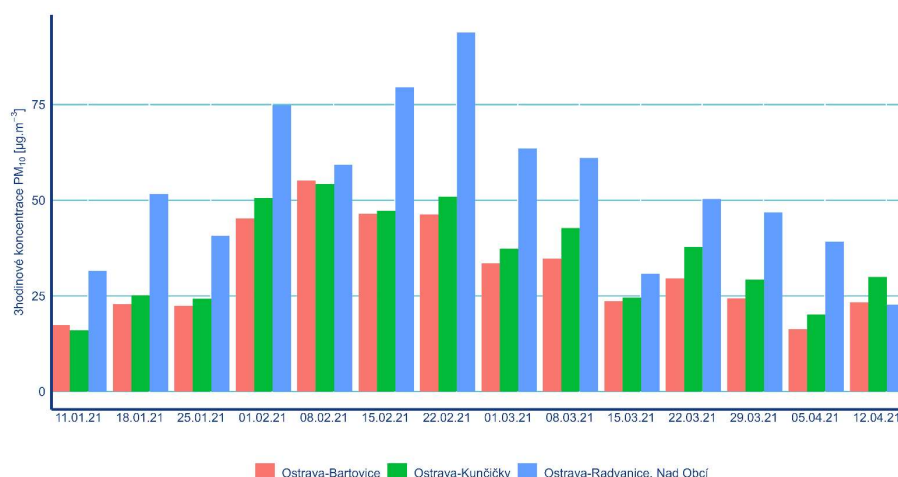
Nejvyšší průměrné 3hodinové koncentrace PM_{10} byly v období 14. 1. až 14. 4. 2021 dosaženy v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí a v průměru byly zhruba o $20 \mu\text{g.m}^{-3}$ vyšší než v lokalitě O.-Kunčičky a o $23 \mu\text{g.m}^{-3}$ než v O.-Bartovicích. Rovněž počet 3hodinových průměrných hodnot PM_{10} nad $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ byl výrazně, více než dvojnásobně, vyšší v O.-Radvanicích než na dalších dvou stanicích (O.-Radvanice $114 \mu\text{g.m}^{-3}$, O.-Kunčičky $49 \mu\text{g.m}^{-3}$, O.-Bartovice $42 \mu\text{g.m}^{-3}$). Maximální 3hodinová koncentrace PM_{10} $188 \mu\text{g.m}^{-3}$ však byla dosažena v lokalitě O.-Kunčičky. Horní kvartil vypočtený ze všech 3hodinových koncentrací PM_{10} dosahuje v lokalitě O.-Radvanice hodnoty $78 \mu\text{g.m}^{-3}$, O.-Kunčičky $46 \mu\text{g.m}^{-3}$ a v O.-Bartovicích $41 \mu\text{g.m}^{-3}$ (Obr. 8). Při porovnání průměrných 3hodinových koncentrací PM_{10} v průběhu dne bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty byly dosaženy v intervalu 3–6 hod., 6–9 hod., 18–21 hod. a 21–0 hod., naopak nejnižší mezi 9. a 15. (resp. 18.) hod. (Obr. 9). Chod koncentrací PM_{10} lze sledovat na Obr. 10, kde jsou vyneseny průměrné koncentrace PM_{10} rozdělené do jednotlivých týdnů období 14. 1.–14. 4. 2021. Nejvyšší průměrné týdenní koncentrace PM_{10} byly v období od 1. 2. do 14. 3., přičemž nejvyšších hodnot dosahuje lokalita O.-Radvanice (s výjimkou týdne 12.–18. 4. 2021, kdy byla nejvyšší průměrná koncentrace PM_{10} v lokalitě O.-Kunčičky).



Obr. 8 Statistické rozložení průměrných 3hodinových koncentrací PM_{10} , 14. 1.–14. 4. 2021

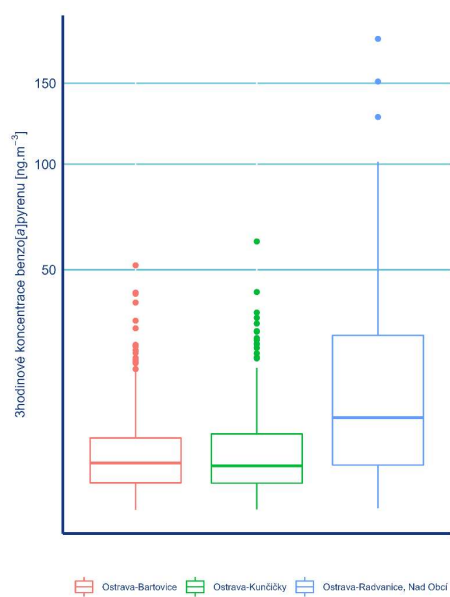


Obr. 9 Denní chod a statistické rozložení 3hodinových koncentrací PM_{10} , 14. 1.–14. 4. 2021

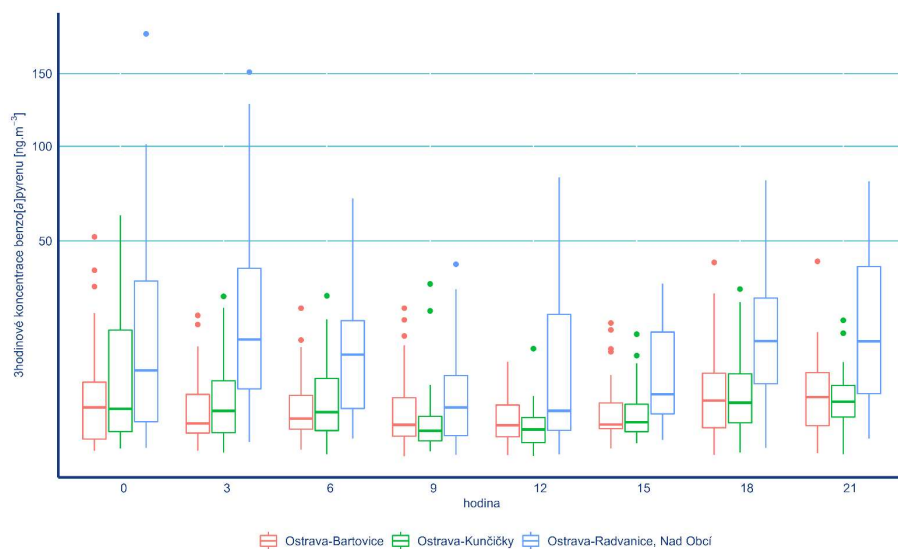


Obr. 10 Průměrné koncentrace PM_{10} rozdělené do týdnů období 14. 1.–14. 4. 2021

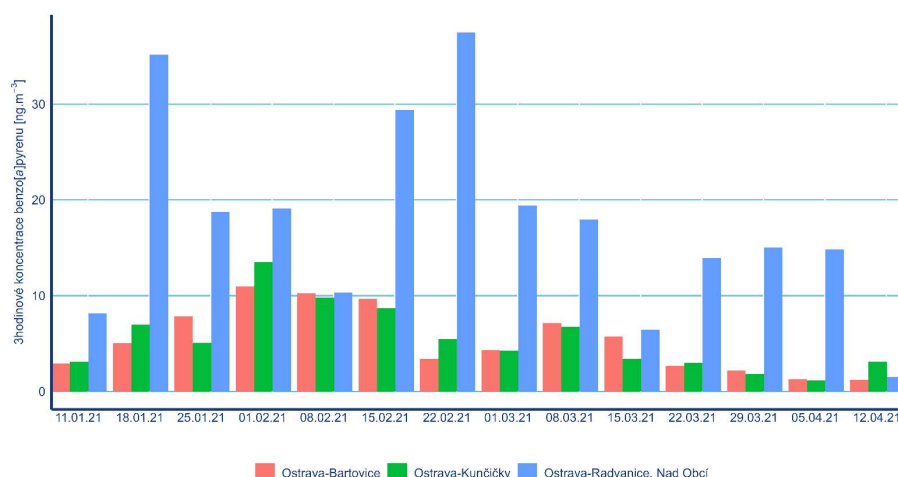
Průměrné 3hodinové koncentrace benzo[*a*]pyrenu se pohybovaly ve vysokých hodnotách na všech třech stanicích. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí. Průměrná koncentrace za období 14. 1. až 14. 4. 2021 byla $18,9 \text{ ng.m}^{-3}$, medián téměř $8,8 \text{ ng.m}^{-3}$ a maximální 3hodinová koncentrace $181,7 \text{ ng.m}^{-3}$ byla zjištěna 25. 2. 2021. Koncentrace benzo[*a*]pyrenu v lokalitách Ostrava-Kunčičky a Ostrava-Bartovice byly nižší než v Ostravě-Radvanicích a při vzájemném porovnání průměrných, mediánových i kvartilových hodnot si byly podobné. V lokalitě Ostrava-Kunčičky byla průměrná koncentrace za období 14. 1. až 14. 4. 2021 $5,7 \text{ ng.m}^{-3}$, medián téměř $2,7 \text{ ng.m}^{-3}$ a maximální 3hodinová koncentrace $61,7 \text{ ng.m}^{-3}$. V lokalitě Ostrava-Bartovice byla průměrná koncentrace rovněž $5,7 \text{ ng.m}^{-3}$, medián téměř $2,9 \text{ ng.m}^{-3}$ a maximální 3hodinová koncentrace $51,7 \text{ ng.m}^{-3}$ (Obr. 11). Maximální 3hodinové koncentrace benzo[*a*]pyrenu se vyskytovaly převážně v nočních a brzkých ranních hodinách (182 ng.m^{-3} – 25. 2. 2021 v 0 hod.; 151 ng.m^{-3} – 18. 1. 2021 ve 3 hod.; 127 ng.m^{-3} – 26. 2. 2021 ve 3 hod.). Nejnižších průměrných 3hodinových koncentrací bylo dosaženo mezi 9. a 15. (resp. 18.) hodinou (Obr. 12). Chod koncentrací v týdenním kroku lze sledovat na Obr. 13. Jednoznačně nejvyšší průměrné týdenní koncentrace byly dosaženy na stanici O.-Radvanice, Nad Obcí. Výjimku tvoří týden 8.–14. 2., kdy byly průměrné týdenní koncentrace na všech třech lokalitách poměrně vyrovnané a týden od 12. 4., kdy byla nejvyšší koncentrace na stanici O.-Kunčičky.



Obr. 11 Statistické rozložení průměrných 3hodinových koncentrací BaP, 14. 1.–14. 4. 2021

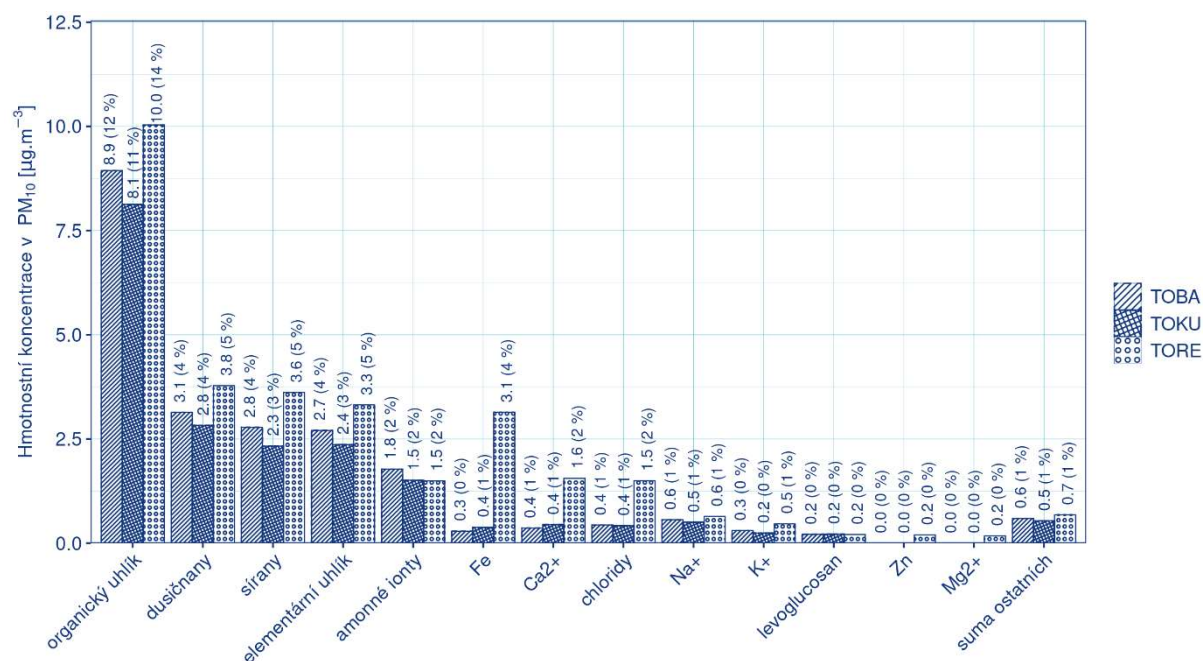


Obr. 12 Denní chod a statistické rozložení 3hodinových koncentrací BaP, 14. 1.–14. 4. 2021



Obr. 13 Průměrné koncentrace BaP rozdělené do týdňů období 14. 1.–14. 4. 2021

Laboratorním stanovením imisních koncentrací měřených analytů v aerosolu PM₁₀ bylo zjištěno jeho průměrné složení za dobu odběrové kampaně, které dokládá Obr. 14.



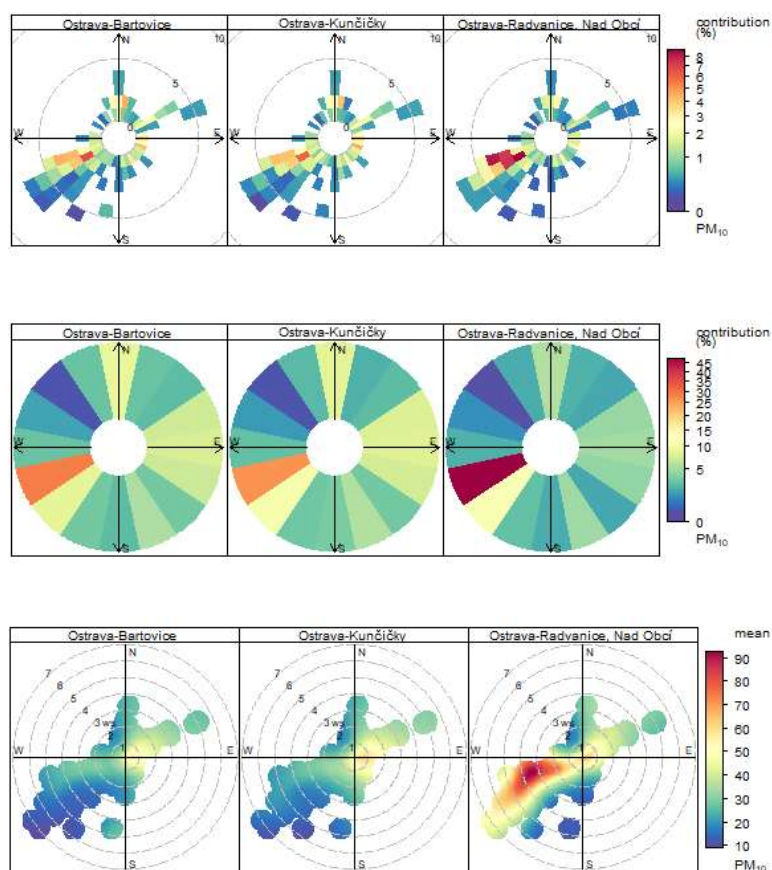
Obr. 14 Hmotnostní složení aerosolu PM₁₀

Největší část hmoty částic zachycených na filtrech byla tvořena organickým uhlíkem (cca 12 až 14 %), jehož koncentrace byly podobné na všech třech lokalitách. Významnými složkami byly síraný a dusičnany, které tvořily hlavní část sekundárního anorganického aerosolu (v součtu celkem cca 7 až 10 %, s mírně vyššími koncentracemi v lokalitě O.-Radvanice, Nad Obcí. Elementární uhlík tvořil cca 3 až 5 % hmotnosti PM₁₀, přibližně 2 % připadaly na amonné ionty, pravděpodobně ve formě dusičnanu a síranu amonného, s velmi podobným podílem ve všech měřicích lokalitách. V lokalitě TORE stojí za zmínku násobně vyšší podíl železa, vápníku, resp. vápenatých iontů, a chloridů oproti ostatním dvěma lokalitám. Železo zde tvořilo cca 4 % PM₁₀, vápenaté ionty a chloridy okolo 2 %.

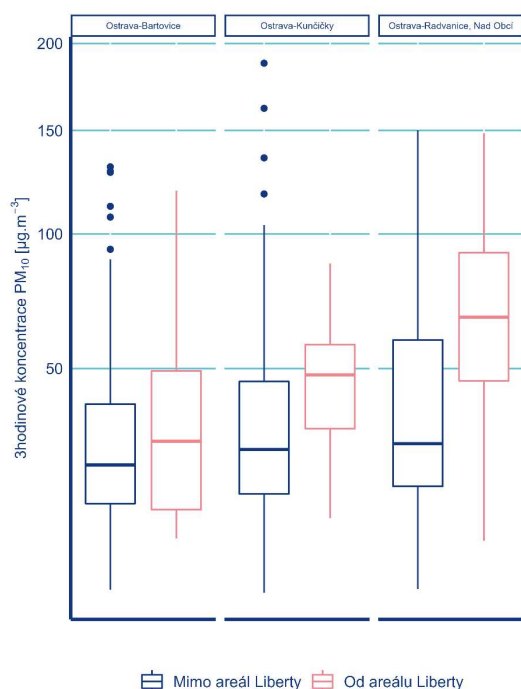
4.1.2. Identifikace zdrojů na základě imisně-meteorologických vztahů

Koncentrace PM_{10} v závislosti na směru a rychlosti větru jsou znázorněny na Obr. 15. Vážená koncentrační růžice (Obr. 15 nahoře) prezentuje nejvyšší četnost průměrných příspěvků PM_{10} z jihozápadního sektoru na všech třech stanicích. Nejvyšší příspěvky přicházely do lokalit O.-Bartovice a O.-Kunčičky při rychlostech větru $1\text{--}2\text{ m.s}^{-1}$, v lokalitě O.-Radvanice $1\text{--}4\text{ m.s}^{-1}$. Na Obr. 15 uprostřed je pro zjednodušenou názornost prezentována vážená koncentrační růžice bez zahrnutí rychlosti větru. Koncentrační růžice na Obr. 15 dole ukazují, že v lokalitách O.-Bartovice a O.-Kunčičky přicházely maximální koncentrace PM_{10} z východního sektoru při rychlosti větru do $1,5\text{ m.s}^{-1}$; v lokalitě O.-Radvanice z ZJZ až JZ směru při rychlostech větru 2 až $4,5\text{ m.s}^{-1}$.

Při hodnocení možného vlivu areálu Liberty Ostrava a.s. na imisní zatížení PM_{10} je zřejmé (Obr. 16, Tab. 1), že mediánové hodnoty i průměrné hodnoty PM_{10} jsou na všech lokalitách vyšší při směru od areálu Liberty Ostrava a.s., ale maximální 3hodinové koncentrace PM_{10} se vyskytovaly také při směru proudění z oblasti mimo areál Liberty Ostrava a.s. Pokud vypočteme procentuální podíl vlivu na celkovém imisním zatížení koncentracemi PM_{10} v dané lokalitě, převažuje v lokalitách O.-Bartovice a O.-Kunčičky vliv směru mimo areál Liberty Ostrava a.s. (88 % a 93 %), ovšem v lokalitě O.-Radvanice převažuje vliv na imisní zatížení PM_{10} ze směru od areálu Liberty Ostrava a.s. v 57 % (Tab. 1).



Obr. 15 Vážené koncentrační růžice (nahore), vážené koncentrační růžice bez zahrnutí rychlosti větru (uprostřed) a koncentrační růžice (dole) pro PM_{10} , 14. 1.–14. 4. 2021



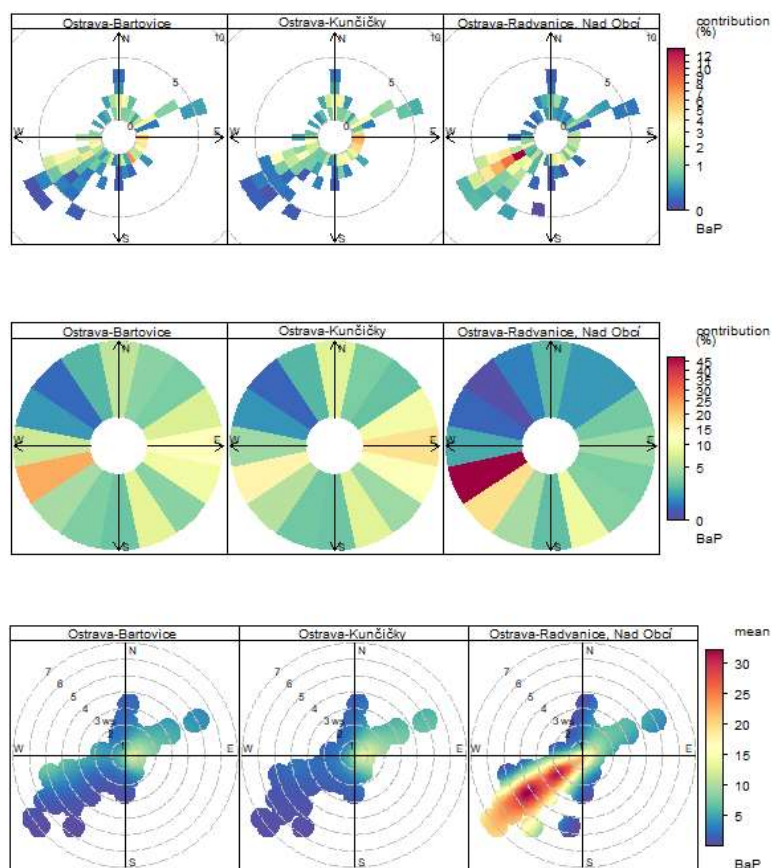
Obr. 16 Statistické rozložení průměrných 3hodinových koncentrací PM_{10} rozdělené dle proudění od areálu Liberty Ostrava a.s. a z ostatních směrů, 14. 1.–14. 4. 2021

Tab. 1 Průměrné koncentrace PM_{10} a procentuální vliv na imisní zatížení PM_{10} v lokalitách dle proudění od areálu Liberty Ostrava a.s. a z ostatních směrů, 14. 1.–14. 4. 2021

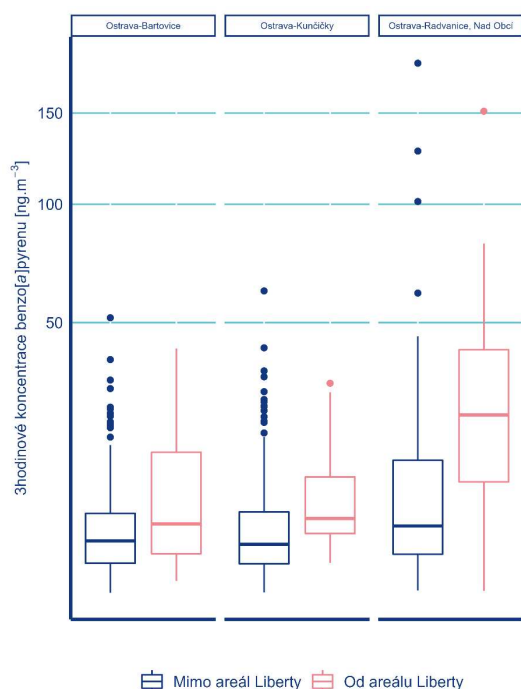
Lokalita	Směr od	Průměrná koncentrace pro daný směr	%
Ostrava-Bartovice	Mimo areál Liberty	32.0	88
Ostrava-Bartovice	Od areálu Liberty	37.9	12
Ostrava-Kunčičky	Mimo areál Liberty	35.7	93
Ostrava-Kunčičky	Od areálu Liberty	47.9	7
Ostrava-Radvanice, Nad Obcí	Mimo areál Liberty	43.8	43
Ostrava-Radvanice, Nad Obcí	Od areálu Liberty	70.4	57

Vážené koncentrační růžice pro benzo[*a*]pyren a lokality O.-Bartovice a O.-Radvanice, Nad Obcí, ukazují na nejčtenější příspěvky z ZJZ směru, u lokality O.-Kunčičky ze směru východního. V případě lokality O.-Bartovice byly však v průměru nižší o 15 až 20 % než v O.-Radvanicích. Nejvyšší průměrné příspěvky v O.-Radvanicích byly dosahovány nejčastěji při rychlostech větru 1–2 m.s⁻¹, ale také až do 4 m.s⁻¹ (Obr. 17 nahoře a uprostřed). Maximální příspěvky benzo[*a*]pyrenu, ovšem několikanásobně nižší než v lokalitě O.-Radvanice, přicházely na stanice O.-Bartovice a O.-Kunčičky převážně z východního sektoru, na stanici O.-Radvanice jednoznačně z JZ sektoru (Obr. 17 dole).

Ze statistického rozložení 3hodinových koncentrací benzo[*a*]pyrenu ze směru od a mimo areál Liberty Ostrava a.s. (Obr. 18) lze vysledovat vyšší mediánové i průměrné hodnoty benzo[*a*]pyrenu ve všech lokalitách při směru proudění od areálu Liberty Ostrava a.s. Vyšší výskyt maximálních 3hodinových koncentrací benzo[*a*]pyrenu byl registrován také při proudění ze směrů mimo areál Liberty Ostrava a.s. Nejvyšší průměrná koncentrace benzo[*a*]pyrenu při směru proudění od Liberty Ostrava a.s. byla na stanici O.-Radvanice, Nad Obcí 28,4 ng.m⁻³ (O.-Bartovice 9,6 ng.m⁻³; O.-Kunčičky 10 ng.m⁻³). V lokalitách O.-Bartovice a O.-Kunčičky výrazně převažoval procentuální podíl vlivu na imisním zatížení koncentracemi benzo[*a*]pyrenu ze směru mimo areál Liberty Ostrava a.s. (83 % a 90 %). V lokalitě O.-Radvanice, Nad Obcí významně převládalo v 67 % imisní zatížení benzo[*a*]pyrenu při směru proudění od areálu Liberty Ostrava a.s. (Tab. 2).



Obr. 17 Vážené koncentrační růžice (nahore), vážené koncentrační růžice bez zahrnutí rychlosti větru (uprostřed) a koncentrační růžice (dole) pro BaP, 14. 1.–14. 4. 2021



Obr. 18 Statistické rozložení průměrných 3hodinových koncentrací BaP rozdělené dle proudění od areálu Liberty Ostrava a.s. a z ostatních směrů, 14. 1.–14. 4. 2021

Tab. 2 Průměrné koncentrace BaP a procentuální vliv na imisní zatížení BaP v lokalitách dle proudění od areálu Liberty Ostrava a.s. a z ostatních směrů, 14. 1.–14. 4. 2021

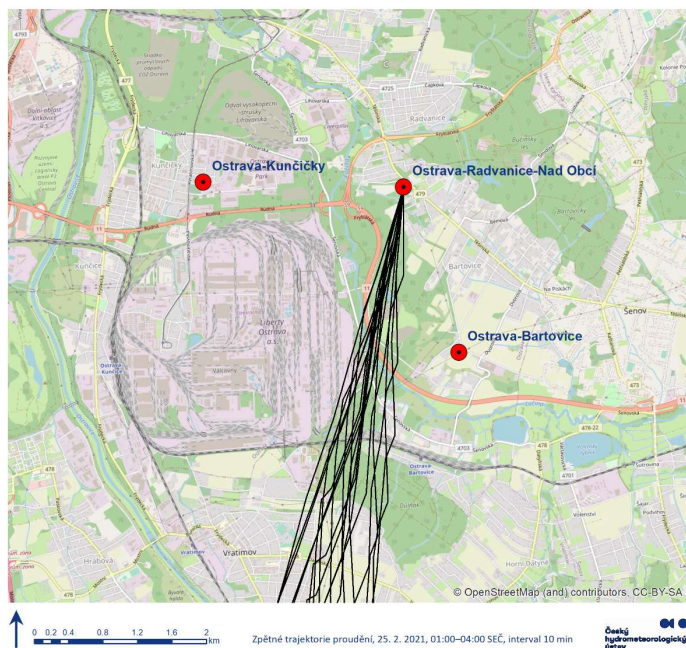
Lokalita	Směr od	Průměrná koncentrace pro daný směr	%
Ostrava-Bartovice	Mimo areál Liberty	5.3	83
Ostrava-Bartovice	Od areálu Liberty	9.6	17
Ostrava-Kunčičky	Mimo areál Liberty	5.4	90
Ostrava-Kunčičky	Od areálu Liberty	10.0	10
Ostrava-Radvanice, Nad Obcí	Mimo areál Liberty	11.3	33
Ostrava-Radvanice, Nad Obcí	Od areálu Liberty	28.4	67

S ohledem na významně vyšší naměřené koncentrace benzo[a]pyrenu v lokalitě O.-Radvanice, Nad Obcí, byla s využitím dat z této stanice provedena podrobná analýza směru větru, při kterém byly naměřeny nejvyšší imisní koncentrace této znečišťující látky. Vybrány byly proto k hodnocení všechny čtyři 3hodinové průměrné koncentrace naměřené v lokalitě O.-Radvanice, Nad Obcí, s hodnotou nad 100 ng.m⁻³:

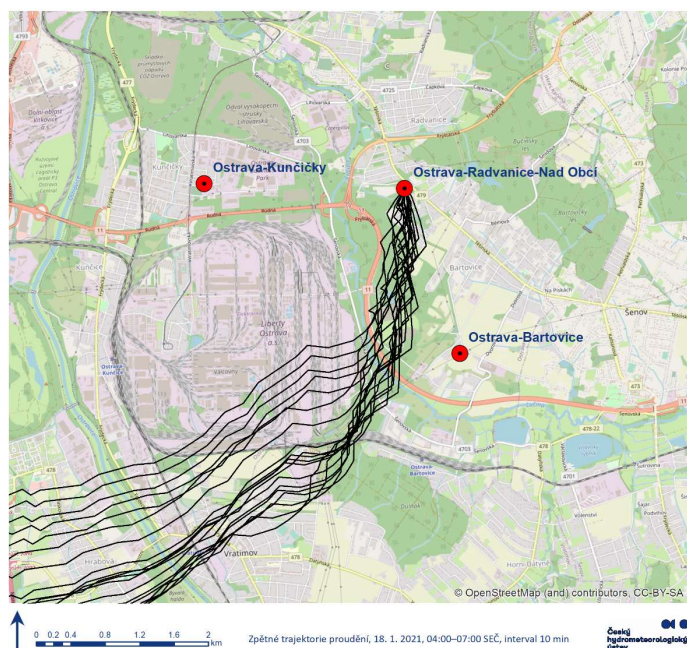
- 25. 2. 2021 – 0 UTC – 3hodinová koncentrace benzo[a]pyrenu 181,7 ng.m⁻³ (ze směru proudění mimo areál Liberty Ostrava a.s.),
- 18. 1. 2021 – 3 UTC - 3hodinová koncentrace benzo[a]pyrenu 151 ng.m⁻³ (ze směru proudění od areálu Liberty Ostrava a.s.),
- 26. 2. 2021 – 3 UTC - 3hodinová koncentrace benzo[a]pyrenu 127 ng.m⁻³ (ze směru proudění mimo areál Liberty Ostrava a.s.),

- 3. 3. 2021 – 3 UTC - 3hodinová koncentrace benzo[a]pyrenu $101,3 \text{ ng.m}^{-3}$ (ze směru proudění mimo areál Liberty Ostrava a.s.).

Z výše uvedeného přehledu případů s vysokými koncentracemi vyplývá, že pouze jeden reprezentuje směr proudění jednoznačně od areálu Liberty Ostrava a.s., což vedlo ke snaze podrobněji ověřit směr a rychlost větru ve vytipovaných termínech a zpracovat pro vybrané konkrétní situace zpětné trajektorie větru v 10minutovém kroku. Výsledky analýzy těchto zpětných trajektorií proudění jsou znázorněny na obrázcích 19–22. Obrázek 20 pro 18. 1. 2021 potvrzuje vliv emisí při proudění od areálu Liberty Ostrava a.s., kdy v části 3hodinového intervalu s naměřenou vysokou koncentrací benzo[a]pyrenu 151 ng.m^{-3} , procházejí zpětné trajektorie proudění jižní částí tohoto průmyslového areálu. Vysoká pravděpodobnost vlivu tohoto zdroje v areálu Liberty Ostrava a.s. na 3hodinovou koncentraci benzo[a]pyrenu je také zřejmá z Obr. 21 v případě hodnoty 127 ng.m^{-3} z 26. 2. 2021 mezi 4. až 7. hod. SEČ (3–6 hod. UTC). Ani ve dnech 18. 1. a 26. 2. 2021 nelze vliv areálu Liberty Ostrava a.s. na zvýšení 3hodinových koncentrací vyloučit, přestože není jednoznačný. Okrajově procházejí jihovýchodní částí uvedeného areálu i zpětné trajektorie zpracované pro tyto termíny. Je proto pravděpodobné, že nejvyšší naměřené imisní koncentrace benzo[a]pyrenu v lokalitě O.-Radvanice, Nad Obcí, byly způsobeny přenosem z areálu Liberty Ostrava a.s.



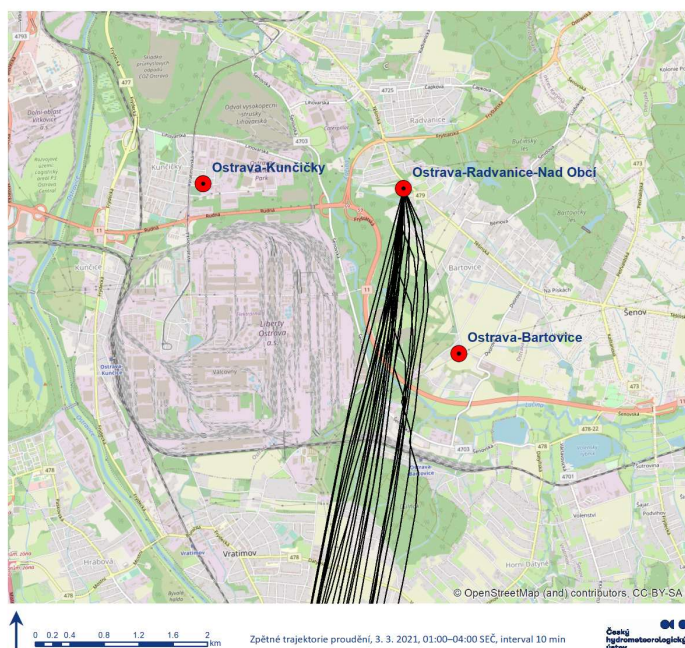
Obr. 19 Zpětné trajektorie proudění, 10minutový interval, 25. 2. 2021, 01–04 hod. SEČ



Obr. 20 Zpětné trajektorie proudění, 10minutový interval, 18. 1. 2021, 04–07 hod. SEČ



Obr. 21 Zpětné trajektorie proudění, 10minutový interval, 26. 2. 2021, 01–04 hod. SEČ



Obr. 22 Zpětné trajektorie proudění, 10minutový interval, 3. 3. 2021, 04–07 hod. SEČ

4.1.3. Identifikace zdrojů metodou PMF

Výsledné stabilní modelové řešení zahrnuje následující faktory, jejichž chemické složení a časový průběh je obsahem příloh 1 a 2. Denní chod imisních příspěvků jednotlivých faktorů vyhodnocený na základě 3hodinových koncentrací je doložen grafy v příloze 3.

HEAT CC

Primární částice z vytápění domácností uhlím. Vysoké zastoupení EC, OC, PAH a chloru v chloridové formě, s akcesorií bromidů. V EC a OC převažovaly nízkoteplotní frakce. Z kovů nejvýznamnější zastoupení As, Se a Pb. Výrazně kolísavé imisní příspěvky běžně nabývaly hodnot okolo $10 \mu\text{g.m}^{-3}$, špičkově až $40 \mu\text{g.m}^{-3}$, se zřetelným klesajícím trendem v průběhu měřicí kampaně (leden až duben). Faktor se vyznačoval výrazně vyššími hodnotami imisního příspěvku v noci.

HEAT BB

Primární částice z vytápění domácností biomasou. Vysoké zastoupení OC, anhydrosacharidů a draslíku v iontové formě. PAH ve výrazně nižších koncentracích než ve faktoru reprezentujícím vytápění uhlím. V uhlíkatých částicích převažovaly nízkoteplotní frakce. Významné zastoupení K v iontové formě, z kovů významné pouze Zn a Cu. Časový chod příspěvku byl výrazně kolísavý, běžně nabýval hodnot okolo $10 \mu\text{g.m}^{-3}$, špičkově až téměř $50 \mu\text{g.m}^{-3}$. Zřetelný je klesající trend příspěvku v průběhu měřeného období. Faktor s výrazně vyššími hodnotami imisního příspěvku v noci.

CRUSTAL

Primární částice tvořené minerálními částicemi (Si, Ti, Ba, K, Mg). Převážně se jedná o částice přírodního původu. Časový průběh faktorového imisního příspěvku se vyznačoval dominantním krátkodobým příspěvkem v rozmezí 40

až více než $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ mezi 24. a 27. 2. 2021, tedy během epizody dálkového přenosu aerosolu z oblasti Sahary. Po zbytek měřeného období model vykazuje imisní příspěvky tohoto faktoru blízké nule nebo na úrovni šumu, který je způsoben pravděpodobně interferencí s jinými faktory. Faktor neměl průkazný denní chod. Podíl Ca v chemickém profilu je z důvodu interference s níže uvedeným faktorem IND Ca pravděpodobně podhodnocen.

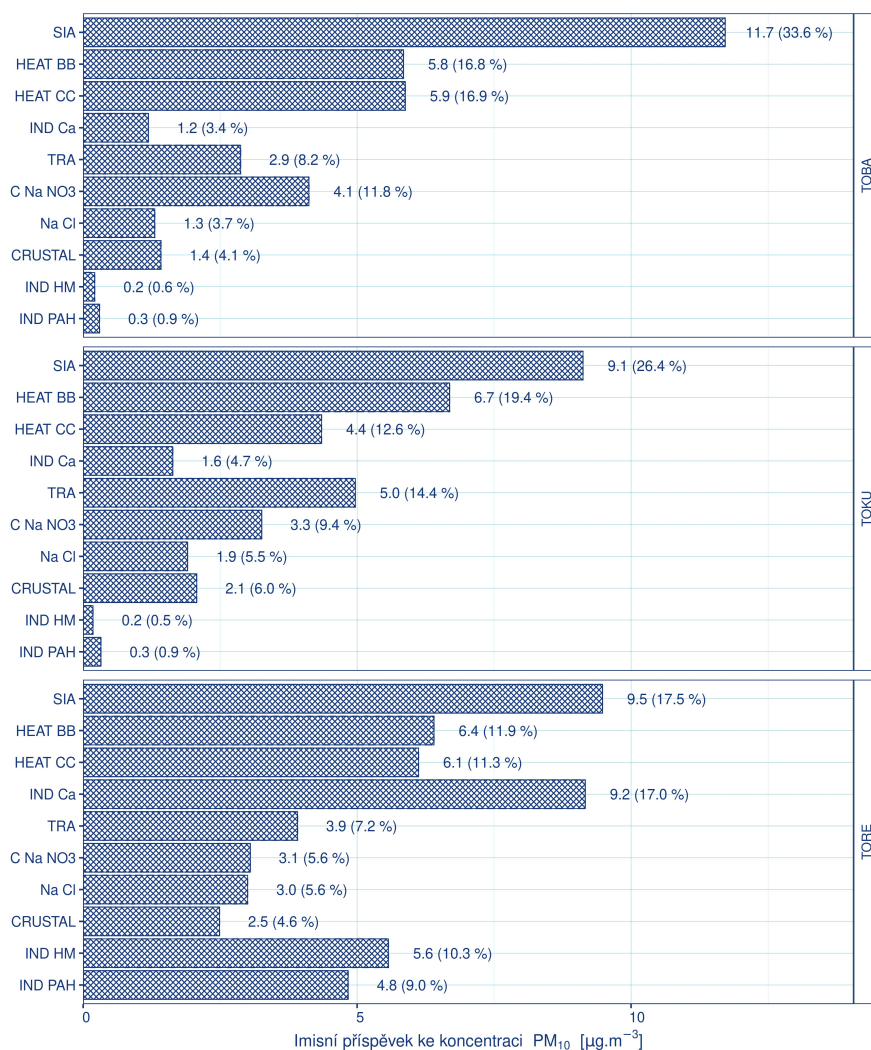
Na-Cl	Primární částice tvořené sodíkem v iontové formě, hořčíkem a chloridy. Nevýrazné akcesorické zastoupení dalších prvků typických pro resuspenzi a otěry ze silniční dopravy (Ba, Cu, Cr, Sb) naznačuje hlavní původ této soli v chemickém posypu vozovek, částečně také v areálu Liberty Ostrava a.s. Časový chod imisního příspěvku byl ve srovnání s ostatními faktory středně kolísavý, s významnými odlišnostmi mezi lokalitami, obvykle v nižších jednotkách $\mu\text{g.m}^{-3}$, výjimečně přes $10 \mu\text{g.m}^{-3}$. Faktor neměl průkazný denní chod.
IND Ca	Primární částice tvořené převážně Ca a Mg v doprovodu Sb, méně významně také V a Mn. Jedná se o částice z průmyslového nakládání se sypkými materiály, převážně v severovýchodní části areálu podniku Liberty Ostrava a.s. Faktor měl významný imisní příspěvek v lokalitě TORE. V lokalitě TOBA byl nezřetelný vliv faktoru spojen se skládkami sypkých hmot v jihovýchodní části areálu uvedeného podniku, v lokalitě TOKU nastávaly občasné příspěvky faktoru vlivem transportu částic z oblasti teplého hutního odvalu severovýchodně od měřicího místa. Časový chod byl silně kolísavý s krátkodobými špičkami a extrémními odlišnostmi mezi měřicími lokalitami, v lokalitě TORE s krátkodobými píky v desítkách $\mu\text{g.m}^{-3}$. Denní chod byl v lokalitě TORE výrazně kolísavý s vyššími hodnotami v noci a ráno mezi 6. a 9. hodinou, v ostatních lokalitách bez zjevného trendu.
IND HM	Primární částice s komplexním polymetalickým složením (Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, As, méně významně také Cr, V, Sb, Ca a Cl). Skladba s dominantním zastoupením Mn a Fe je typická pro částice z výroby železa a oceli. Imisní příspěvek byl zásadně odlišný na jednotlivých lokalitách. Relativně velmi významný (řádově vyšší) byl oproti ostatním měřicím místům v lokalitě TORE, jinde se jednalo o hodnoty blízké nule. Časový průběh imisního příspěvku ke koncentraci PM_{10} byl extrémně kolísavý, v lokalitě TORE s krátkodobými píky v desítkách $\mu\text{g.m}^{-3}$. Jeho denní chod byl výrazně nerovnoměrný.
IND PAH	Primární částice s dominantním zastoupením polycyklických aromatických uhlovodíků a železa, s uhlíkatými částicemi tvořenými téměř výhradně vysokoteplotními frakcemi EC3 a zejména EC4. Časový průběh faktorového imisního příspěvku byl silně kolísavý a specifický pro lokalitu TORE, jinde málo významný. Vysoký podíl železa ve faktorovém profilu je důsledkem interference s faktorem IND HM, naznačuje původ v geograficky stejné oblasti. Železo je také nositelem hmotnostního příspěvku tohoto faktoru ke koncentraci PM_{10} , který nabýval v lokalitě TORE hodnot až prvních desítek $\mu\text{g.m}^{-3}$. Denní chod příspěvku byl neprůkazný.
TRA	Primární uhlíkaté částice ze silniční dopravy. V chemické skladbě relativně převažovaly elementární uhlík nad organickým, zejména vysokoteplotní frakce EC3, a skupina kovů typických pro otěry a resuspenzi ze silniční dopravy (Cr, Cu, Ba, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Sb). V kontextu ostatních faktorů byl imisní příspěvek

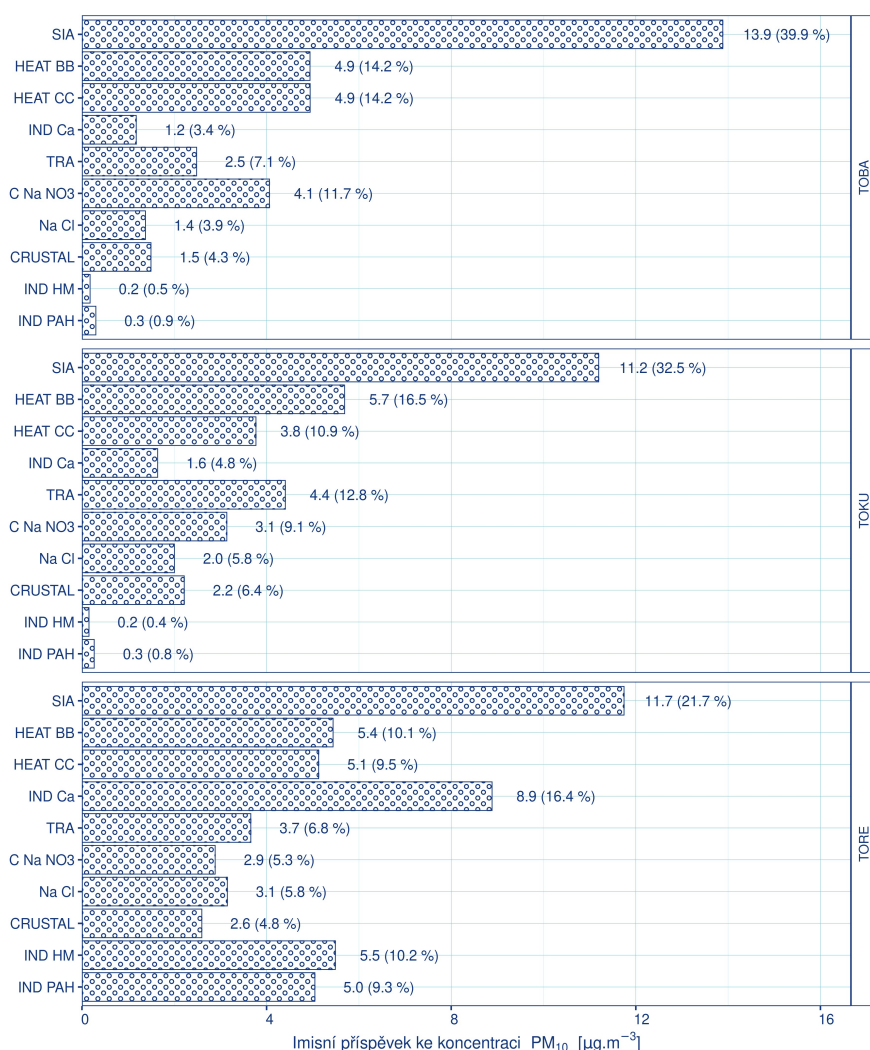
k PM_{10} středně kolísavý s nevýrazně rostoucím trendem v průběhu měřicí kampaně. Nejvyšších hodnot dosáhl v lokalitě TOKU, nejnižší v lokalitě TOBA. Pohyboval se obvykle v jednotkách $\mu g \cdot m^{-3}$, výjimečně nad $10 \mu g \cdot m^{-3}$. Denní chod příspěvku byl málo výrazný, s mírně vyššími hodnotami ve dne.

SIA	Sekundární částice převážně anorganické povahy, sestávající především ze síranu a dusičnanu amonného. Z kovů významný podíl Se, zřetelný doprovod Pb. Plynulý časový průběh imisního příspěvku s nízkou kolísavostí, bez denního chodu a s klesajícím trendem v průběhu kampaně. Jedná se o zimní typ sekundárního aerosolu s komplexním původem, na kterém se významně podílelo především vytápění domácností, pravděpodobně také automobilová doprava a průmyslové emise. Imisní příspěvky obvykle okolo $10 \mu g \cdot m^{-3}$, s občasnými zvýšenými hodnotami v desítkách $\mu g \cdot m^{-3}$, při epizodě zhoršené kvality ovzduší mezi 9. 2. až 11. 2. 2021 až přes $80 \mu g \cdot m^{-3}$.
C-Na-NO ₃	Obtížně interpretovatelný faktor tvořený směsí vysokoteplotních organických uhlíkatých částic, solných částic a dusičnanů. Hmotnostně hlavní část tohoto typu znečištění tvoří pravděpodobně sekundární organický aerosol a dusičnan sodný. Navzdory obtížné interpretaci se jedná o velmi stabilní faktor ve všech testovaných 5 až 11 faktorových modelových řešeních, a to i při postupném vynětí hlavních analytů tohoto faktoru z datasetu. Imisní příspěvek faktoru ke koncentraci PM_{10} se pohyboval stabilně na všech lokalitách v rozmezí 0 až $10 \mu g \cdot m^{-3}$, s mírně vyšším příspěvkem ve dne, zejména v časně odpoledních hodinách, se statisticky málo významnou kladnou korelací s teplotou. Vzhledem k řadě hodnocených aspektů v předkládané zprávě se pravděpodobně jedná o zimní, převážně sekundární aerosol indukovaný minimálně zčásti fotochemickými procesy z emisí oxidů dusíku a uhlíkatých částic z dopravy a vytápění. Časový průběh a malé rozdíly mezi lokalitami naznačují regionální původ.

Modelové imisní příspěvky ke koncentraci PM_{10}

Modelem vypočtené imisní příspěvky jednotlivých faktorů ke koncentraci PM_{10} v období měřicí kampaně dokumentují grafy na Obr. 23 (model Fpeak s rotací +0,5) a Obr. 24 (výsledný Constrained Run model – viz kapitola 3.4).

Obr. 23 Podíl identifikovaných faktorů na imisní koncentraci PM_{10} (Fpeak Run)



Obr. 24 Podíl identifikovaných faktorů na imisní koncentraci PM_{10} (Constrained Run)

Z porovnání uvedených variant modelu vyplývá, že rozdíly mezi nimi jsou málo významné. Největší odchylka podle očekávání nastala v případě podílu sekundárního anorganického aerosolu (faktor „SIA“). V případě výsledného řešení (Constrained Run) je podíl tohoto typu znečištění o cca 4 až 6 % vyšší.

Hmotnostně nejvýznamnější byl faktor „SIA“, sekundární anorganický aerosol tvořený převážně síranem a dusičnanem amonným, s podílem přibližně 20 až 40 % hmotnostní koncentrace PM_{10} .

Druhým a třetím nejvýznamnějším faktorem jsou dle výsledného modelu vytápění domácností biomasou („HEAT BB“) a uhlím („HEAT CC“) s relativně podobným podílem jednotlivě 10 až 15 %, v součtu obou faktorů cca 20 až 30 %.

Pořadí významnosti faktorů je odlišné v lokalitě TORE, kde je podíl vytápění v absolutní hodnotě sice podobný jako na ostatních dvou lokalitách (okolo $5 \mu\text{g.m}^{-3}$), relativně je ale ze všech lokalit nejnižší (okolo 10 % v případě vytápění uhlím i biomasou). Důvodem je zde významný příspěvek průmyslových emisí minerálních částic – faktor „IND Ca“ zde dosahoval cca $9 \mu\text{g.m}^{-3}$ (okolo 15 % PM_{10}).

Po sekundárním anorganickém aerosolu, vytápění domácností a průmyslových emisích minerálních částic byla dalším faktorem v pořadí z hlediska podílu na koncentraci PM₁₀ automobilová doprava s podílem okolo cca 7 % (TOBA a TORE) až 13 % (TOKU).

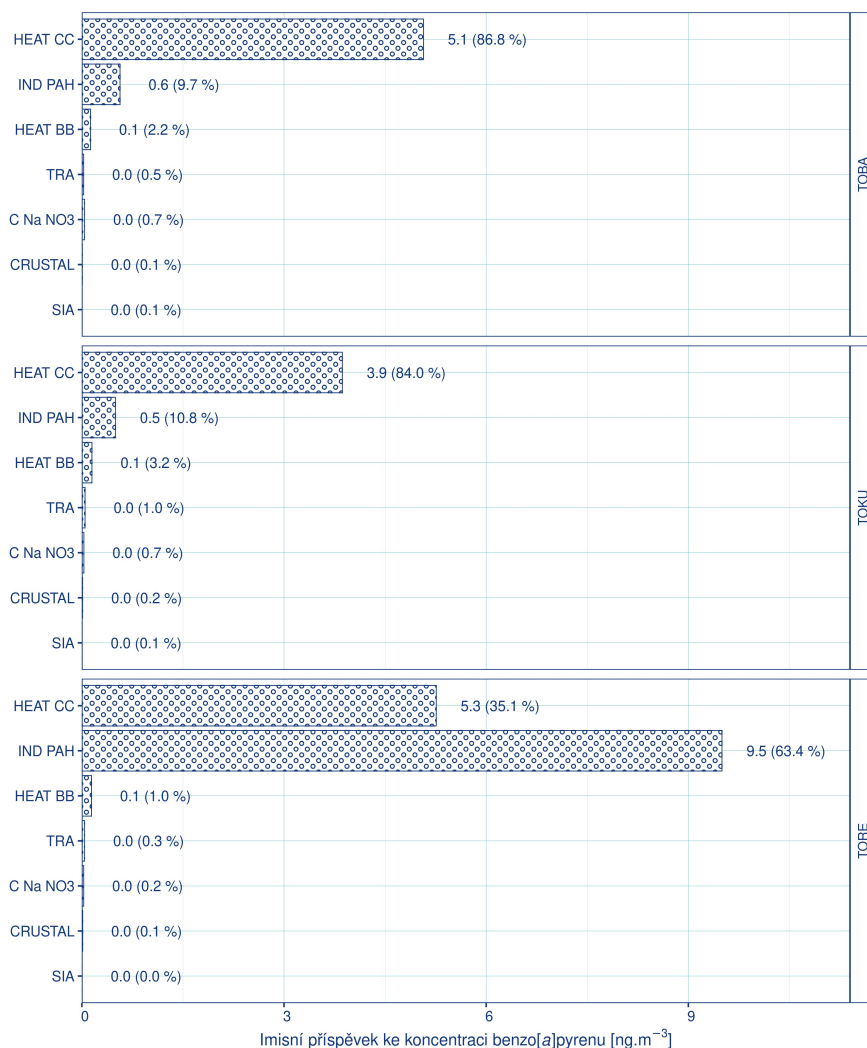
Po automobilové dopravě následoval zimní sekundární organický aerosol faktoru „C-Na-NO₃“ s absolutním podílem cca 3 až 4 µg.m⁻³ (relativně v lokalitě TORE cca 5 %, jinde cca 12 %).

Relativní podíl primárních částic tvořených chloridem sodným a minerálními částicemi byl podobný a dosahoval jednotlivě 3 až 6 % PM₁₀.

Ze všech faktorů byly hmotnostně nejméně významné v PM₁₀ částice tvořené těžkými kovy a PAH pocházející z průmyslu („IND HM“ a „IND PAH“). Významného imisního příspěvku dosahovaly tyto faktory pouze v lokalitě TORE (v obou případech podobný podíl okolo 10 %), jinde se jednalo pouze o desetiny % koncentrace PM₁₀, tedy na hranici rozlišovací schopnosti modelu.

Modelové imisní příspěvky ke koncentraci benzo[a]pyrenu

Modelem vypočtené imisní příspěvky jednotlivých faktorů ke koncentraci PM₁₀ v období měřicí kampaně dokumentuje graf na Obr. 25 (výsledný Constrained Run model).



Obr. 25 Podíl identifikovaných faktorů na imisní koncentraci benzo[a]pyrenu (Constrained Run)

V lokalitách TOBA a TOKU bylo dominantním zdrojem benzo[a]pyrenu vytápění domácností, především uhlím. Vytápění uhlím podle výsledků modelu tvořilo za dobu měření imisní příspěvek ke koncentraci benzo[a]pyrenu ve výši cca 4 ng.m⁻³ (TOKU), resp. 5 ng.m⁻³ (TOBA). Na vytápění domácností biomasou přitom podle modelu připadal podíl pouze v desetinách ng.m⁻³ (nižší jednotky % imisní koncentrace). Dohromady vytápění domácností biomasou a uhlím působilo v těchto měřicích lokalitách přibližně 90% znečištění ovzduší benzo[a]pyrenem. Na průmyslové emise benzo[a]pyrenu připadal v měřicích lokalitách TOBA a TOKU podíl okolo 0,5 ng.m⁻³ (cca 10 %).

Z hlediska podílu zdrojů na koncentraci benzo[a]pyrenu je lokalita TORE oproti ostatním dvěma měřicím místům výrazně odlišná. V posuzovaném období se zde na celkové imisní koncentraci podílel nejvíce vliv průmyslových zdrojů. Průměrný imisní příspěvek průmyslových zdrojů za dobu měření ke koncentraci benzo[a]pyrenu v lokalitě TORE byl na základě modelu vyčíslen na 9,5 ng.m⁻³, což představuje necelé 2/3 naměřené imisní koncentrace. Zbývající podíl na celkovém znečištění benzo[a]pyrenem zde připadal téměř výhradně na vytápění domácností. Vliv dopravy a dalších zdrojů znečišťování ovzduší na úroveň znečištění benzo[a]pyrenem byl vyhodnocen jako nevýznamný (jednotlivě maximálně 1 % imisní koncentrace).

Součet imisních příspěvků uvedených výše v grafu na Obr. 25 se vlivem přípravy dat a omezení modelu liší od celkové naměřené imisní koncentrace. Vysvětlení je součástí kapitoly 5.

5. Shrnutí a diskuse výsledků

5.1. Územní a časová reprezentativnost výsledků

Ačkoliv jsou hodnocení imisně-meteorologických vztahů a receptorový model PMF ve všech svých parametrech platné pouze pro místa, ve kterých probíhalo imisní měření, syntéza informací z těchto tří lokalit umožňuje interpretaci, která je platná pro oblast východní části Ostravy a přilehlých obcí (zájmové území vymezené přibližně polygonem Vratimov, Slezská Ostrava, Rychvald, Horní Suchá, Havířov). Odběrová kampaň probíhala v chladné části roku, ve které se meteorologické podmínky, zejména směr a rychlost větru, významně nelišily od dlouhodobého průměru (viz porovnání v kap. 4.1.1.). Identifikované příčiny znečištění lze proto zobecnit na zimní až přechodné období (topnou sezonu) pro střednědobý časový horizont (několik let).

Výjimkou je situace v okolí měřicí lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí (TORE), která je oproti ostatním dvěma hodnoceným lokalitám i širšímu okolí z hlediska hlavních příčin znečištění zásadně odlišná. Podrobně se rozdílům okolí lokality TORE od obvyklé situace ve výše vymezeném okolí Ostravy věnuje podkapitola 5.4. Porovnání příčin znečištění vyhodnocených nezávislými metodami.

5.2. Shrnutí příčin znečištění v zájmovém území

Následující text shrnuje hlavní příčiny znečištění ovzduší v topné sezoně v zájmovém území s výjimkou okolí měřicí lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí.

Nejvýznamnější částí znečištění ovzduší suspendovanými částicemi PM₁₀ v chladné části roku (topné sezoně) jsou sekundární částice tvořené síranem a dusičnanem amonným. Tento typ znečištění tvoří třetinu až dvě pětiny koncentrace PM₁₀. Původ tohoto typu znečištění je regionální, rozhodující měrou se na něm podílejí pravděpodobně emise z individuálního vytápění domácností. Zahrnuje jak částice vznikající z tuzemských emisí, tak i znečištění z polské části Slezska (při občasných situacích se severovýchodním prouděním). Druhý nejvýznamnější vliv na koncentraci PM₁₀ mají primární částice

vznikající při individuálním vytápění domácností (čtvrtina až třetina celkové koncentrace). Podíl primárních částic (otěrů a výfukových emisí) ze silniční dopravy není sice sám o sobě významný (v blízkosti frekventovaných komunikací může dosahovat okolo 10 %), ale vliv automobilových emisí se projevuje také prostřednictvím sekundárního aerosolu a resuspence částic soli z chemického posypu vozovek. Imisní zátěž zájmového území sekundárním aerosolem PM₁₀, který je indukovan dopravou, může dosahovat až okolo 15 %. V součtu s primárními dopravními částicemi tedy doprava v zimě působí celkově imisní příspěvek ve výši okolo pětiny až čtvrtiny koncentrace PM₁₀. Ostatní zdroje znečišťování ovzduší mají na koncentraci PM₁₀ v zájmovém území nevýznamný vliv (s výjimkou okolí lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí).

Znečištění benzo[a]pyrenem pochází v celém zájmovém území s výjimkou lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, dominantně z individuálního vytápění domácností uhlím. Vytápění domácností je zdrojem téměř 90 % imisní koncentrace. S výjimkou okolí lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, dosahuje podíl průmyslových emisí benzo[a]pyrenu v obydlených lokalitách ve vzdálenosti jednotek km od areálu Liberty Ostrava a.s. v chladné části roku max. cca 10 % celkové koncentrace. Na většině zájmového území se příspěvek průmyslu ke koncentraci této škodliviny pohybuje v prvních desetínách ng.m⁻³. Podíl vytápění biomasou na imisní koncentraci benzo[a]pyrenu byl podle modelu pouze v řádu jednotek %, což se v kontextu dřívějších použití metody PMF v ČR jeví jako velmi nízká hodnota. Protože PAH zaujímají v částicích PM₁₀ hmotnostně nevýznamný podíl, lze vyloučit, že by tato případná nepřesnost mohla v modelu PMF způsobit nesprávné přiřazení významné části znečištění některému z jiných faktorů (mohlo dojít pouze ke zkreslenému rozložení podílu benzo[a]pyrenu mezi jednotlivé faktory vytápění domácností). Na vyslovené závěry v této zprávě nemá tato nejistota vliv. Výsledek bude ověřen a upřesněn na základě celoročního měření, které probíhalo ve stejných lokalitách v roce 2021 a lednu 2022.

5.3. Odlišnost lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí

Příčiny znečištění ovzduší suspendovanými částicemi PM₁₀ i benzo[a]pyrenu v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí (TORE) jsou výrazně odlišné od ostatních dvou hodnocených lokalit (lokality TOBA v Ostravě-Bartovicích a lokality TOKU v Ostravě-Kunčičkách). Významný vliv zdrojů znečišťování, které v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, způsobují zvýšené koncentrace uvedených znečišťujících látek, je lokální a v ostatních dvou hodnocených lokalitách podstatně slabší.

V lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, byl podíl vytápění domácností na imisní koncentraci PM₁₀ v absolutní hodnotě sice podobný jako na ostatních dvou lokalitách (okolo 5 µg.m⁻³), relativně byl ale ze všech lokalit nejnižší (okolo 10 % v případě vytápění uhlím i biomasou). Důvodem zde byl významný příspěvek průmyslových emisí minerálních částic – faktor „IND Ca“ zde dosahoval cca 9 µg.m⁻³ (okolo 15 % PM₁₀). Rovněž v případě benzo[a]pyrenu se imisní příspěvky vytápění domácností v jednotlivých lokalitách lišily v absolutní hodnotě málo (od cca 4 ng.m⁻³ v Ostravě-Kunčičkách po cca 5,4 ng.m⁻³ v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí), ale z hlediska relativního podílu na celkové koncentraci byla situace výrazně odlišná (v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, dosahoval příspěvek vytápění v průměru cca 1/3, zatímco jinde okolo 90 %).

Zatímco v Ostravě-Radvanicích, Nad Obcí, pocházela většina znečištění suspendovanými částicemi PM₁₀ a benzo[a]pyrenem převážně z areálu hutního podniku Liberty Ostrava a.s., v monitorovacích lokalitách umístěných v sousedních městských částech Kunčičky (lokality TOKU) a Bartovice (lokality TOBA) převažoval vliv zdrojů znečišťování, které s provozem hutního podniku nesouvisejí.

Kromě podílu hutních zdrojů nejsou příčiny znečištění suspendovanými částicemi PM₁₀ a benzo[a]pyrenem mezi třemi hodnocenými lokalitami výrazně odlišné. Za zmínku stojí pouze výrazně nižší vyhodnocený podíl silniční dopravy v lokalitě Ostrava-Bartovice (TOBA), který je pochopitelný vzhledem k venkovskému charakteru lokality bez frekventovaných silnic v okolí (viz kap. 2).

Imisní příspěvky faktorů, které reprezentují regionální pozadí (sekundární aerosol a dálkově přenášené primární částice – faktory „SIA“, „C-Na-NO₃“, saharský aerosol ve faktoru „CRUSTAL“) se mezi lokalitami liší málo. Podobně je tomu v případě individuálního vytápění domácností, které v součtu obou identifikovaných faktorů („HEAT CC“ a „HEAT BB“) zaujímá na jednotlivých lokalitách podobný imisní příspěvek. Jednotlivé lokality se vzájemně výrazně liší pouze vyšším podílem spalování biomasy v lokalitě Ostrava-Kunčičky.

Z provedeného vyhodnocení v této zprávě vyplývá, že stávající lokalita imisního monitoringu Statutárního města Ostrava a Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí (TORE), je v souladu s cílem měření a s klasifikací uvedenou v Informačním systému kvality ovzduší ČR umístěna v místě silného lokálního vlivu průmyslového zdroje. Údaje z této stanice jsou reprezentativní pouze pro její nejbližší okolí (řádově stovky m od stanice) a nejsou použitelné pro hodnocení kvality a příčin znečištění ovzduší v Ostravě-Radvanicích jako celku, v okolních městských částech ani v širším okolí. Nejsou využitelné ani pro případné navazující hodnocení zdravotních dopadů mimo dosah její reprezentativnosti.

Na základě porovnání výsledků imisně-meteorologického hodnocení a identifikace zdrojů ve třech hodnocených lokalitách lze odhadnout reprezentativnost stanice do vzdálenosti přibližně 500 m, maximálně 1 km. Ve větších vzdálenostech od stanice jsou již podíly zdrojů na znečištění ovzduší zcela odlišné. Výsledky měření z této lokality jsou proto relevantní pro omezenou populaci. Na základě uvedených vzdáleností a hustoty populace (podle Sčítání lidu, domů a bytů z roku 2011 se jedná v okruhu do 500 m od stanice o cca 490 obyv./km², do vzdálenosti 1 km cca 480 obyv./km²) lze populaci exponovanou zvýšené úrovni znečištění oproti zájmovému území (vymezení viz kapitola 5.1) odhadnout na cca 400 až 1 500 osob. Je potřeba si uvědomit také skutečnost, že od koncentračního hot-spotu v místě stanice směrem severně i jižně úroveň znečištění plynule klesá na úroveň obvyklou v zájmovém území. Pro celou výše odhadnutou exponovanou populaci proto nelze použít při posuzování zdravotních dopadů přímo hodnoty naměřené v místě lokality TORE, ale průměr koncentrace z této stanice a reprezentativní hodnoty pro širší zájmové území. Předpokládáme, že odhad velikosti imisního hot-spotu a reprezentativní velikosti dotčené populace v okolí lokality stálého monitoringu Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, bude možno ještě upřesnit ve druhé polovině roku 2022, kdy budou do navazujících hodnocení v konceptu BORA zahrnuta celoroční data z dalších měřicích lokalit, např. Petřvaldu (dočasná projektová předměstská pozad'ová lokalita) a Ostrava-Radvanice, OZO (předměstská pozad'ová lokalita stálého imisního monitoringu Statutárního města Ostrava a Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě TORO).

5.4. Porovnání příčin znečištění vyhodnocených nezávislými metodami

Výše uvedené závěry vycházejí ze dvou nezávislých hodnocení. Jednalo se o posouzení imisně-meteorologických vztahů, zejména velikosti naměřených imisních koncentrací při různých směrech větru, a receptorový model PMF. Podle imisně meteorologického hodnocení pochází v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, mírně nadpoloviční část znečištění PM₁₀ ze směru od areálu Liberty Ostrava a.s., zatímco v ostatních dvou hodnocených lokalitách ze směru od tohoto areálu pocházela přibližně desetina znečištění. **Modelem PMF byl zjištěn imisní příspěvek předmětného hutního podniku ke**

koncentraci PM₁₀ v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, okolo 19,4 µg.m⁻³, tj. cca 1/3 celkové koncentrace (součet modelových faktorů „IND Ca“, „IND PAH“ a „IND HM“). V ostatních dvou lokalitách (Ostrava-Bartovice a Ostrava-Kunčičky) se jednalo o celkový imisní příspěvek zdrojů souvisejících s provozem Liberty Ostrava a.s. ke koncentraci PM₁₀ ve výši okolo 2 µg.m⁻³, což v relativním vyjádření představuje cca 5 % imisní koncentrace. Při porovnání výsledků získaných uvedenými dvěma metodami je potřeba zohlednit, že při proudění ze směru od areálu Liberty Ostrava a.s. obsahuje ovzduší nejen znečištění vznikající emisemi z areálu hutního podniku, ale také „pozaďové“ znečištění, které vzniklo před areálem podniku (na jeho návětrné straně). Je proto logické, že podíl hutních zdrojů vyčíslený modelem PMF je nižší než příspěvek ze směru od areálu Liberty Ostrava a.s. vyčíslený imisně-meteorologickým hodnocením.

Menší odchylku výsledků obou metod lze očekávat v případě benzo[a]pyrenu, protože spektrum zdrojů tohoto polutantu není oproti PM₁₀ tak široké a vlivem degradačních procesů v atmosféře hraje v případě této znečišťující látky podstatně menší roli dálkový přenos znečištění. Podle imisně-meteorologického hodnocení dosahoval v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, imisní příspěvek benzo[a]pyrenu ze směru od areálu Liberty Ostrava a.s. cca 2/3 celkové imisní koncentrace, zatímco v ostatních dvou lokalitách činil příspěvek od tohoto hutního areálu pouze desetinu až pětinu znečištění. **Podle modelu PMF dosahoval imisní příspěvek hutních zdrojů na koncentraci benzo[a]pyrenu v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, cca 9,5 ng.m⁻³, tedy necelých 2/3 celkové koncentrace. Jedná se o pouze mírně nižší hodnoty než v případě imisně-meteorologického hodnocení. V hodnocených lokalitách v Ostravě-Kunčičkách a Ostravě-Bartovicích byl modelem PMF imisní příspěvek hutních zdrojů na koncentraci benzo[a]pyrenu vyčíslen na cca 0,5 ng.m⁻³, což představuje přibližně desetinu koncentrace.**

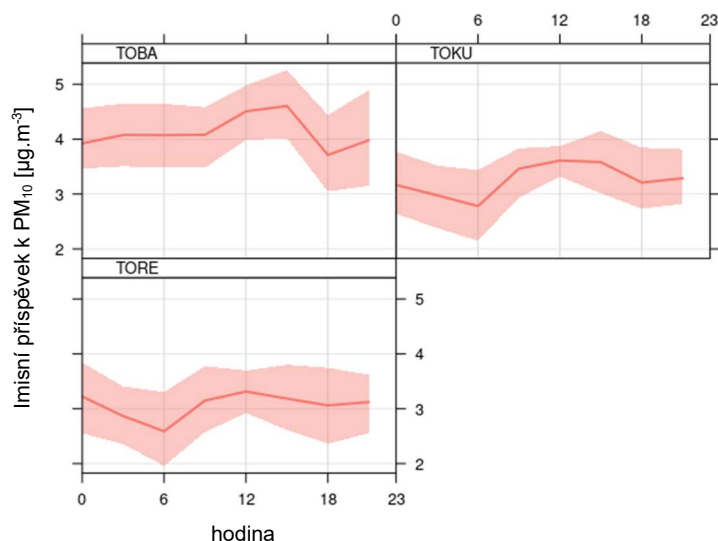
Shoda výsledků obou použitých metod je zřejmá a je zárukou spolehlivosti vyslovených hlavních závěrů týkajících se rozlišení vlivu hutních a ostatních zdrojů, zejména v případě benzo[a]pyrenu.

5.5. Interpretace a nejistoty modelu PMF

Při hodnocení se vyskytly některé interpretační nejasnosti. Následující kapitola se věnuje problematickým aspektům, které musely být řešeny. Jednalo se o interpretaci faktoru „C-Na-NO₃“ a posouzení rozdílu mezi výsledkem modelu PMF a naměřenými koncentracemi. Zbývající část této kapitoly je věnována způsobu ověření a vytěžení dalších informací z modelových výstupů na základě analýzy meteorologických parametrů.

5.5.1. Interpretace faktoru C-Na-NO₃

Na základě chemických profilů a jejich časového průběhu a s využitím zkušeností s dřívějším použitím modelu PMF v ČR bylo možno jednoznačně přiřadit konkrétním skupinám zdrojů téměř všechny modelové faktory. Problematickým byl pouze faktor označený jako „C-Na-NO₃“, interpretovaný jako zimní typ organického sekundárního aerosolu. Specifické chemické složení k interpretaci nepostačovalo a časový průběh modelového příspěvku naznačoval, že by se mohlo jednat o falešný modelový faktor (zdánlivě nahodilé kolísání bez zřetelné vazby na konkrétní meteorologické nebo emisní situace). Časový průběh příspěvku organického sekundárního aerosolu (C-Na-NO₃) není z grafu v příloze 2 zřejmý, ale z podrobnějšího šetření (viz Obr. 26) je patrné nevýrazné zvýšení v průběhu dne, v časné odpoledních hodinách, zejména v lokalitě TOBA, která je oproti ostatním měřicím místům méně ovlivněna dopravou a průmyslovými zdroji.



Obr. 26 Časový průběh faktoru C-Na-NO₃

Uvedený chod faktorového příspěvku a souvislosti komentované v dalších podkapitolách společně vylučují, že by se v případě faktoru „C-Na-NO₃“ jednalo o falešný modelový výstup. Jedná se o reálný specifický zimní typ znečištění v posuzované oblasti vznikající z komplexu emisí z dopravy a domácností v podmínkách městské aglomerace při působení slunečního záření.

5.5.2. Rozdíl mezi modelem PMF a naměřenými imisními koncentracemi

Vyčíslení podílu jednotlivých zdrojů na celkové koncentraci benzo[a]pyrenu bylo provedeno na základě podílu tohoto polutantu v jednotlivých modelových faktorech. Do faktorových příspěvků se promítá nejistota modelu vyjádřená regresí mezi naměřenými a modelovanými hodnotami s $R^2=0,97$ (PM₁₀), resp. $R^2=0,78$ (benzo[a]pyren). Součet všech faktorů ve výše uvedených grafech se proto nemusí shodovat s naměřenou celkovou koncentrací. Dalším důvodem pro odchylku celkového součtu faktorových příspěvků od naměřené koncentrace je způsob přípravy dat. Datová sada použitá pro model PMF vznikla kompletací několika skupin analytů, které byly odebírány různými vzorkovači a analyzovány různými metodami, s možnými výpadky v průběhu odběrů a analýz. Do modelu PMF byly následně použity pouze využitelné databázové záznamy (pokud možno kompletní řada analytů). Počet údajů konkrétního analytu použitých v modelu proto může být nižší než počet validních laboratorních analýz jednotlivých analytů. Rozdíly průměrné koncentrace vypočtené ze všech naměřených hodnot a průměrné koncentrace vypočtené z datové sady použité pro PMF jsou zřejmé z tabulky 3.

Tab. 3 Porovnání naměřených a modelových koncentrací PM₁₀ a benzo[a]pyrenu

Lokalita	PM ₁₀ [µg.m ⁻³]		benzo[a]pyren [ng.m ⁻³]	
	Naměřená průměrná koncentrace	Součet imisních příspěvků faktorů PMF	Naměřená průměrná koncentrace	Součet imisních příspěvků faktorů PMF
TOBA	34,8	34,8	5,7	5,8
TOKU	37,1	34,5	5,7	4,6
TORE	55,7	54,0	19,9	15,0

Z uvedené tabulky vyplývá, že zatímco v případě PM_{10} je relativní odchylka naměřené a modelové koncentrace nevýznamná (do 10 %), v případě benzo[a]pyrenu je nejistota vyšší (podhodnocení modelové koncentrace o cca 20 % v lokalitě TOKU a cca 25 % v lokalitě TORE). Dosažená nejistota je přijatelná, uvažíme-li nejistotu samotných laboratorních stanovení benzo[a]pyrenu, která se pohybuje okolo 20 až 30 %.

Model tedy matematicky přiřadil hmotu aerosolu PM_{10} jednotlivým identifikovaným faktorům s přijatelnou přesností. Z hlediska nejistot je ale také podstatné, jak dobře postihují celkovou naměřenou koncentraci vzorkovaného aerosolu látky a sloučeniny, které byly ve vzorcích analyzovány. Byl proto proveden součet hmotnosti všech analytů ve vzorku, laboratorně stanovených jednotlivými druhy prováděných analýz. Aby nedošlo k nadhodnocení této sumy, byly vyřazeny duplicitní prvky (např. síra stanovovaná pomocí ED XRF i v síranové formě iontovou chromatografií). Součet hmotnosti analytů dosahoval pouze necelých 63 % gravimetricky stanovené hmotnosti PM_{10} (od 60 % v lokalitě TOKU po 67 % v lokalitě TOBA). Jedná se o poměrně nízkou hodnotu, která mohla teoreticky zkreslit výsledky modelu. V obecné rovině může být příčin tohoto podhodnocení několik:

- Nezapočtená hmotnost kyslíku a dalších prvků v organické hmotě, na jejíž hmotnost lze usuzovat pouze prostřednictvím stanovovaného organického uhlíku (kromě OC a anhydrosacharidů a PAH nebyla hmotnost organických látek analyzována).
- Nezapočtená hmotnost kyslíku v oxidech kovů a minerálních prvků (metodou ED XRF byly stanoveny pouze koncentrace příslušných prvků, nikoliv hmotnost celé molekuly).
- Kyslík obsažený ve vodě vázané ve sloučeninách, která se uvolňuje až při vyšších teplotách, takže je započtena v gravimetricky stanovené hmotnosti PM_{10} , ale není detekován prováděnými chemickými analýzami.

Podhodnocení koncentrace aerosolu PM v datových sadách používaných pro identifikaci zdrojů receptorovými modely o desítky % je běžné, přesto je uvedená hodnota nižší, než jaká byla obvykle zjištěna při dřívějších použitích této metodiky v rámci ČR ze strany ČHMÚ. Podstatnou skutečností je, že zjištěná míra podhodnocení je podobná u všech tří hodnocených lokalit, přestože jsou zatíženy výrazně odlišnými koncentracemi i typy znečištění, jak vyplývá nejen z modelu PMF, ale i imisně-meteorologického hodnocení. Velmi podobné podhodnocení bylo zjištěno na základě měření v roce 2021 ve Věřňovicích [6]. To naznačuje, že by se mohlo jednat o regionální souvislost. Navzdory předpokládanému výrazně vyššímu obsahu oxidů kovů v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, v PM_{10} oproti ostatním dvěma měřicím místům (výrazně vyšší emise minerálních částic i polymetalického aerosolu z výroby železa) se zde neprojevila výrazně vyšší míra podhodnocení oproti gravimetricky stanovené koncentraci. Z toho lze usuzovat, že případné podhodnocení hmoty kyslíku v oxidech zde nemá na celkovou hmotu PM_{10} zásadní vliv.

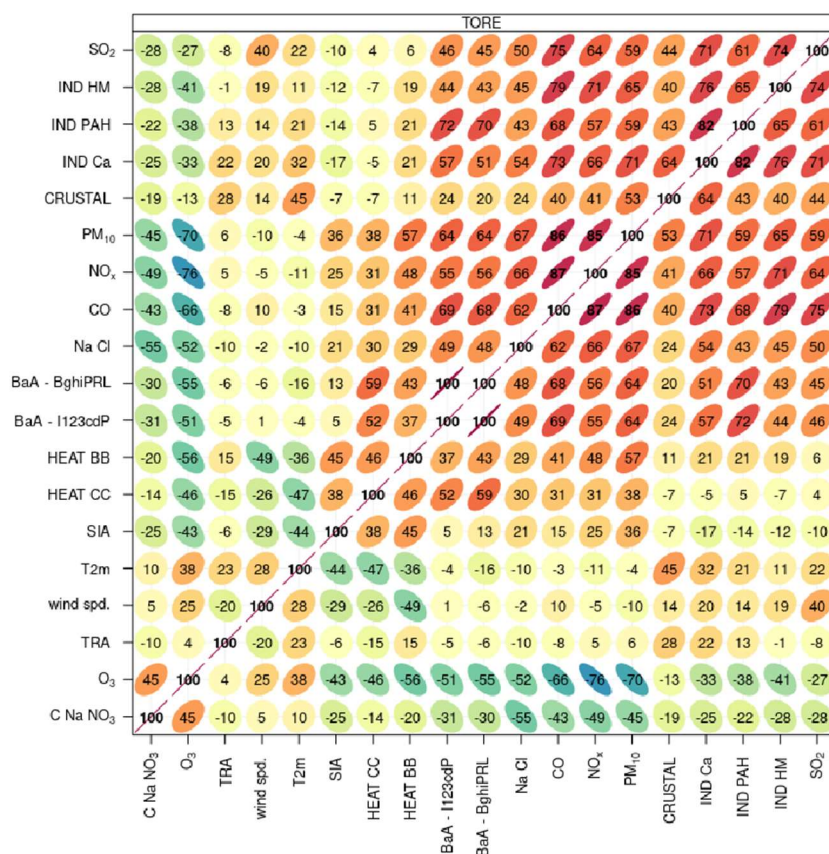
Pro posouzení vlivu vázané vody ve sloučeninách aerosolu PM_{10} byla sada 12 náhodně vybraných vzorků z měřicí kampaně 14. 1.–14. 4. 2021 převážena po sušení při teplotě 100 °C a 200 °C. Zjištěný úbytek hmotnosti se pohyboval pouze v jednotkách promile původní navážky stanovené dle příslušné normy při cca 20 °C, přičemž při 200 °C byl přibližně dvojnásobný oproti 100 °C. Podhodnocení hmoty PM_{10} tedy nelze vysvětlit přítomností vázané vody ve vzorku.

Nejpravděpodobnější je proto hypotéza podhodnocení hmotnosti organických sloučenin, kterou podporuje naměřený regionálně extrémně vysoký podíl organického uhlíku v atmosférickém aerosolu. Jedná se zde o nejvýznamnější část hmoty PM_{10} . Za předpokladu, že použijeme k odhadu organické hmoty z organického uhlíku koeficient 1,6 (běžně používaná hodnota v odborné literatuře, např. [7]), bude součet modelově vypočtené hmoty okolo 80 až 90 % gravimetricky stanovené hodnoty. S ohledem na specificky vysoký regionální podíl nízkoteplotních frakcí organického uhlíku z vytápění domácností lze očekávat, že hodnota koeficientu může být ještě vyšší. Vzhledem k největšímu zastoupení organické hmoty ze všech identifikovaných zdrojů v emisích z vytápění domácností může

podhodnocení hmoty PM_{10} oproti skutečnosti snižovat příspěvek z těchto zdrojů a příspěvek s nimi spojeného sekundárního organického aerosolu. Je tedy možné, že oproti skutečnosti je vliv vytápění v předkládané zprávě podhodnocen, odhadem do 10 % příspěvku PM_{10} , což se obdobnou měrou může promítat i do vyhodnocených podílů na znečištění benzo[a]pyrenem.

5.5.3. Korelace faktorových příspěvků s naměřenými meteorologickými parametry a koncentracemi plynů

Toto hodnocení bylo proveditelné pouze v lokalitě TORE, kde jsou plynné škodliviny měřeny v rámci imisního monitoringu. Výsledek klastrové korelační analýzy je obsahem Obr. 27.



Obr. 27 Klastrová spearmanova korelace faktorových příspěvků, meteorologických parametrů a plynných polutantů (TORE)

Z korelační matice vyplývá spojitost naměřené koncentrace SO_2 , CO , NO_x a PM_{10} s identifikovaným příspěvkem všech 3 typů průmyslových emisí („IND Ca“, „IND HM“ a „IND PAH“), což naznačuje původ ve stejném průmyslovém areálu. Nejblíže těmto faktorům je v korelačním klastru SO_2 , což naznačuje původ těchto faktorů ve spalování uhlí při prvovýrobě železa. Oba faktory reprezentující vytápění se v klastrové korelační matici vyskytují pospolu, což indikuje podobný původ. Současně sousedí s faktorem reprezentujícím zimní sekundární anorganický aerosol („SIA“), který je proto pravděpodobně indukovan hlavně vytápěním domácností, nikoliv průmyslovými nebo dopravními emisemi. Minerální prašnost přisuzovaná v hodnoceném období saharským částicím („CRUSTAL“) vykazuje se všemi dalšími faktory a analyty slabší závislosti s výjimkou pochopitelné interference s faktorem průmyslové minerální prašnosti („IND Ca“), která je způsobena významným obsahem vápníku v obou faktorech. Meteorologické parametry vykazují v návaznosti na mnoho rušivých interakcí slabší korelace, přesto je zřetelná záporná vazba mezi příspěvkem vytápění domácností

a sekundárním anorganickým aerosolem („SIA“) a teplotou, a také mezi rychlostí větru a vytápěním biomasou. Zcela odlišné chování od všech faktorů vykazuje zimní sekundární organický aerosol („C-Na-NO₃“), který koreluje pouze slabě kladně s ozonem, zcela opačně než sekundární anorganický aerosol. Jedná se o jeden z podpůrných argumentů pro hypotézu, že se minimálně zčásti jedná o denní, fotochemicky indukované částice (koncentrace ozonu a intenzita slunečního svitu bývají přímo úměrné). Vzhledem k záporné korelaci tohoto faktoru s CO, NO_x, PM₁₀ a faktorem Na-Cl na této stanici je nepravděpodobná jeho spojitost s hutní výrobou. Výsledek korelační analýzy odpovídá očekávaným souvislostem a potvrzuje správnost interpretace modelu.

5.5.4. Analýza vážených koncentračních růžic faktorových imisních příspěvků

Koncentrační růžice vypracované pro jednotlivé faktory jsou obsahem přílohy 4. Znečištění z vytápění domácností uhlím („HEAT CC“) je podle těchto grafů transportováno k měřicím lokalitám převážně z kvadrantu sever až východ a z jihozápadu. Vůbec nejvýznamnější příspěvek pochází v lokalitách Ostrava-Bartovice a Ostrava-Kunčičky z východního směru, v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, je nejvýznamnější příspěvek od jihozápadu. Zatímco znečištění z jihozápadního směru se ve všech hodnocených lokalitách vyskytuje v menších koncentracích a častěji, znečištění od severu až východu je koncentrovanější s maximem z východního směru. Z toho lze usuzovat, že znečištění z vytápění domácností uhlím od jihozápadu pochází z větších vzdáleností, pravděpodobně se jedná o kumulativní znečištění z Vratimova a Ostravy-Hrabové, popř. i vzdálenějších míst v koridoru Moravské brány a Podbeskydské pahorkatiny. Naproti tomu znečištění z východního směru je působeno vytápěním v blízkých obcích tímto směrem (Ostrava-Radvanice, Ostrava-Bartovice, Šenov, Havířov-Šumbark, podle toho, o jakou měřicí lokalitu se jedná). Příspěvek vytápění domácností ze severního až severovýchodního směru pochází pravděpodobně jak z blízkých, tak vzdálenějších sídel (Slezská Ostrava, Ostrava-Michálkovice, Rychvald, Bohumín, popř. polských obcí), protože se v tomto sektoru vyskytují jak vysoké, tak i nízké imisní příspěvky.

Primární částice z vytápění domácností biomasou („HEAT BB“) pocházejí převážně z jihozápadního směru (pravděpodobně Vratimov, Ostrava-Hrabová, popř. Moravská brána a Podbeskydí), a to na všech třech hodnocených lokalitách. Oproti ostatním směrům jsou z tohoto sektoru transportovány většinou v relativně nižších koncentracích. Druhý nejvýznamnější podíl na celkovém imisním příspěvku vytápění domácností biomasou je východ až jihovýchod, ze kterého nastávají vyšší imisní příspěvky, ale o něco méně často. Naopak příspěvek vytápění biomasou ze severu až severovýchodu je nízký, což je hlavní odlišnost od vytápění uhlím.

Minerální částice z oblasti Sahary (faktor „CRUSTAL“) byly k měřicím místům transportovány od jihu až západu s maximem od jihozápadu (pravděpodobný přenos koridorem Moravské brány).

Směry, odkud pocházejí částice chloridu sodného (faktor „Na-Cl“), se v jednotlivých lokalitách výrazně liší. V Ostravě-Bartovicích se jedná převážně o původ východně a severně od měřicího místa, v Ostravě-Kunčičkách nejvýznamněji z jihozápadu. Jihozápadní směr je zcela dominantní i v případě lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí. Rozdílnost směrů hlavních příspěvků na jednotlivých lokalitách souvisí s polohou hlavních silnic, na kterých je používána sůl k zimnímu chemickému posypu. V případě lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, se pravděpodobně jedná také o příspěvek z areálu podniku Liberty Ostrava a.s. (kromě chemického ošetření ploch v areálu nelze vyloučit interferenci s chloridy a sodíkem z průmyslového spalování uhlí).

Částice faktoru „IND Ca“ reprezentující minerální prašnost z průmyslového nakládání s minerálními materiály (vápno, vápenec, dolomit, popř. železná ruda) pocházely v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, z jihozápadního až západního směru (severovýchodní část areálu Liberty Ostrava, a.s., popř.

z teplého hutního odvalu severně od něj). V lokalitě Ostrava-Kunčičky byly nejvyšší příspěvky při proudění od východu až severovýchodu (pravděpodobně vliv aktivit v prostoru teplého odvalu), v lokalitě Ostrava-Bartovice od západu (pravděpodobně skládky hutních surovin v jižní části areálu Liberty Ostrava a.s.).

Faktor „IND HM“, reprezentující komplex kovů z hutní výroby, pocházel v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, dominantně z jihozápadního až západního směru (provozy hutní prvovýroby v severovýchodní části areálu Liberty Ostrava a.s.). Na ostatních lokalitách byly jeho imisní příspěvky velmi nízké, takže vypovídací hodnota tohoto posouzení je diskutabilní (zvýšená nejistota modelu vlivem statistického šumu). V Ostravě-Bartovicích se jednalo o maximum od západu (areál Liberty Ostrava a.s.), v Ostravě-Kunčičkách od východu (pravděpodobně teplý hutní odval).

Průmyslový příspěvek faktoru „IND PAH“, který reprezentuje koksárenské emise, byl významný pouze v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, a to dominantně při jihozápadním proudění. Málo významné příspěvky tohoto faktoru v lokalitách Ostrava-Bartovice a Ostrava-Kunčičky pocházely hlavně ze západního, resp. jižního směru. Ve všech případech se jednalo o směry od koksárenských baterií v areálu Liberty Ostrava a.s. Pozoruhodné je, že modelovým hodnocením nebyl zjištěn významný příspěvek v lokalitě Ostrava-Bartovice, předpokládaný v návaznosti na koksárenskou baterii VKB11 provozovanou v jihovýchodní části areálu, zatímco v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, v blízkosti baterií KB1 a KB2, provozovaných v severovýchodní části areálu, byl vliv koksárenské výroby relativně významný. Může to být způsobeno omezeným počtem případů proudění od areálu Liberty Ostrava a.s. k Ostravě-Bartovicím (v období měřicí kampaně převládalo jihozápadní proudění) nebo tím, že při nižších rychlostech proudění, kdy bývají imisní příspěvky nejvyšší, dochází ke stáčení směru proudění podél toku Lučiny k severovýchodu až severu, což se v součtu imisních příspěvků baterie VKB11 s KB1 a KB2 může projevit výrazněji právě v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí.

Primární částice ze silniční dopravy (faktor „TRA“) pocházely podle modelu na všech lokalitách převážně z jihozápadního sektoru, odkud byly přenášeny v nízkých i vysokých koncentracích. Občasné vysoké imisní příspěvky tohoto faktoru byly modelem vypočteny také při proudění od západu, v Ostravě-Kunčičkách i z jihu a jihovýchodu. Pravděpodobně se zde projevuje jak přenos od nedalekých frekventovaných silnic (silnice I/11, ul. Rudná), tak i dálkový transport ze směru dopravního koridoru Moravské brány.

Sekundární anorganický aerosol („SIA“), který je v návaznosti na další informace uvedené v předchozích kapitolách indukován především emisemi z vytápění domácností, byl ke všem třem hodnoceným lokalitám přenášen především od jihozápadu a severu, významně také ze severovýchodu a východu. Lze proto vyloučit hypotézu, že hlavní část tohoto regionálního typu znečištění pocházela z Polska. Významný polský příspěvek při severních až severovýchodních směrech proudění nelze vyloučit, je ale zřejmé, že tuzemský podíl na jeho vzniku je významný.

Sekundární organický aerosol („C-Na-NO₃“) se na všech lokalitách vyskytoval především při severním a jihozápadním směru větru. Malé rozdíly koncentrační růžice mezi lokalitami naznačují podobně jako v případě sekundárního anorganických částic („SIA“) regionální, nikoliv lokální původ. V průměru přispíval tento faktor ke koncentraci PM₁₀ nejvíce z jihozápadního směru, zatímco od severu docházelo k občasnému přenosu těchto částic ve vyšších koncentracích. S ohledem na menší četnost severního směru proudění byl celkový faktorový příspěvek z tohoto směru nižší. Směry proudění naznačují, že tvorba těchto sekundárních částic souvisí s automobilovou dopravou v Ostravě, v dopravním koridoru Moravské brány a jeho pokračováním směrem k severovýchodu (Bohumín a okolí, pánevní část polského Slezska). Faktorová koncentrační růžice, umožňuje věrohodně působící zdůvodnění velikosti faktorových imisních příspěvků vzhledem ke směrům, odkud byly částice transportovány. Tato

skutečnost je dalším podkladem pro tvrzení, že „C-Na-NO₃“ není tzv. falešný modelový faktor, ale skutečný typ znečištění, který v hodnoceném období a území ovlivňoval kvalitu ovzduší.

5.5.5. Analýza faktorových imisních příspěvků metodou CPF

Grafy Conditional Probability Function (CPF) jsou obsahem přílohy 5. Reprezentují pravděpodobnost, že vysoké imisní příspěvky příslušného faktoru (jako kritérium vysokých faktorových příspěvků byl použit jejich 90. percentil) pocházejí z určitého směru.

Podle této metody pocházejí vysoké imisní příspěvky z vytápění domácností uhlím v lokalitách Ostrava-Radvanice, Nad Obcí a Ostrava-Bartovice pravděpodobně z východního směru, v lokalitě Ostrava-Kunčičky není výsledek statisticky významný.

Původ částic pocházejících z vytápění biomasou je neprůkazný v případě lokalit Ostrava-Bartovice a Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, zatímco v případě Ostravy-Kunčiček je vysoce pravděpodobný z východního směru, tedy z místní zástavby v Ostravě-Kunčičkách, popř. z Ostravy-Radvanic.

Směr původu faktoru „CRUSTAL“ (převážně saharský aerosol) nebylo možno pomocí funkce CPF určit (žádný směr nevykazoval statisticky významnou pravděpodobnost). To může být způsobeno depozicí těchto částic v celém regionu a jejich následnou resuspenzí větrem. Směr proudění, při kterém nastaly vysoké příspěvky faktoru, se tak nemusí shodovat se směrem původního dálkového transportu od jihovýchodu.

Pro faktor Na-Cl vykazuje analýza CPF pouze nevýznamné směrové pravděpodobnosti, tzn. směr k pravděpodobnému zdroji nelze touto metodou věrohodně určit.

S poměrně vysokou pravděpodobností lze naopak předpokládat existenci průmyslového nakládání se syrkými minerálními hmotami a průmyslového zdroje těžkých kovů (faktor „IND Ca“ a „IND HM“) západně až jihozápadně od lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí. Na ostatních lokalitách byly tyto faktory z hlediska velikosti příspěvku málo významné a metoda CPF byla proto pro odhad jeho polohy nevyužitelná. Uvedený směr odpovídá přibližně poloze ocelárny a vysokých pecí v areálu Liberty Ostrava a.s.

Podobným směrem jako průmyslové faktory „IND Ca“ a „IND HM“ se podle výsledku CPF nacházel zdroj průmyslových emisí polycyklických aromatických uhlovodíků („IND PAH“), pouze mírně jižněji (od lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí zřetelně jihozápadním směrem). Uvedený směr odpovídá přibližně poloze koksárenských baterií v areálu Liberty Ostrava a.s.

Určení zdrojů primárních částic z automobilové dopravy (faktor „TRA“) je v lokalitě Ostrava-Kunčičky na hranici věrohodnosti. S pravděpodobností okolo 50 % se jednalo o zdroj situovaný jižně od měřicího místa, což odpovídá nedaleké frekventované silnici I/11 na ulici Rudná.

Sekundární anorganický aerosol („SIA“) pocházel v lokalitě Ostrava-Bartovice pravděpodobně z východního směru (Šenov, Havířov-Šumbark, popř. vzdálenější lokality), ale výsledek je na hranici věrohodnosti (pravděpodobnost okolo 50 %). Na ostatních lokalitách nebylo možno touto metodou směr ke zdroji věrohodně určit (vzniká plošně v rámci regionu v podobných koncentracích, bez možnosti jasně určit směr ke zdroji tohoto typu znečištění).

Podobně hraniční je vypovídací hodnota CPF pro sekundární organický aerosol („C-Na-NO₃“) v Ostravě-Bartovicích, kde je indikován přenos nejvyšších příspěvků od severozápadu (město Ostrava). V ostatních lokalitách nebylo možno pomocí CPF směr ke zdroji určit (podobné důvody jako v případě faktoru „SIA“).

5.5.6. Analýza hromadným zpracováním zpětných trajektorií

Následující interpretace vychází z výsledku analýzy hromadně zpracovaných zpětných trajektorií pro lokalitu Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, které jsou obsahem přílohy 6. Metoda je vhodná zejména pro hodnocení zdrojových oblastí faktorů, které působí v regionálním měřítku, protože u nich se jedná v podstatě o jedinou věrohodnou analytickou metodu (z důvodu velmi častého zakřivení zpětných trajektorií nelze na polohu vzdálených zdrojů spolehlivě usuzovat z přímého měření větru provedeného v měřicích lokalitách). S ohledem na malé rozdíly v proudění v rámci zájmového území lze s výjimkou faktorů spojených s hutní prvovýrobou očekávat obdobné zdrojové oblasti znečištění i v případě lokalit Ostrava-Bartovice a Ostrava-Kunčičky.

Hlavní zdrojová oblast znečištění z vytápění domácností uhlím („HEAT CC“) je situována jihovýchodním směrem od lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí. Jedná se pravděpodobně o Ostravu-Bartovice, Šenov a vzdálenější lokality Frýdecko-Místeka, pravděpodobný je také občasné významný příspěvek z Třinecka a Těšínska. Na rozdíl od vytápění domácností biomasou je patrný také přenos tohoto typu emisí z polské pánevní části Slezska (Rybník a okolí).

Pravděpodobnou zdrojovou oblastí vytápění biomasou („HEAT BB“) je podle zpětných trajektorií východní a jihovýchodní směr od lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí. Z blízkých zdrojů se může jednat nejpravděpodobněji o Šenov a okolí, mezi pravděpodobné vzdálenější lokality patří Těšínsko (jak česká, tak polská část) a Třinecko (pravděpodobně Jablunkovská brázda a okolní podhorské lokality). Tyto výsledky potvrzují analýzy v předchozích podkapitolách, a také výsledek identifikace zdrojů provedený na Třinecku v rámci projektu TAČR TITSMZP704 (silný vliv vytápění domácností biomasou v Jablunkovské brázdě) [8].

Částice faktoru „CRUSTAL“ interpretovaného jako částice z oblasti Sahary, byly dle zpětných trajektorií transportovány ze vzdálenějších oblastí, indikovány jsou preferenční koridory přes Moravskou bránu a Třinecko (pravděpodobně přes Jablunkovskou brádu).

Faktor „Na-Cl“ je transportován pravděpodobně jak z blízkých, tak i vzdálených oblastí a nelze jednoznačně určit, která je nejvýznamnější. Částice chloridu sodného pocházejí jak ze spalování uhlí (okolní průmysl a vytápění domácností), tak i z automobilové dopravy (solí obohacený aerosol z povrchu vozovek) a nelze vyloučit ani přenos z přímořských oblastí, který byl v rámci ČR často pozorován při dřívějších modelových zpracováních.

Všechny tři identifikované faktory reprezentující průmyslové emise („IND Ca“, „IND HM“ a „IND PAH“) ukazují na základě analýzy zpětných trajektorií na působení z jihozápadního směru. Vzhledem k tomu, že zpětné trajektorie nesou jim přiřazenou hodnotu faktorového imisního příspěvku po celé jejich délce, nelze vždy určit vzdálenost ke zdroji. To je i případ analýzy těchto faktorů, kdy zpětné trajektorie naznačují nejvyšší příspěvky ve velkých vzdálenostech. Jinými metodami hodnocení popsány v předchozích podkapitolách bylo zjištěno, že na jednotlivých měřicích lokalitách se nejvyšší imisní příspěvky těchto faktorů vyskytují při proudění z různých směrů, které odpovídají poloze areálu Liberty Ostrava a.s. Imisní příspěvky těchto tří faktorů vykazují také zásadní rozdíl imisního příspěvku mezi lokalitami. Z těchto důvodů lze dálkový původ těchto částic vyloučit (směr větru při nejvyšších příspěvcích by byl v případě dálkového přenosu na jednotlivých lokalitách stejný a imisní příspěvky by byly podobně vysoké).

Použitá metoda zpracování zpětných trajektorií tedy při identifikaci hlavních zdrojových oblastí průmyslových emisí selhává a nemůže být použita jako jediná analytická metoda výstupů PMF. Je vhodnější pro určení polohy regionálních a vzdálenějších zdrojů. Typickým příkladem takových faktorů jsou sekundární aerosoly. Faktor „SIA“, který je dle výsledků výše uvedených analýz spojený převážně s emisemi z vytápění domácností, pochází podle zpracování zpětných trajektorií hlavně z Šenova a okolí

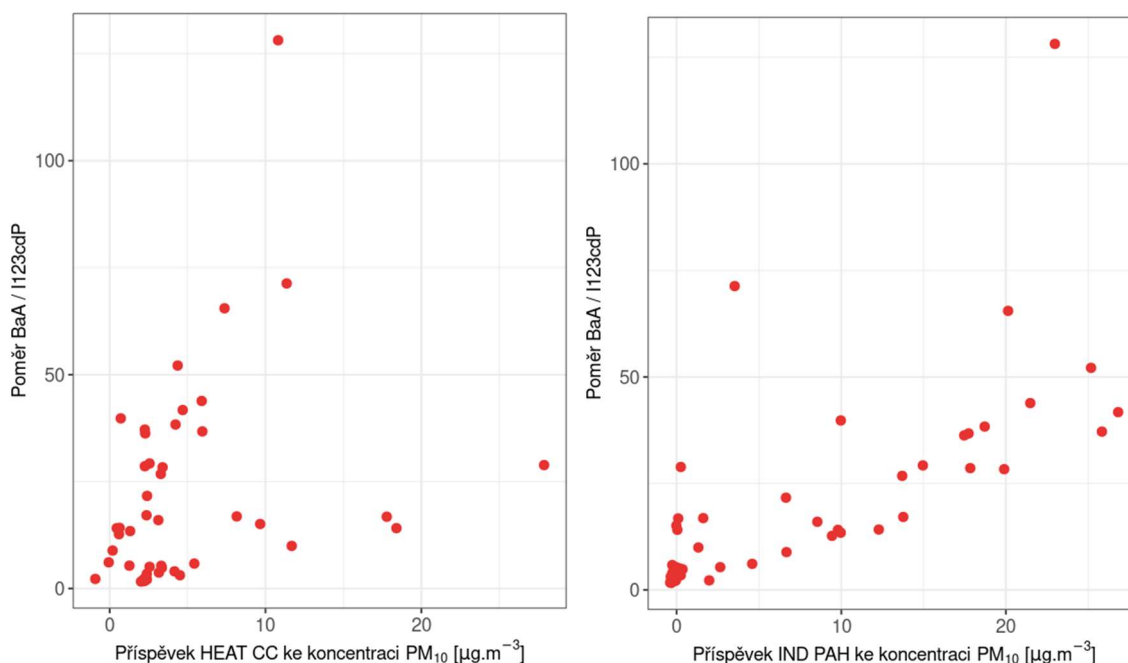
Havířova, ze vzdálenějších míst z Karvinska, a především z rozsáhlé oblasti polského Slezska. Pravděpodobnou zdrojovou oblastí je i prostor mezi Opavou a Hlučínem.

Oblast původu sekundárního organického aerosolu nebylo možno na základě použité metody věrohodně určit. Podle provedené analýzy je transportován z velkého počtu směrů. Způsob, jakým tento typ znečištění vzniká, je natolik složitý, že umožňuje mnoho různých interpretací a přiklonit se k některé z nich by bylo z hlediska správnosti hodnocení riskantní.

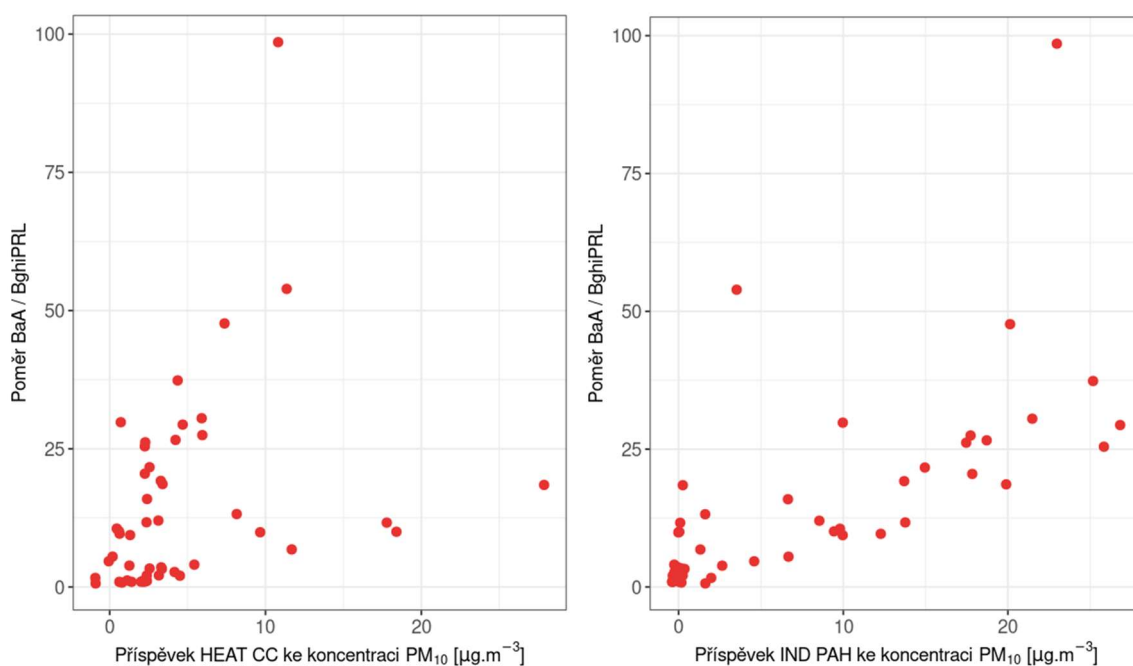
V hlavních aspektech se závěry analýzy zpětných trajektorií shodují s výsledky ostatních metod použitých v této zprávě. Vypovídací hodnota této analýzy je ale omezená a může sloužit jen jako doplňující poklad. Potvrzuje výše vyhodnocené směry, ze kterých znečištění v zájmovém území pochází, nelze se ale spoléhat na určení jejich vzdálenosti, zejména v případě faktorů, které reprezentují zdroje v blízkosti měřicích míst (jednotky km).

5.5.7. Otestování nových markerů znečištění

Vzhledem k tomu, že v rámci projektu byla pořízena dosud nejpodrobněji časově rozlišená datová sada koncentrací polycyklických aromatických uhlovodíků (3hodinové odběry), bylo ověřeno, zda lze definovat diagnostické poměry PAH pro rozlišení emisí z vytápění domácností od emisí z koksárenské výroby. Po analýze koncentrací jednotlivých zástupců PAH při různých směrech větru vzhledem k areálu Liberty Ostrava a.s. byly jako slibné vytipovány poměry benzo[a]anthracenu / indeno[1,2,3-cd]pyrenu a benzo[a]anthracenu / benzo[ghi]perylenu. Statisticky se poměry v případě uvedených různých skupin zdrojů významně lišily, ale při podrobnější analýze výstupů PMF byl zjištěn významný překryv poměrů obou skupin zdrojů. Existovaly datové populace, které vykazovaly podobný poměr v případě obou skupin zdrojů (Obr. 28 a 29).



Obr. 28 Poměr benzo[a]anthracenu / indeno[1,2,3-cd]pyrenu u různých skupin zdrojů

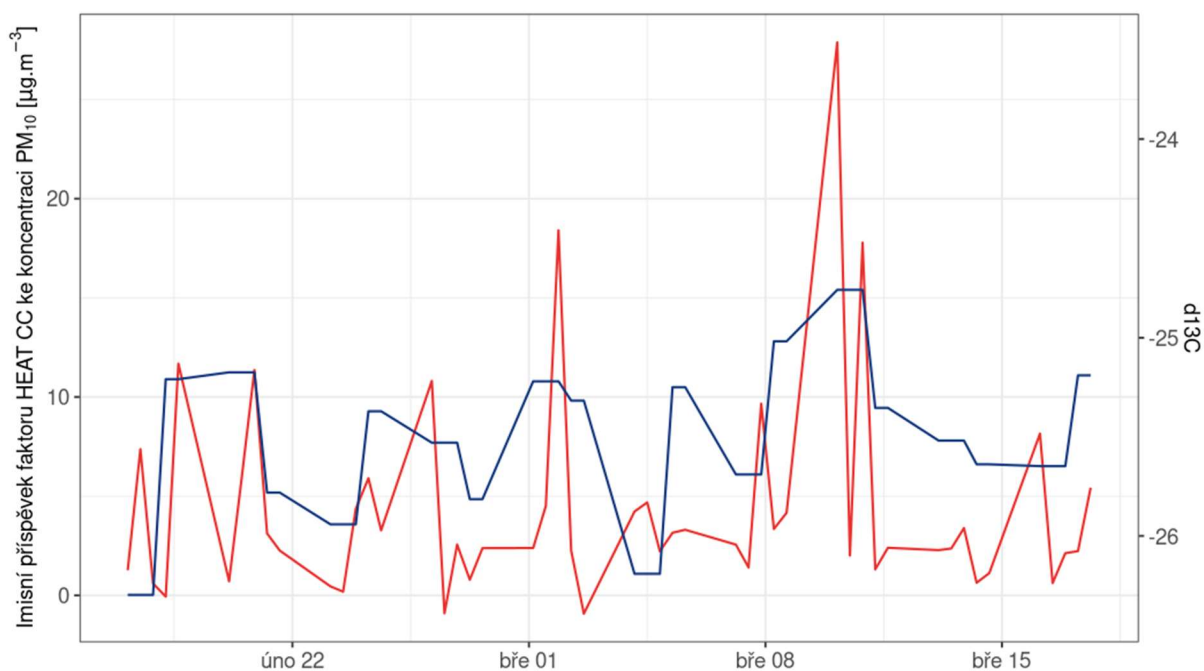


Obr. 29 Poměr benzo[a]anthracenu / benzo[ghi]perylenu u různých skupin zdrojů

Z důvodu existence zmíněných různých populací v datech neposkytovaly uvedené diagnostické poměry významnou přidanou hodnotu pro vyhodnocení pomocí modelu PMF (nevedly k jeho lepší rozlišovací schopnosti, bez těchto poměrů v datové sadě byl výsledek modelu stejný). Podstatné pro rozlišení koksárenských emisí a emisí z domácností byly emise z jiných zdrojů v areálu hutního podniku, transportované při proudění z tohoto směru k měřicím místům společně s koksárenskými emisemi. Pro další případná použití modelu PMF z toho vyplývá, že vliv samostatně provozované koksovy by byl bez dalších hutních zdrojů v její blízkosti od vlivu domácností velmi obtížně rozlišitelný. Nedostatek spolehlivých markerů pro rozlišení znečištění z koksoven nadále přetrvává.

5.5.8. Porovnání s identifikací zdrojů provedenou izotopovou metodou

Výsledky izotopových analýz, které byly provedeny v rámci projektu ARAMIS ČGS souběžně s měřením ČHMÚ (únor až březen 2021), naznačují souvislost zastoupení izotopu ¹³C s faktorem vytápění domácností uhlím (Obr. 30). V případě jiných modelových faktorů nebyla korelace s hodnotou δ¹³C prokázána. Porovnat bylo možné pouze imisní příspěvky faktoru vytápění domácností uhlím („HEAT CC“) zjištěné v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, s koncentrací izotopů v lokalitě Ostrava-Radvanice, OZO (v lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, nejsou výsledky izotopové analýzy k dispozici), což do porovnání vnáší zvýšenou nejistotu. Z hlediska převládajícího směru větru a polohy hlavních zdrojů znečišťování (závětrná strana Liberty Ostrava a.s., předpokládaný podobný vliv vytápění) se jedná o podobné lokality a výsledek porovnání dokládá, že tato nedokonalost nemá na porovnání zásadní vliv.



Obr. 30 Imisní příspěvek vytápění domácností uhlím a $\delta^{13}C$ v atmosférickém aerosolu PM_{10}

To, že $\delta^{13}C$ koreluje pouze s faktorem vytápění domácností uhlím („HEAT CC“) dokládá, že tento typ zdrojů má na koncentraci uhlíkatých částic v zájmovém území rozhodující vliv.

Hodnota $\delta^{13}C$ v uvedeném grafu odpovídá dle zkušeností odborníků ČGS ostravsko-karvinskému uhlí (polské uhlí by se vyznačovalo vyššími hodnotami). To podporuje závěr identifikace zdrojů, že emise PM_{10} z vytápění domácností v zájmovém území pocházejí většinou z Ostravska, popř. Karvinska, nikoliv z polské části Slezska (občasné meteorologické situace, které umožňují dálkový přenos znečištění z tohoto směru, nejsou z hlediska průměrné koncentrace PM_{10} rozhodující).

6. Závěr

V rámci projektu ARAMIS, dílčího cíle 2.1, byla provedena identifikace zdrojů znečišťování ovzduší na základě zimní intenzivní části měřicí kampaně ve třech lokalitách ve východní části Ostravy. Hodnocení bylo založeno na statistickém imisně-meteorologickém posouzení naměřených koncentrací a receptorovém matematickém modelu PMF. Podstatným metodickým rozdílem oproti předchozím hodnocením příčin významného znečištění ovzduší v této oblasti bylo využití tříhodinové doby odběru vzorků aerosolu PM₁₀. To umožnilo dosáhnout vyššího detailu a spolehlivosti hodnocení, zejména v případě benzo[*a*]pyrenu, zdravotně nejrizikovější znečišťující látky v této oblasti.

Porovnáním výsledků z jednotlivých měřicích míst byla stanovena reprezentativnost provedeného hodnocení pro **zájmové území vymezené přibližně sídly Vratimov, Slezská Ostrava, Rychvald, Horní Suchá, Havířov. Vyslovené závěry jsou platné pro zimní až přechodné období (topnou sezonu) ve střednědobém časovém horizontu (několik let).**

Identifikováno bylo celkem 10 faktorů, které jsou příčinou zdejšího znečištění ovzduší. Provedeným hodnocením bylo zjištěno, že **lokalita** stálého imisního monitoringu Statutárního města Ostrava a Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě **Ostrava-Radvanice, Nad Obcí (TORE), je ve shodě s její klasifikací a účelem umístěna v místě silného lokálního vlivu průmyslového zdroje. Údaje z této stanice jsou reprezentativní pouze pro její nejbližší okolí (řádově stovky metrů od stanice) a nejsou použitelné pro hodnocení kvality a příčin znečištění ovzduší v Ostravě-Radvanicích jako celku, v okolních městských částech, ani v širším okolí. Zvýšená úroveň znečištění v okruhu 500 m až 1 km od této stanice ovlivňuje populaci čítající odhadem 400 až 1 500 osob.**

V celém zájmovém území je nejvýznamnější část znečištění ovzduší suspendovanými částicemi PM₁₀ v chladné části roku tvořena sekundárními částicemi - síranem a dusičnanem amonným (třetina až dvě pětiny; v okolí lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, přibližně pětina naměřené koncentrační úrovně znečištění). Hlavní příčinou vzniku tohoto typu znečištění jsou zde emise individuálního vytápění domácností.

Příčiny znečištění v **zimním až přechodném období** lze v **zájmovém území s výjimkou okolí lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí**, shrnout takto:

- Druhý nejvýznamnější vliv na koncentraci PM₁₀ mají primární částice vznikající při individuálním vytápění domácností (čtvrtina až třetina celkové koncentrace).
- Podíl primárních částic (otěrů a výfukových emisí) ze silniční dopravy není sice sám o sobě významný, ale v součtu se sekundárním aerosolem, který je indukovan výfukovými plyny, působí doprava celkový imisní příspěvek okolo pětiny až čtvrtiny koncentrace PM₁₀.
- Ostatní zdroje znečišťování ovzduší mají na koncentraci PM₁₀ v zájmovém území s výjimkou okolí lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, nevýznamný vliv.
- Znečištění benzo[*a*]pyrenem pochází v celém zájmovém území s výjimkou lokality Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, dominantně z individuálního vytápění domácností uhlím. Vytápění domácností je zdrojem téměř 90 % imisní koncentrace.

V lokalitě Ostrava-Radvanice, Nad Obcí, se v **zimním až přechodném období** podíl zdrojů primárních částic od zbytku zájmového území v některých ohledech zásadně liší. Podstatné jsou tyto rozdíly oproti výše uvedenému hodnocení:

- podíl vytápění domácností na imisní koncentraci PM₁₀ a benzo[*a*]pyrenu je zde v absolutní hodnotě podobný jako na ostatních dvou lokalitách, relativně je ale v důsledku významného příspěvku průmyslových emisí ze všech tří hodnocených lokalit nižší.

- V případě PM_{10} zde průmyslové zdroje působí asi třetinu znečištění, zatímco na vytápění domácností připadá asi pětina.
- Znečištění benzo[a]pyrenem zde pochází převážně z areálu hutního podniku Liberty Ostrava a.s. (asi dvě třetiny, téměř celá zbývající část připadá na vytápění domácností).

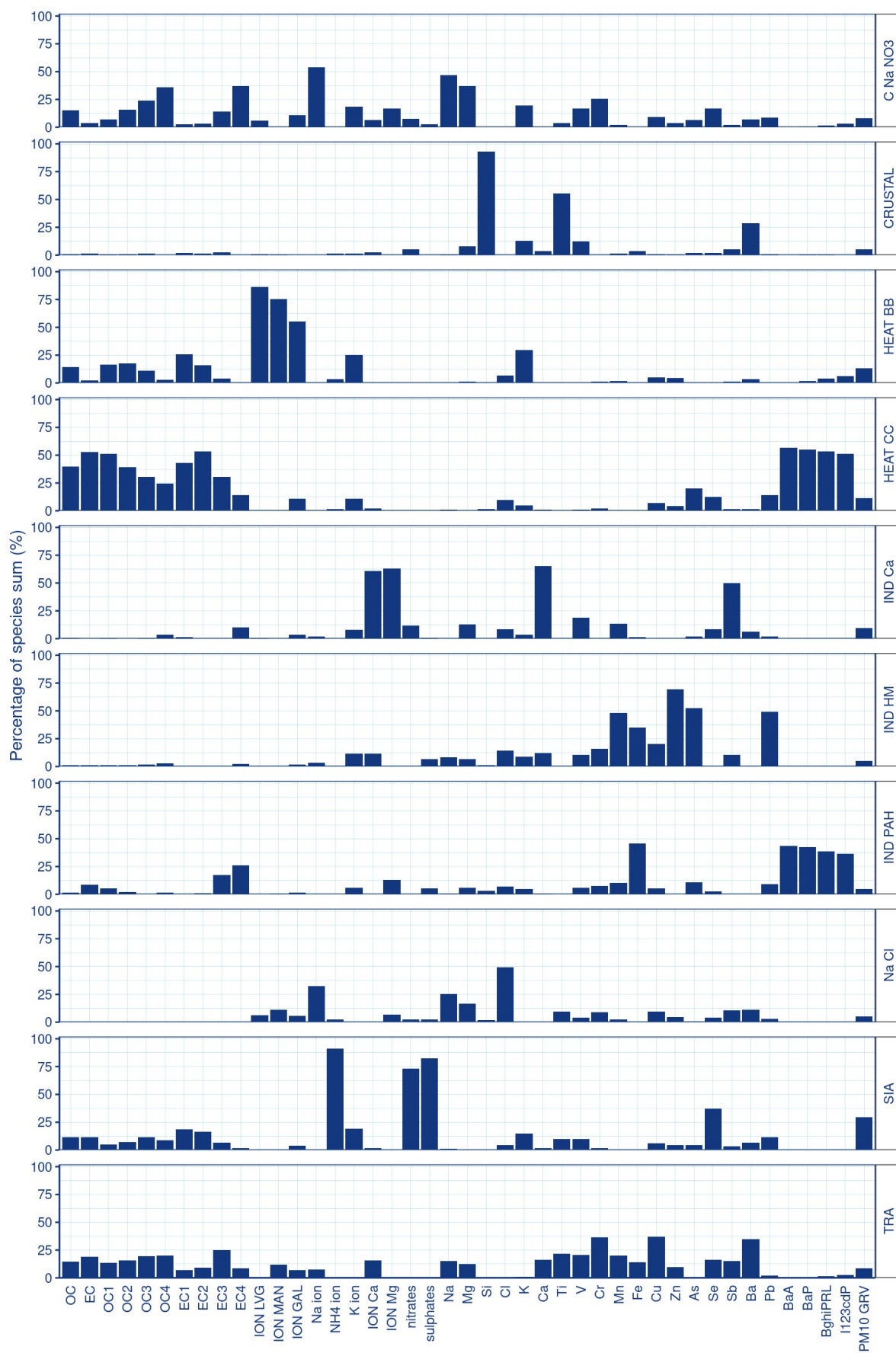
Literatura

- [1] ČHMÚ, 2021. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2020. [online]. [cit. 7. 6. 2022]. Dostupné z WWW:
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/20groc/gr20cz/20_00_obsah_v1.pdf.
- [2] Schreiberová, M., Vlasáková, L., Vlček, O., Šmejdiřová, J., Horálek, J., Bieser, J., 2020. Benzo[a]pyrene in the Ambient Air in the Czech Republic: Emission Sources, Current and Long-Term Monitoring Analysis and Human Exposure. Atmosphere 2020, 11, 955.
<https://doi.org/10.3390/atmos11090955>.
- [3] Volná, V., Hladký, D., 2021. Zpráva o průběhu sanačních prací ropných lagun v Ostravě a identifikaci špiček koncentrací SO₂ v jejich okolí. In: Meteorologické zprávy, roč. 74, č. 3, s. 76–83. ISSN 0026-1173.
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2021/MZ_03_2021.pdf.
- [4] Volná, V., Hladký, D., Seibert, R., Krejčí, B., 2022. Transboundary Air Pollution Transport of PM₁₀ and Benzo[a]pyrene in the Czech–Polish Border Region. Atmosphere 2022, 13, 341.
<https://doi.org/10.3390/atmos13020341>.
- [5] Norris, G.; Duvall, R.; Brown, S.; Bai, S. Positive Matrix Factorization (PMF), Fundamentals and User Guide; U. S. EPA: Washington, DC, USA, 2014. Available online:
https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf
 (accessed on 30 April 2020).
- [6] Hladký, D., Seibert, R., Volná, V., Krejčí, B., 2022, Vyhodnocení měření na monitorovacích stanicích Studénka a Věřňovice v roce 2021, Projekt Měření znečištění ovzduší vzorkovací pro identifikaci zdrojů znečišťování na dvou lokalitách v Moravskoslezském kraji 2021, Závěrečná zpráva projektu (1. 1.–31. 12. 2021).
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/OCO/prehledy/studenka_vernovice/MSK_2021_final.pdf.
- [7] Hazem S El-Zanan, Barbara Zielinska, Lynn R Mazzoleni & D. Alan Hansen (2009) Analytical Determination of the Aerosol Organic Mass-to-Organic Carbon Ratio, Journal of the Air & Waste Management Association, 59:1, 58-69, DOI: 10.3155/1047-3289.59.1.58
- [8] ČHMÚ, TD 000147, Identifikace zdrojů znečišťování ovzduší - souhrnná zpráva za oblast 1 (Třinecko), 11. 02. 2022.
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/assets/td_147.pdf.
- [9] ČHMÚ, TD 000148, Identifikace zdrojů znečišťování ovzduší - souhrnná zpráva za oblast 2 (Kladensko), 11. 02. 2022.
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/assets/td_148.pdf.
- [10] ČHMÚ, TD 000149, Identifikace zdrojů znečišťování ovzduší - souhrnná zpráva za oblast 3 (Brno, Hradec Králové, Olomouc), 11. 02. 2022.
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/assets/td_149.pdf.
- [11] ČHMÚ, TD 000150, Identifikace zdrojů znečišťování ovzduší - souhrnná zpráva za oblasti 1 až 3, 11. 02. 2022.
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/assets/td_150.pdf.
- [12] Seibert, R.; Nikolova, I.; Volná, V.; Krejčí, B.; Hladký, D. Air Pollution Sources' Contribution to PM_{2.5} Concentration in the Northeastern Part of the Czech Republic. Atmosphere 2020, 11, 522.
<https://doi.org/10.3390/atmos11050522>.
- [13] Seibert, R.; Nikolova, I.; Volná, V.; Krejčí, B.; Hladký, D. Source Apportionment of PM_{2.5}, PAH and Arsenic Air Pollution in Central Bohemia. Environments 2021, 8, 107.
<https://doi.org/10.3390/environments8100107>.

- [14] MŽP ČR, Program zlepšování kvality ovzduší Aglomerace Ostrava/Karviná/Frýdek-Místek-CZ08A, [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/platne_programy_zlepsovani_kvality_2016/\\$FILE/OOO-PZKO_CZ08A-20190718.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/platne_programy_zlepsovani_kvality_2016/$FILE/OOO-PZKO_CZ08A-20190718.pdf).
- [15] Vossler, T.; Cernikovský, L.; Novák, J.; Placha, H.; Krejčí, B.; Nikolová, I.; Chalupnicková, E.; Williams, R. An Investigation of local and regional sources of fine particulate matter in Ostrava, the Czech Republic. Atmos. Pollut. Res. 2015
- [16] Vossler, T.; Cernikovský, L.; Novák, J.; Williams, R. Source apportionment with uncertainty estimates of fine particulate matter in Ostrava, Czech Republic using Positive Matrix Factorization. Atmos. Pollut. Res. 2016

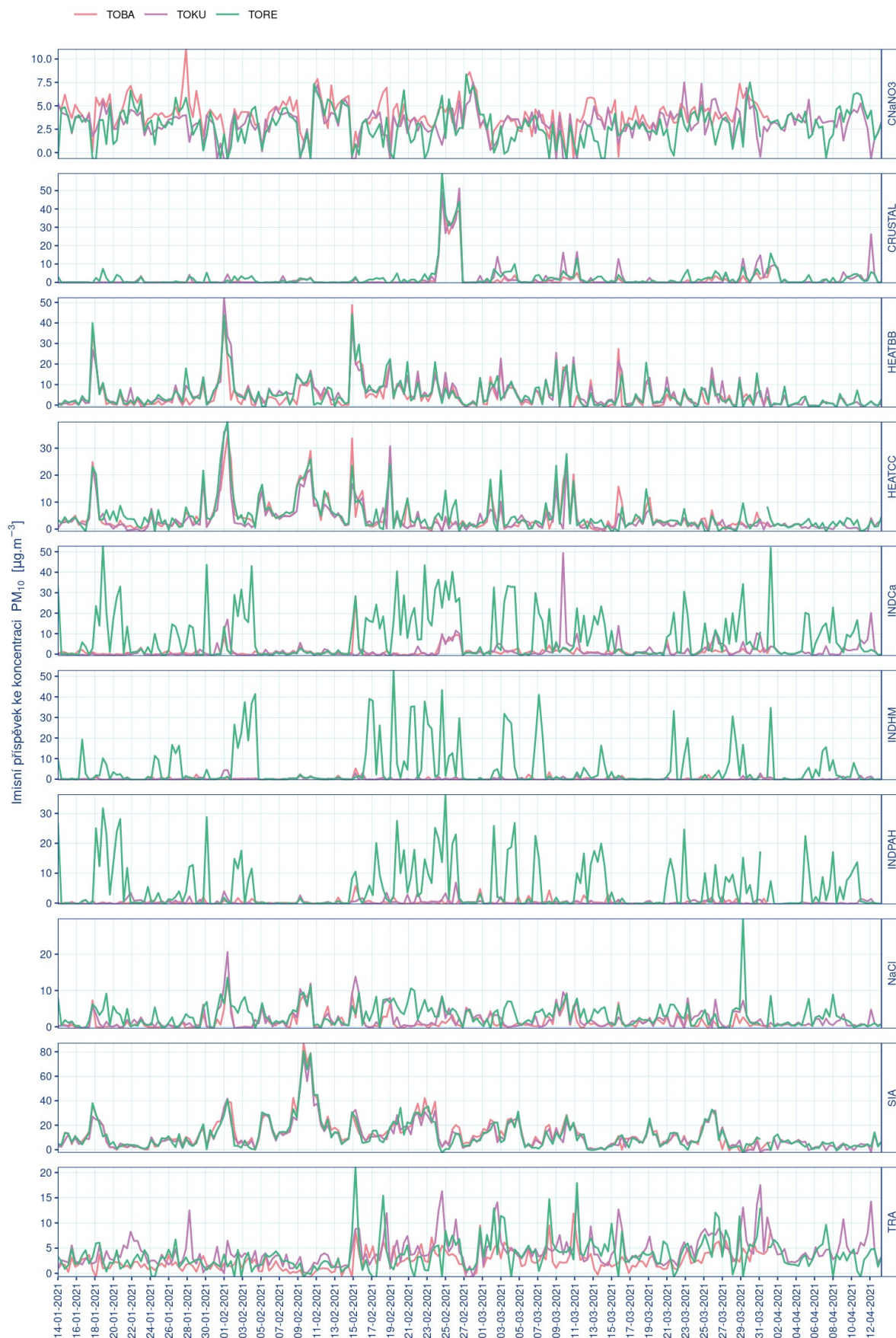
Příloha 1

Chemické profily identifikovaných faktorů



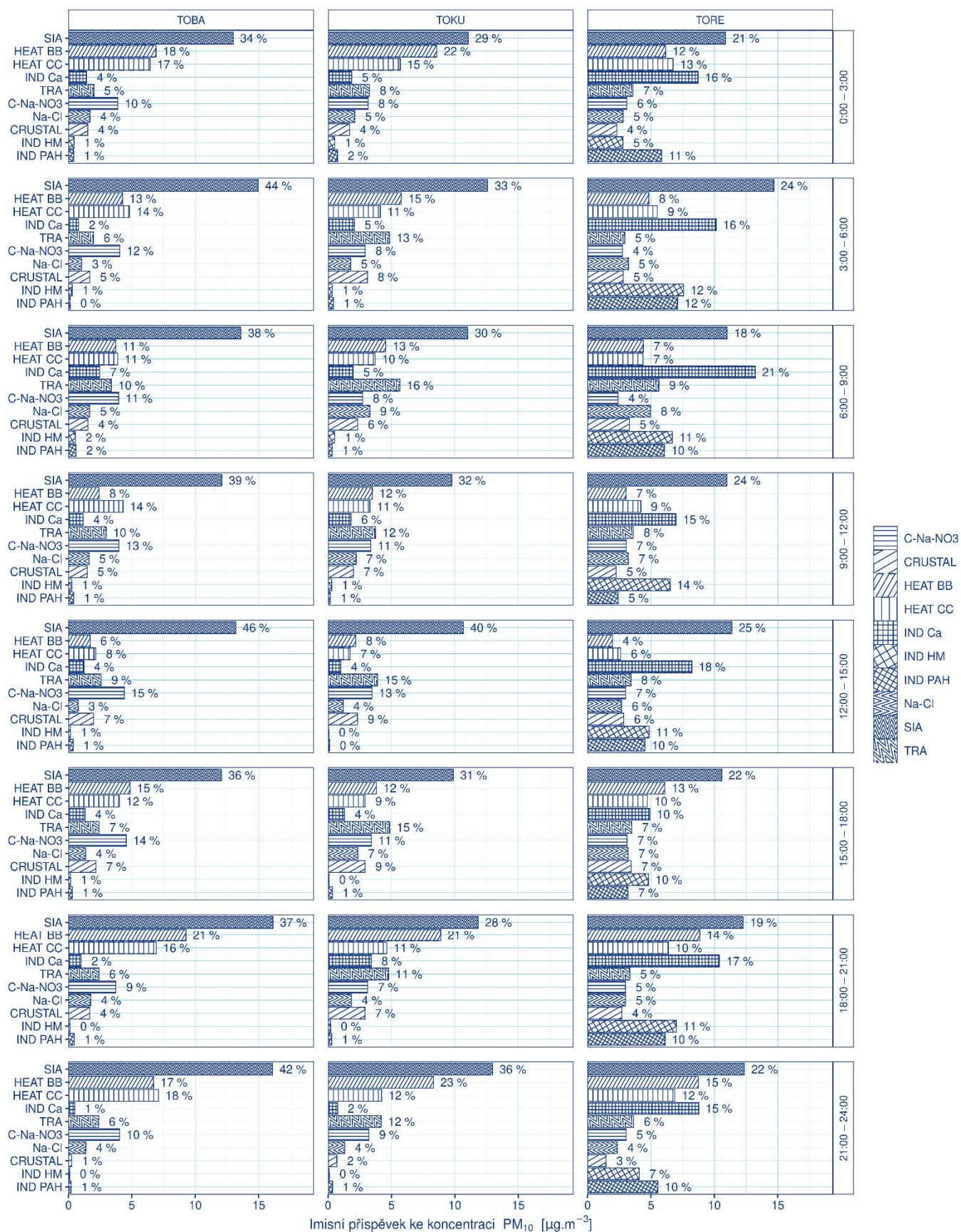
Příloha 2

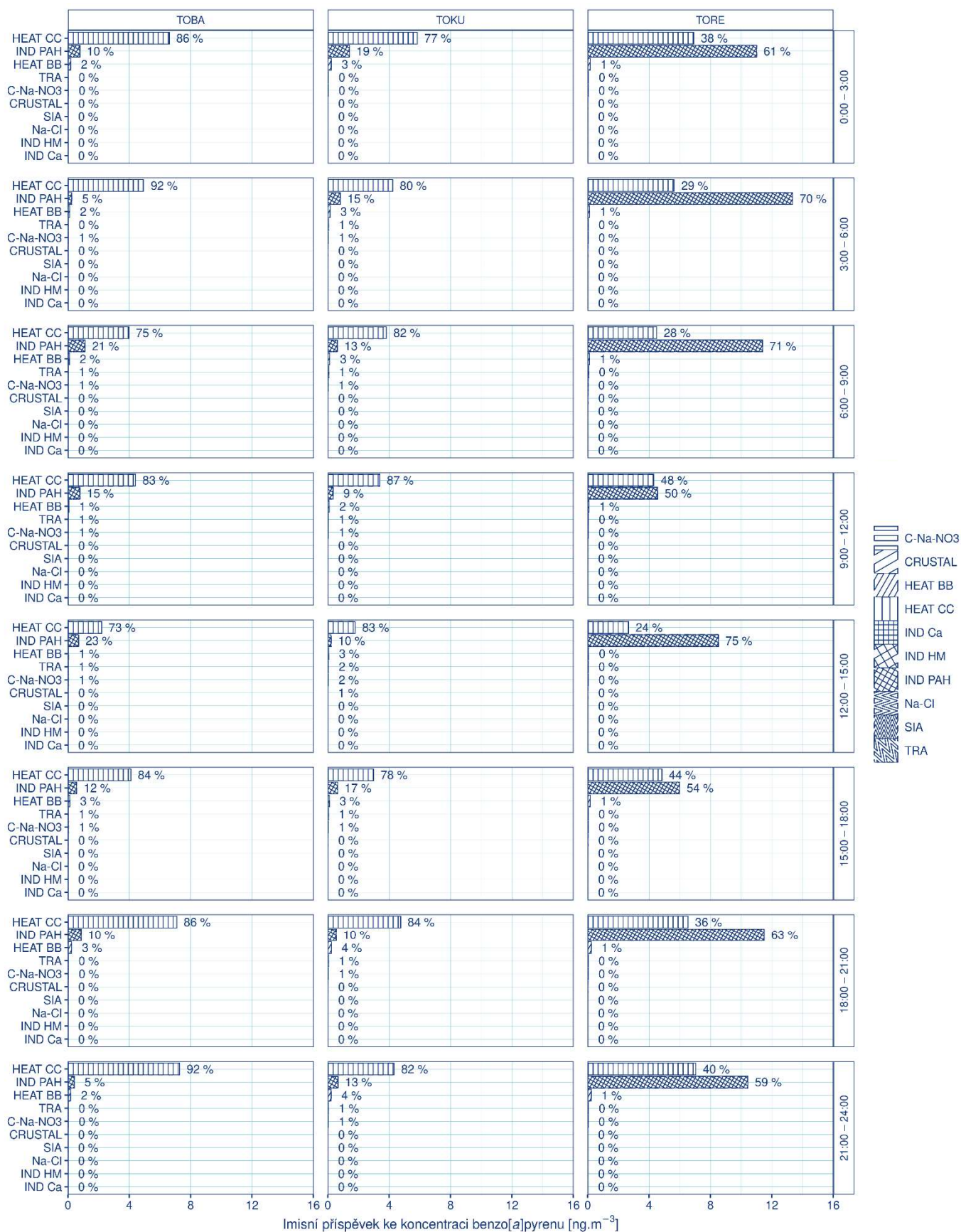
Časové řady faktorových imisních příspěvků ke koncentraci PM₁₀



Příloha 3

Grafy časově rozčleněných imisních příspěvků identifikovaných faktorů

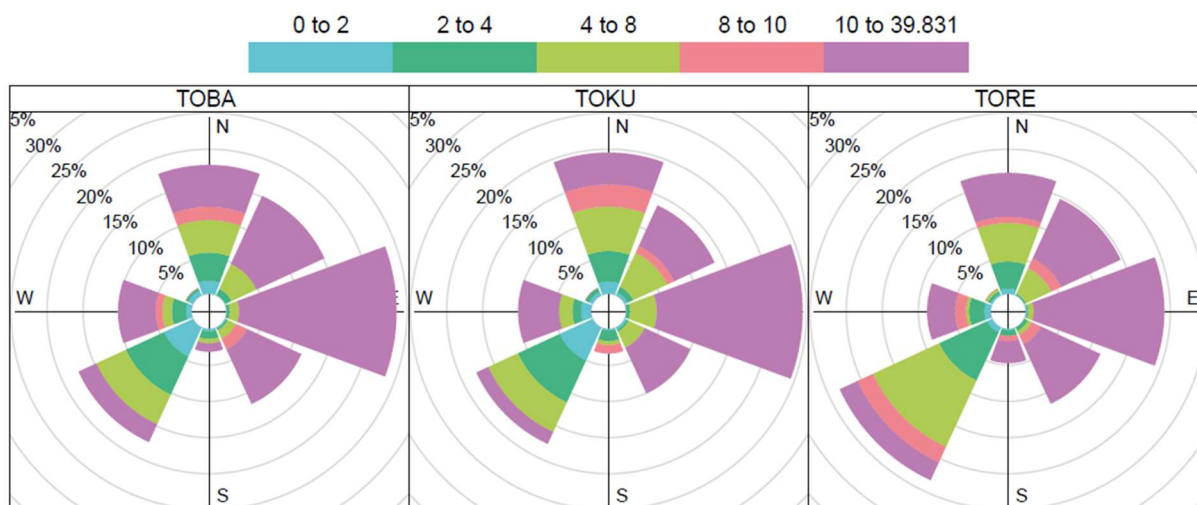




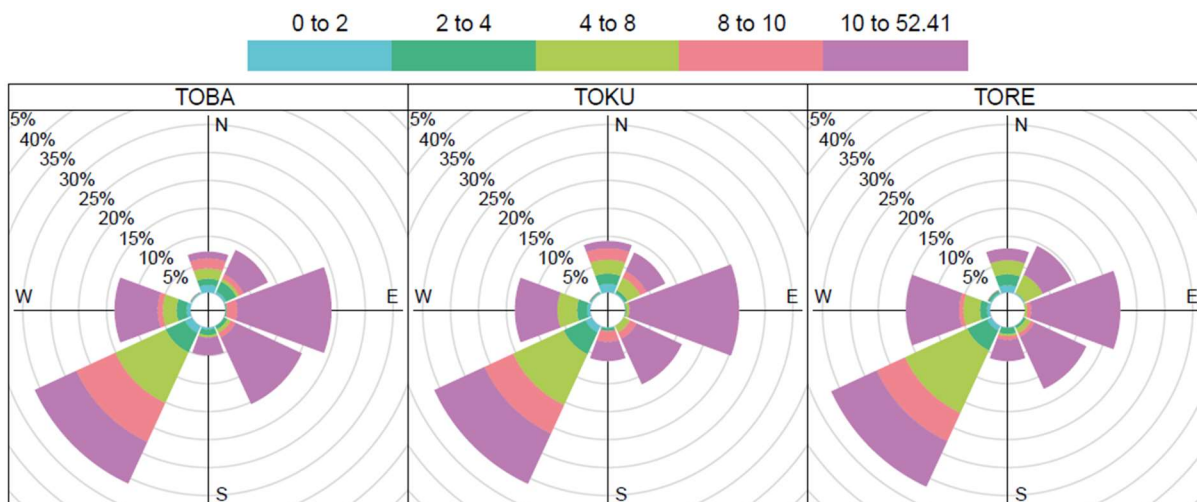
Příloha 4

Vážené koncentrační různice faktorových příspěvků ke koncentraci aerosolu PM₁₀ [μg.m⁻³]

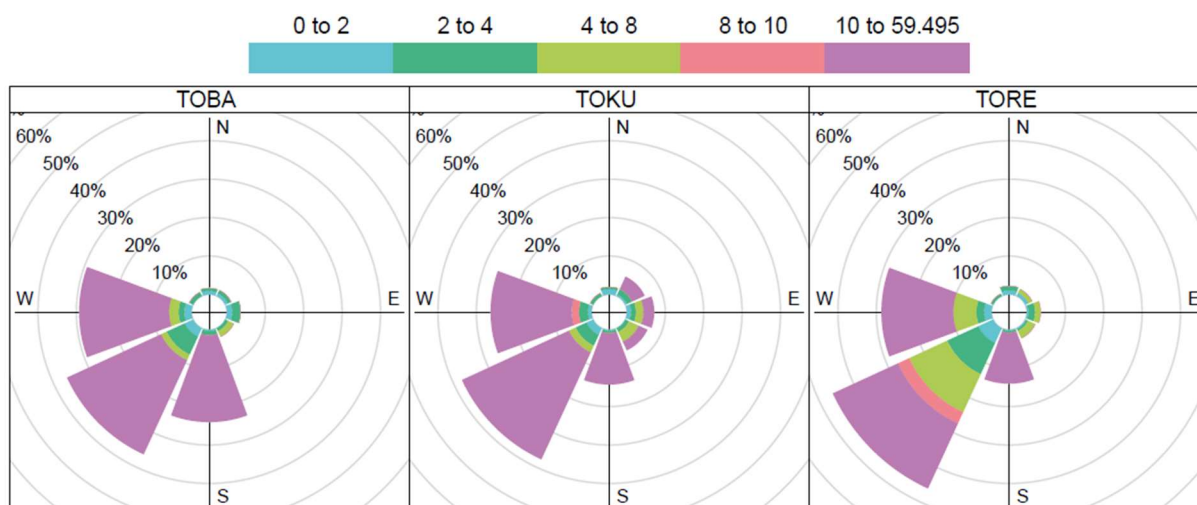
HEAT CC



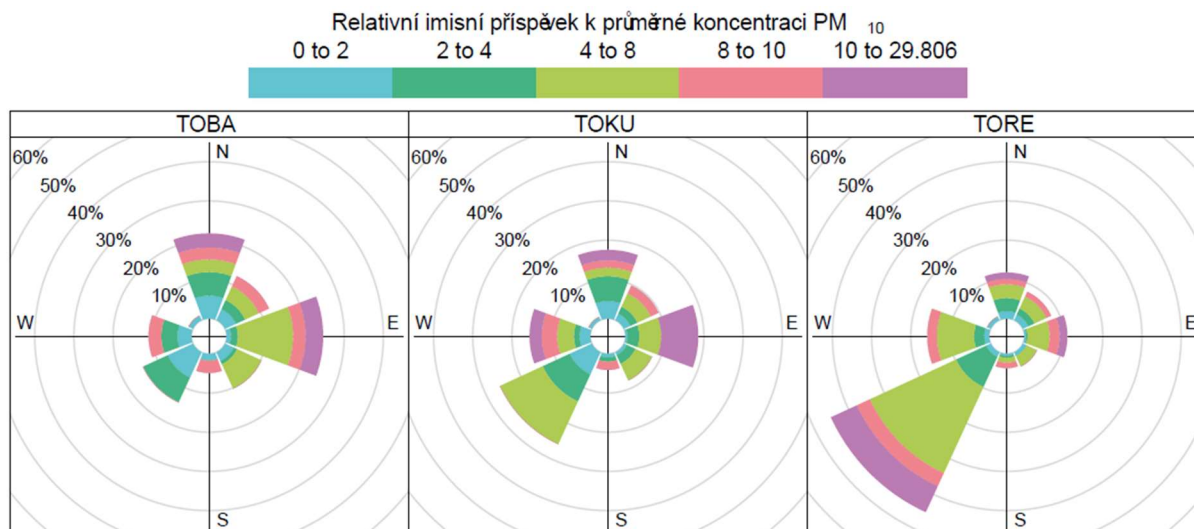
HEAT BB



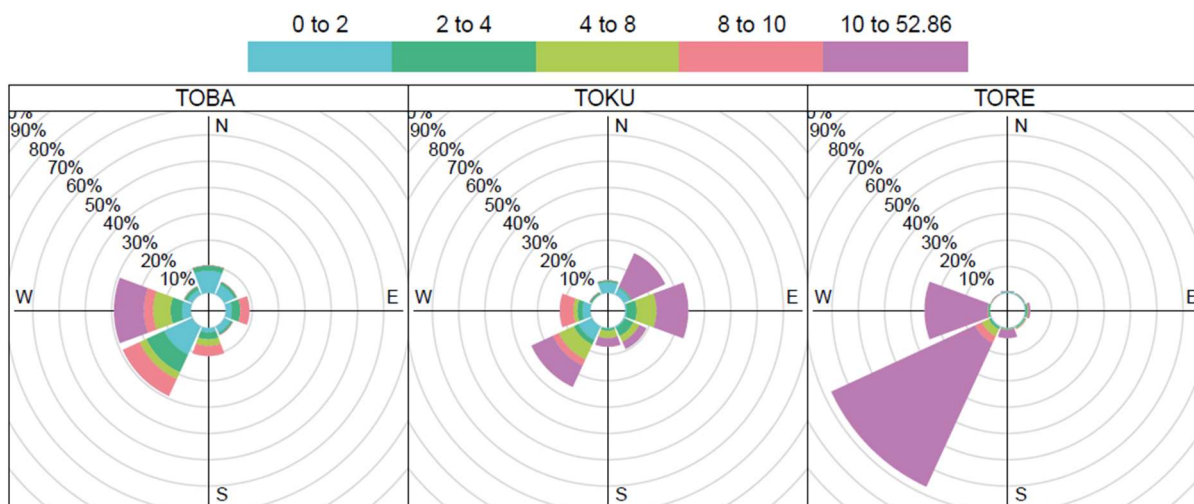
CRUSTAL



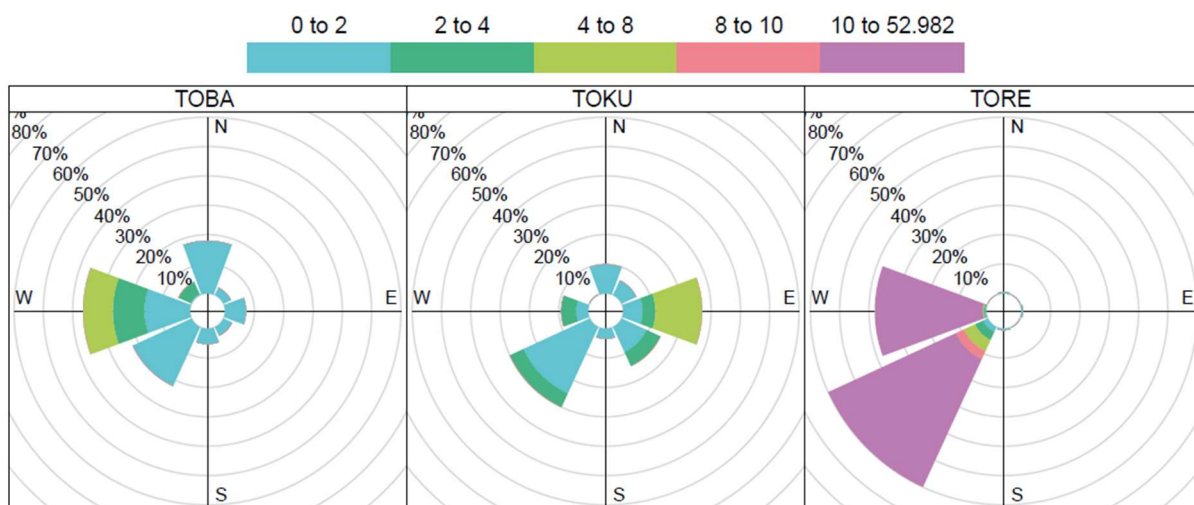
Na-Cl



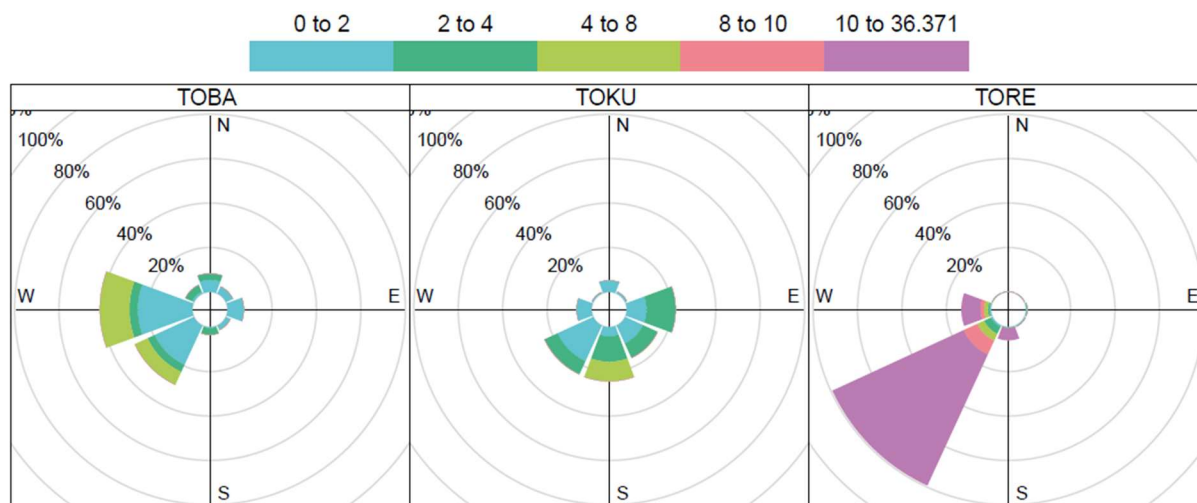
IND Ca



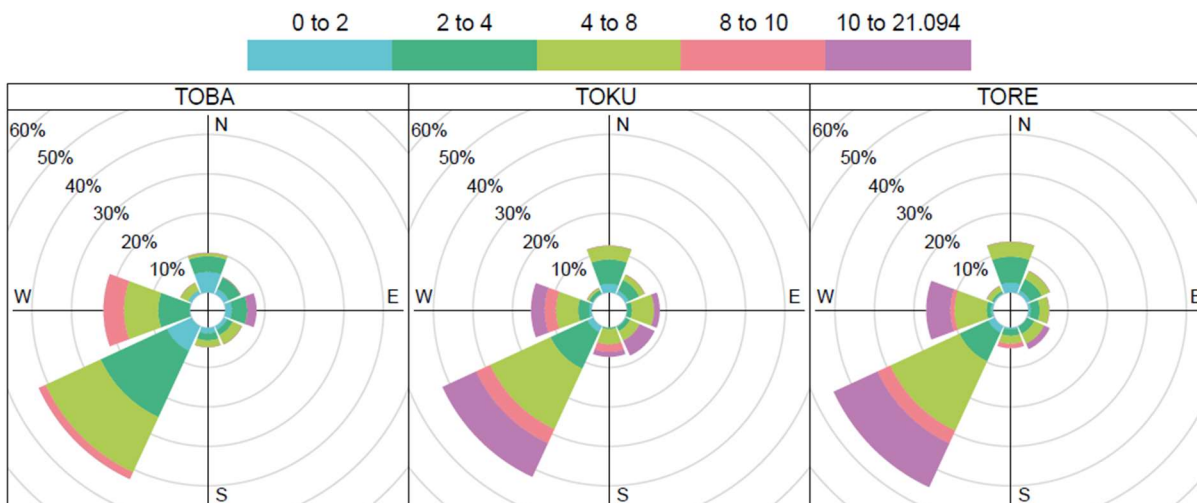
IND HM



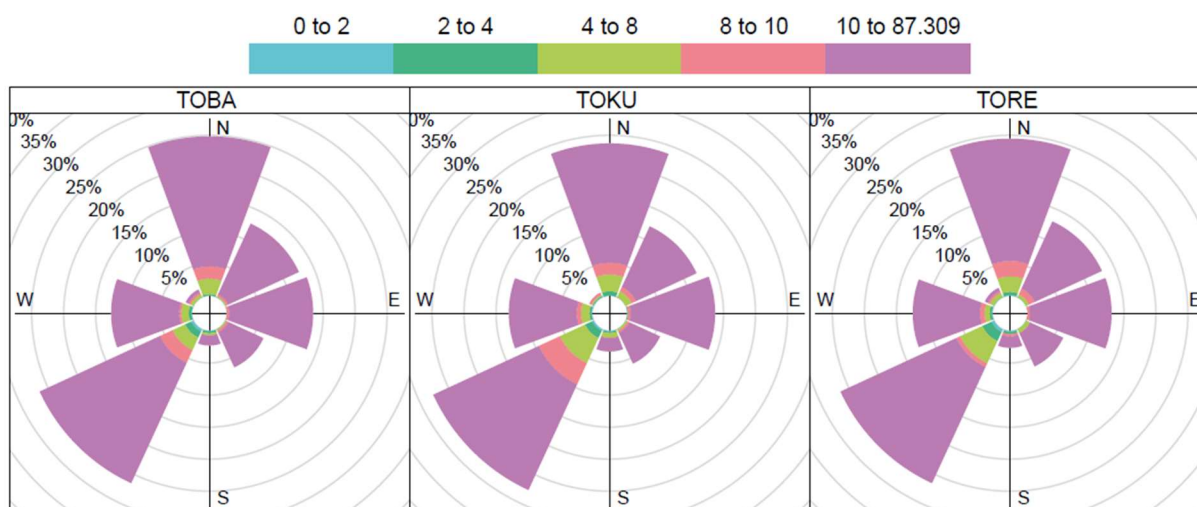
IND PAH



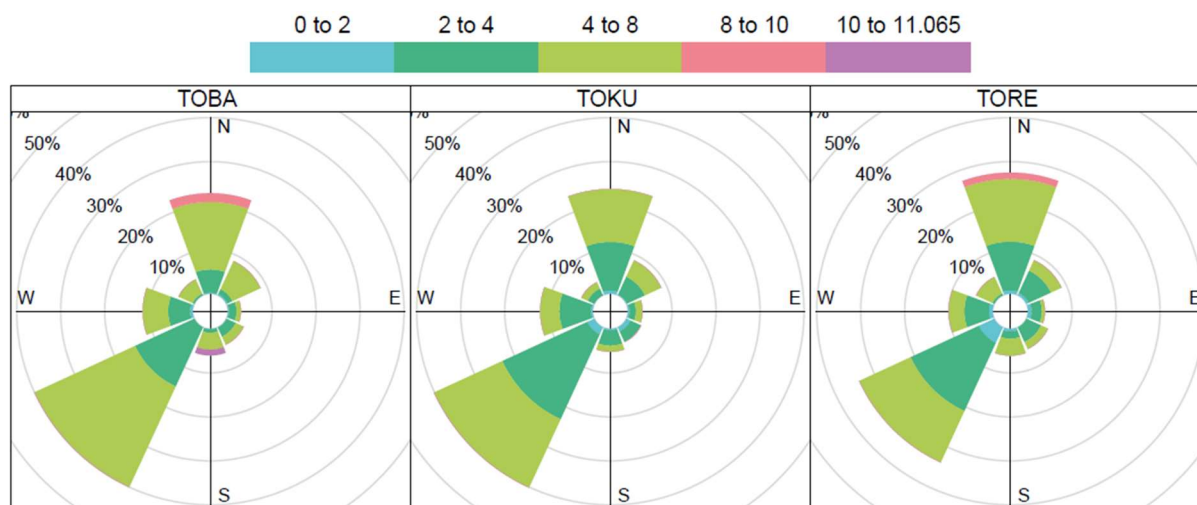
TRA



SIA



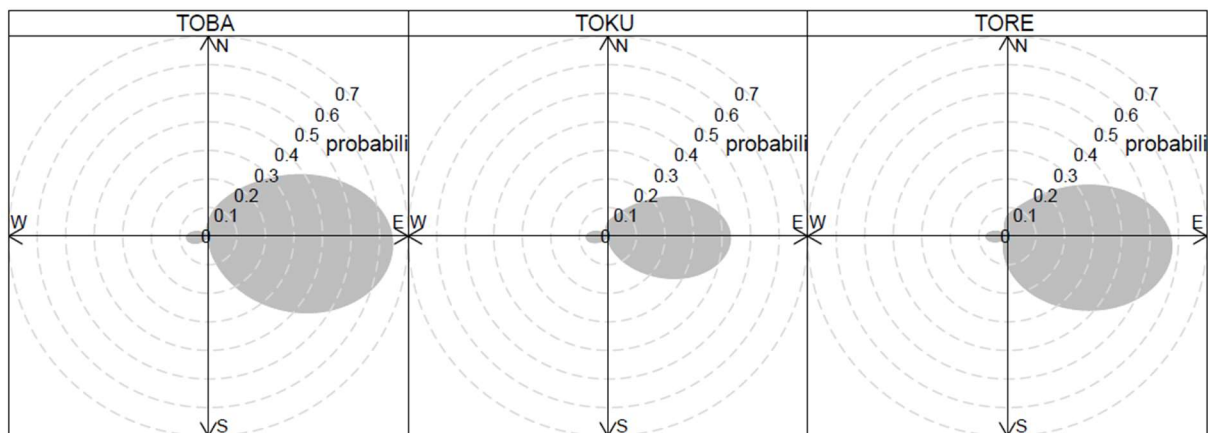
C-Na-NO3



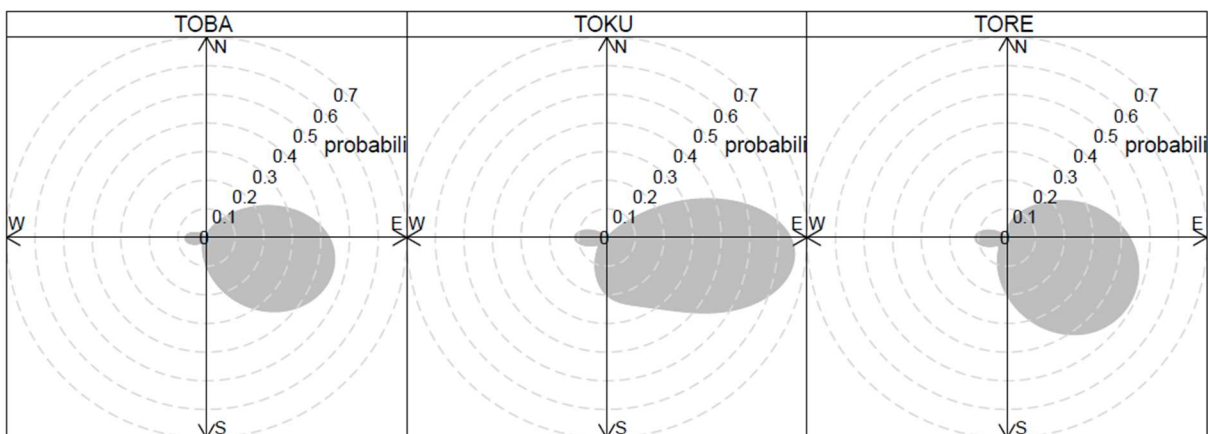
Příloha 5

Grafy CPF pro faktorové příspěvky ke koncentraci aerosolu PM_{10} [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

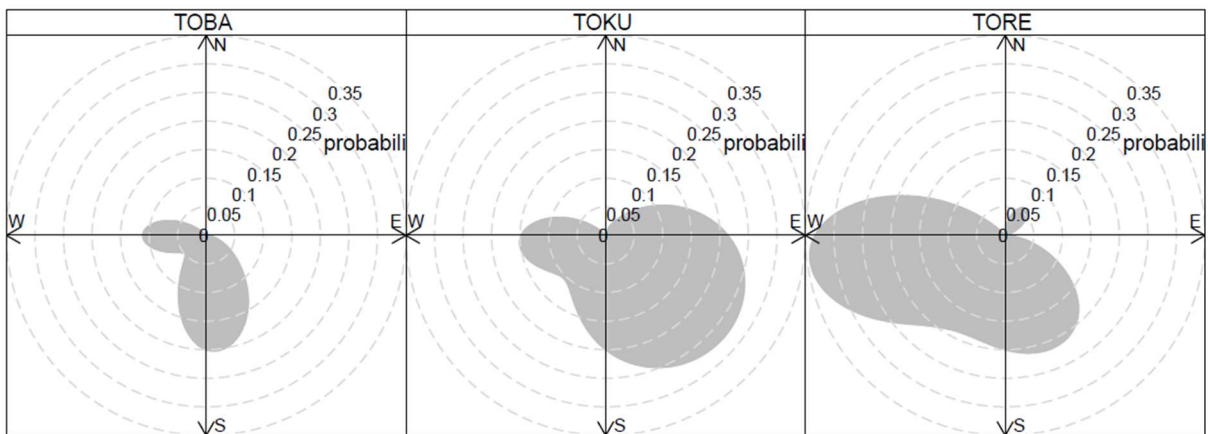
HEAT CC



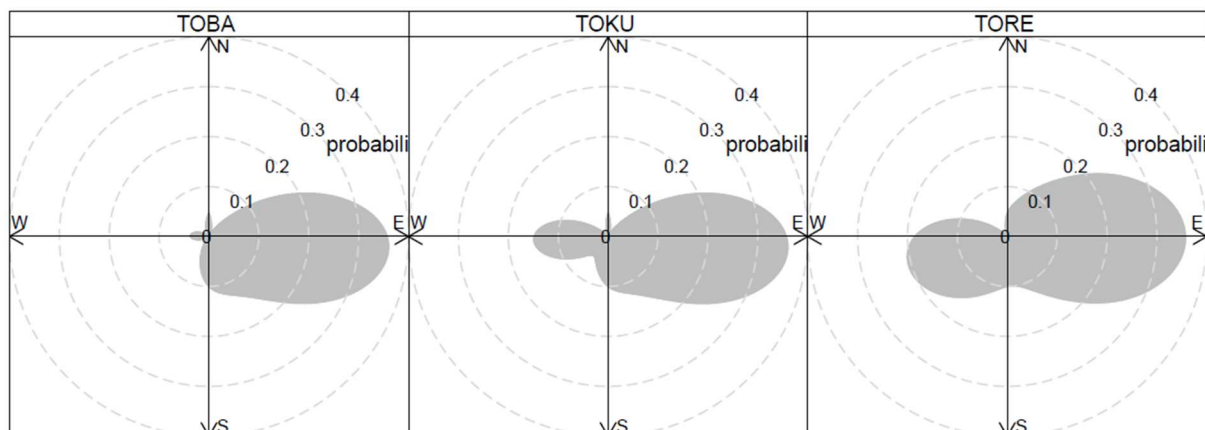
HEAT BB



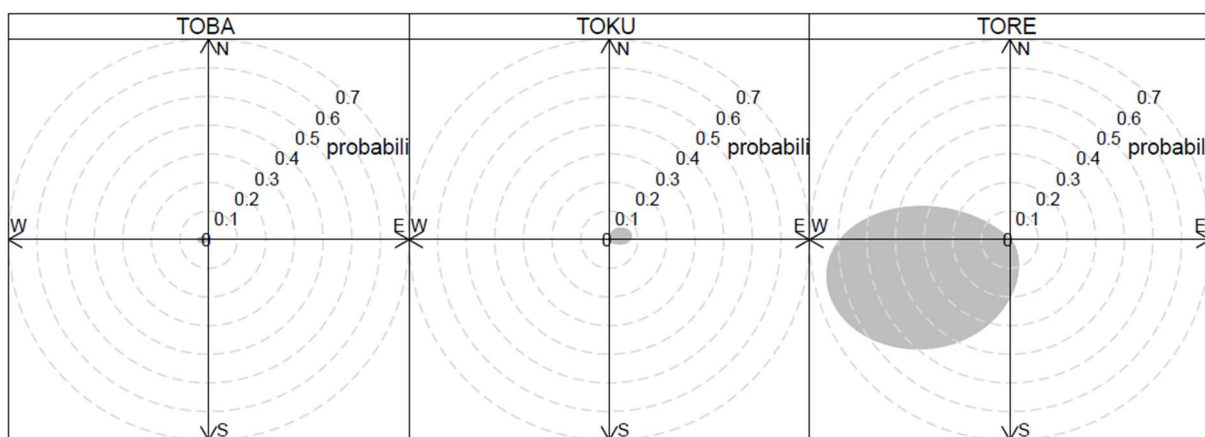
CRUSTAL



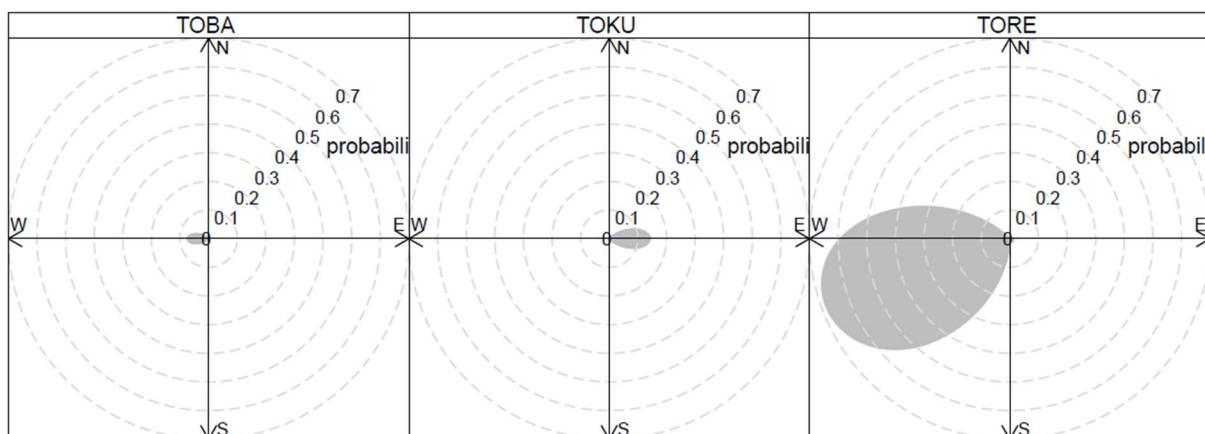
Na-Cl



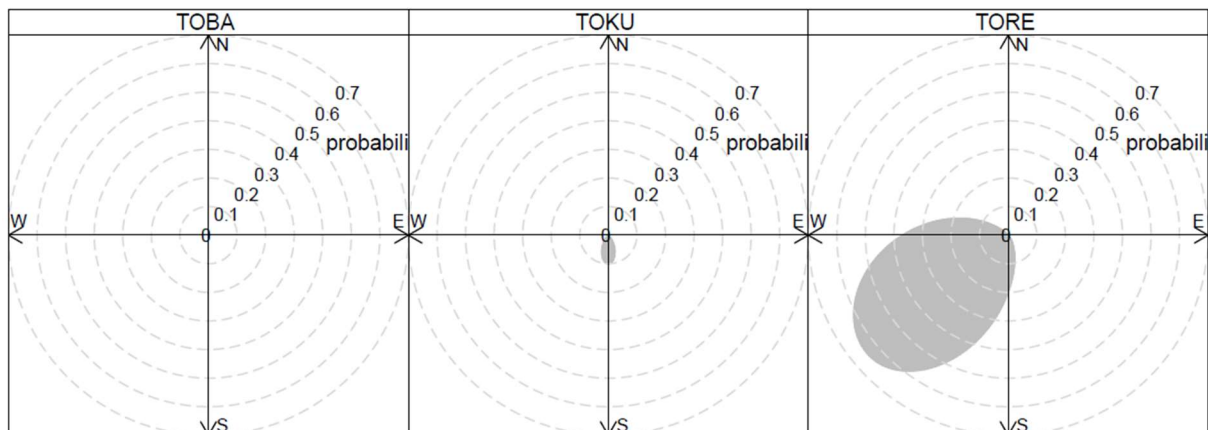
IND Ca



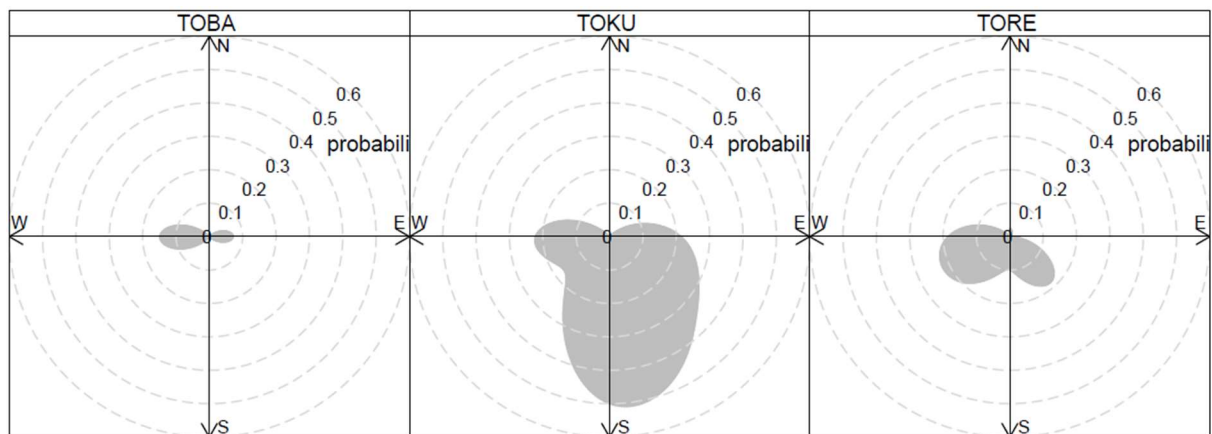
IND HM



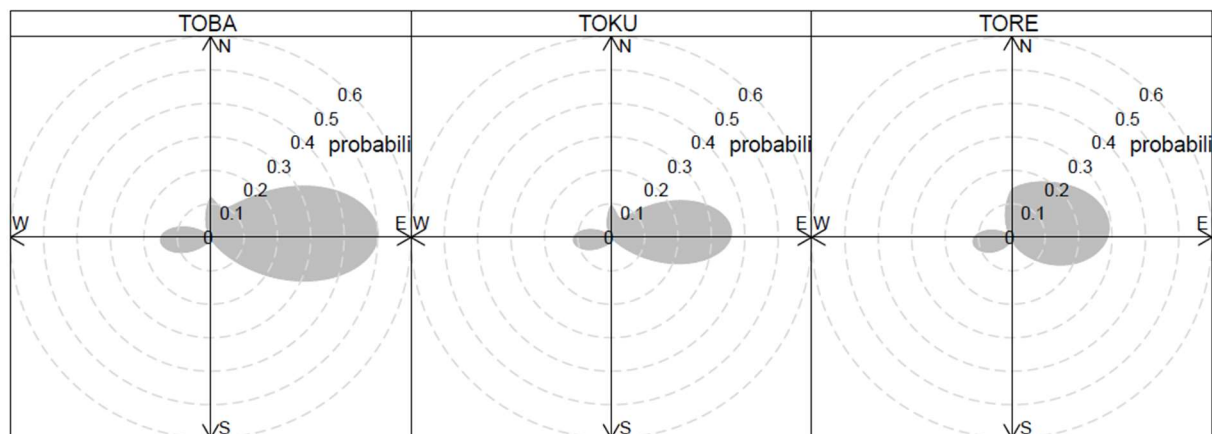
IND PAH



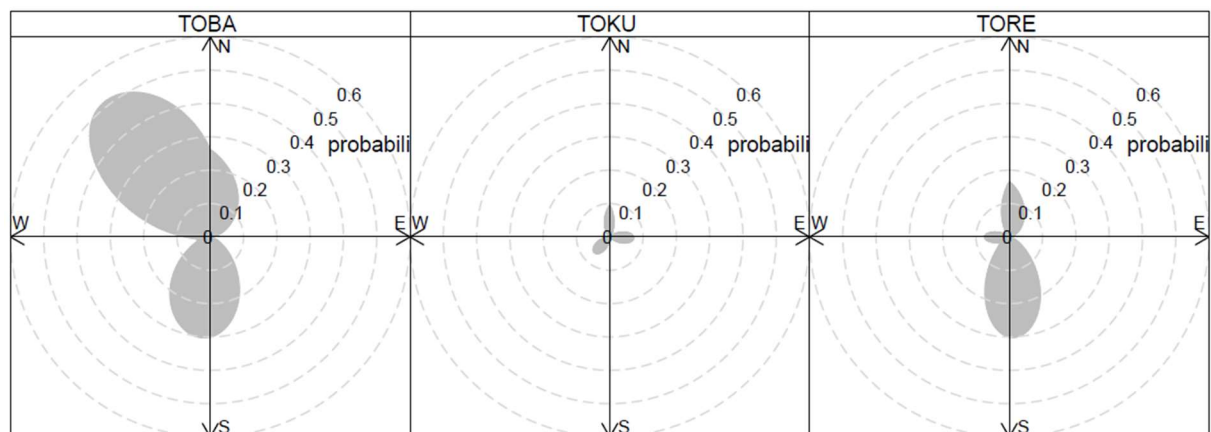
TRA



SIA



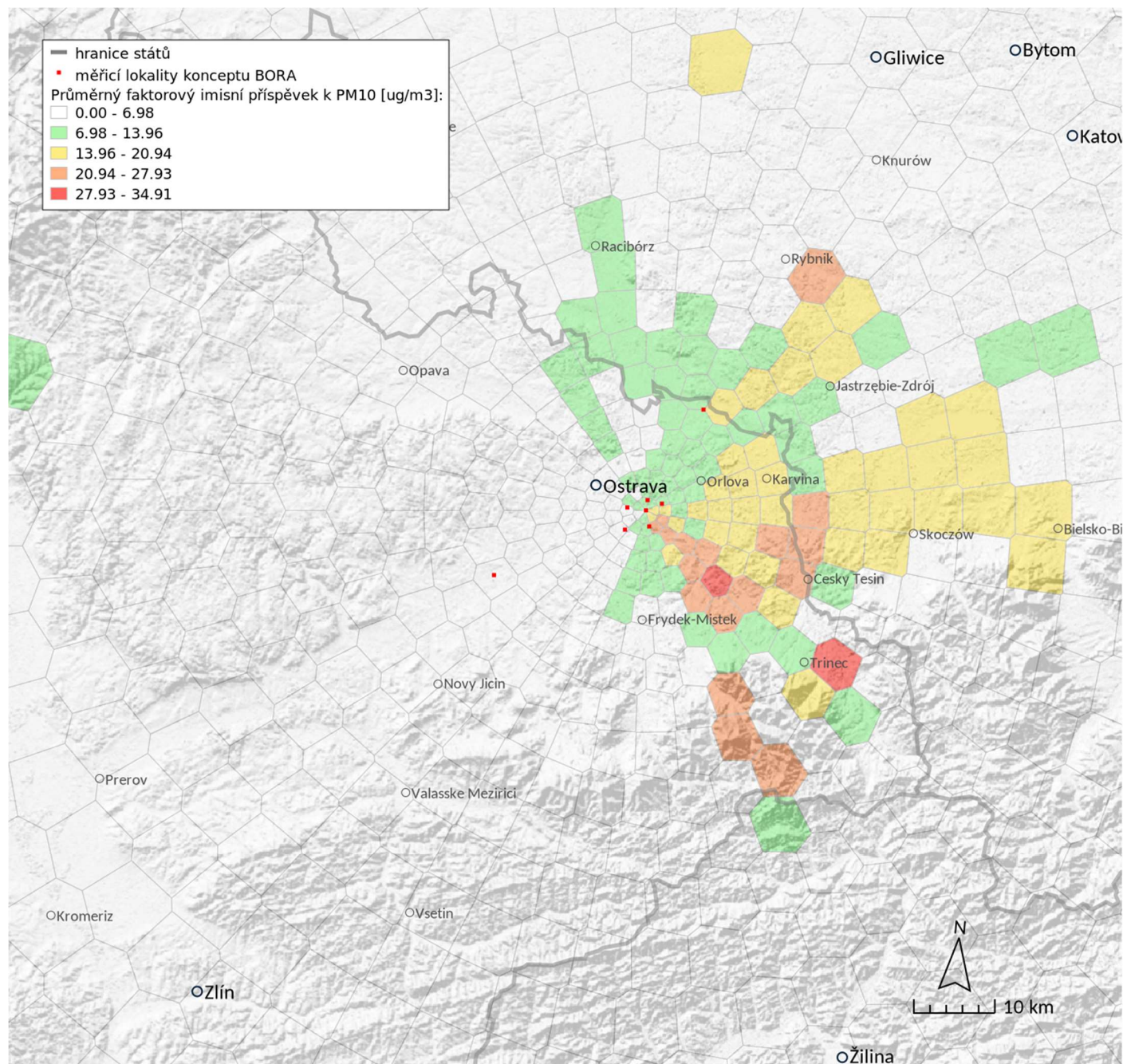
C-Na-NO₃



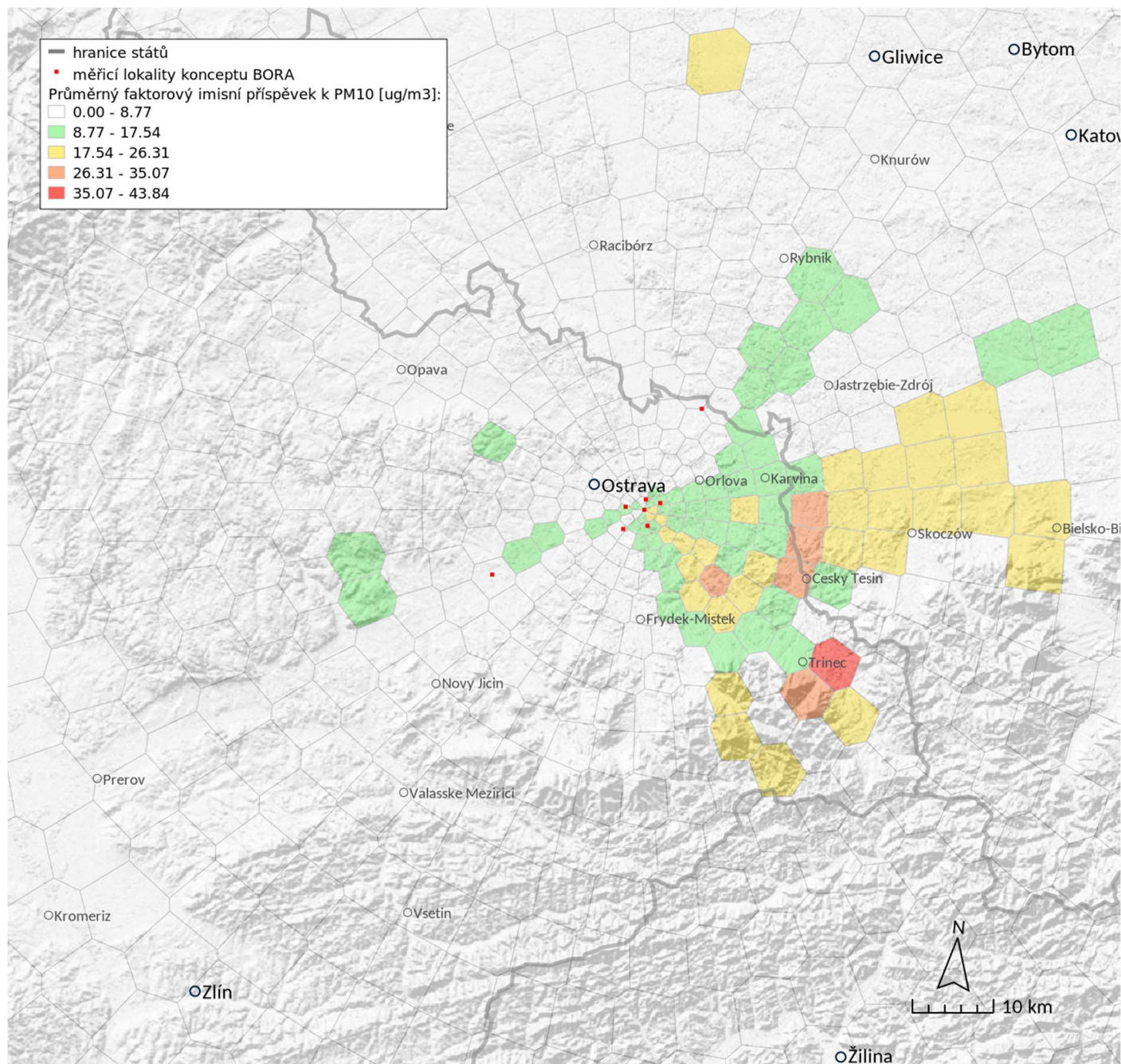
Příloha 6

Grafický výstup analýzy zpětných trajektorií

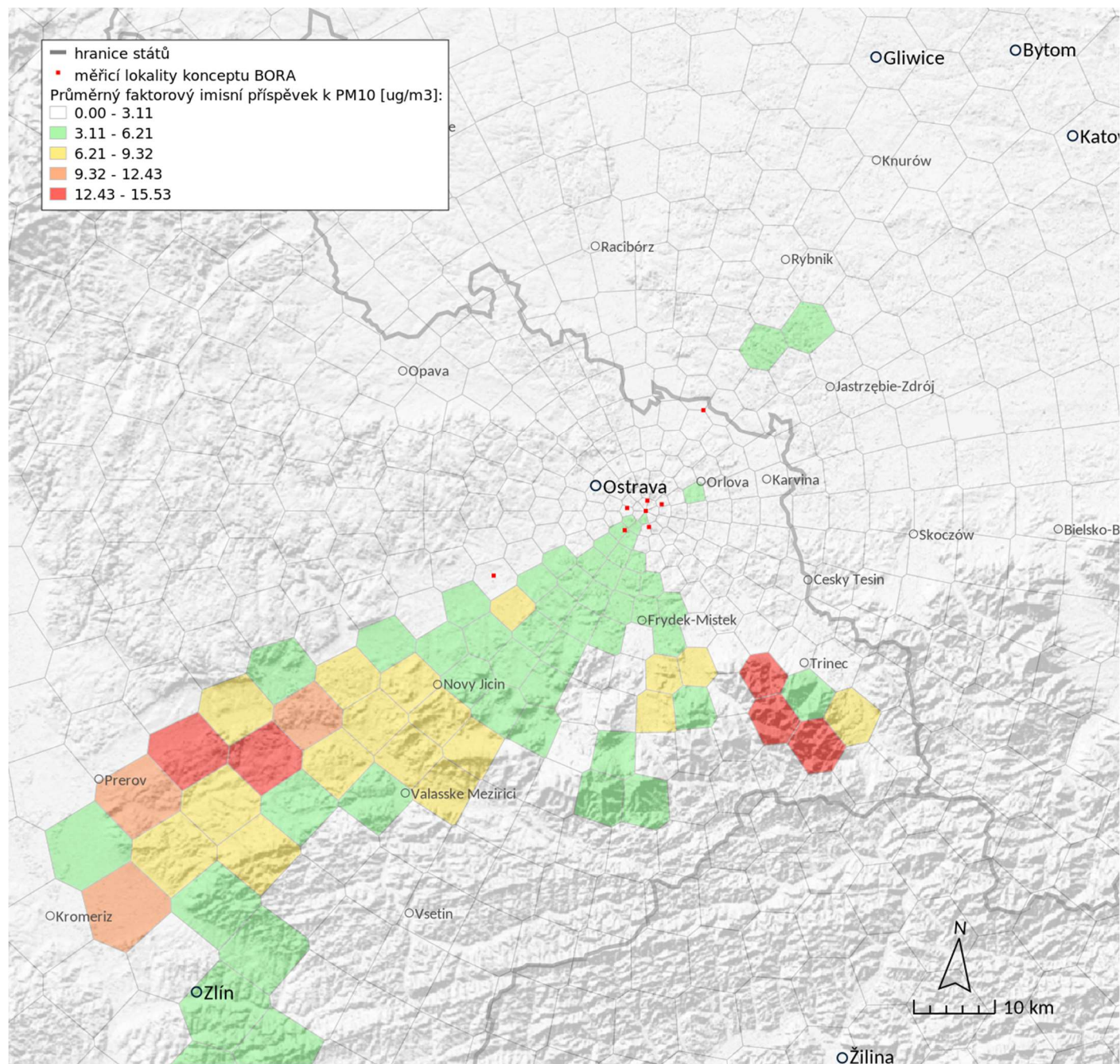
HEAT CC



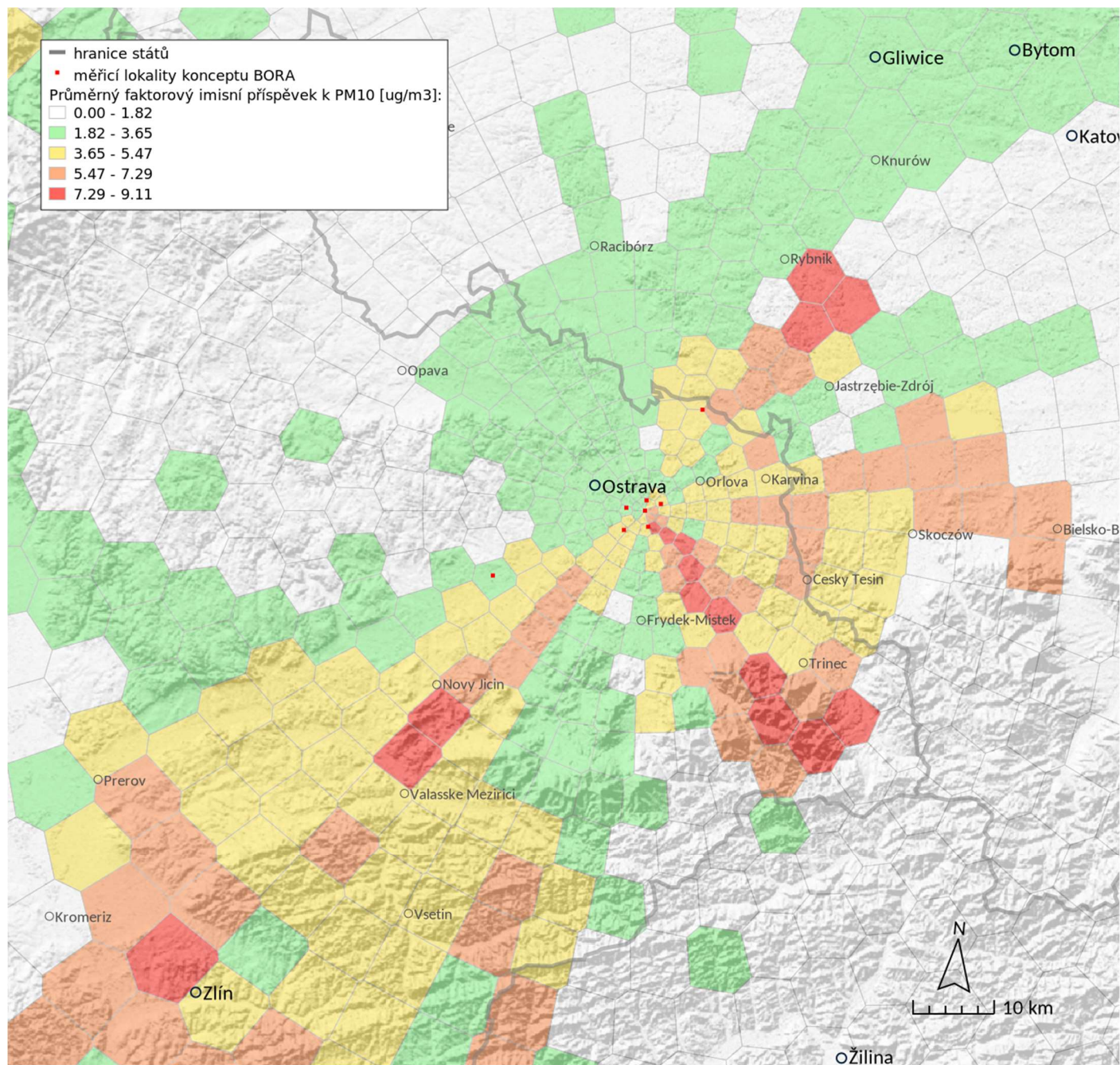
HEAT BB



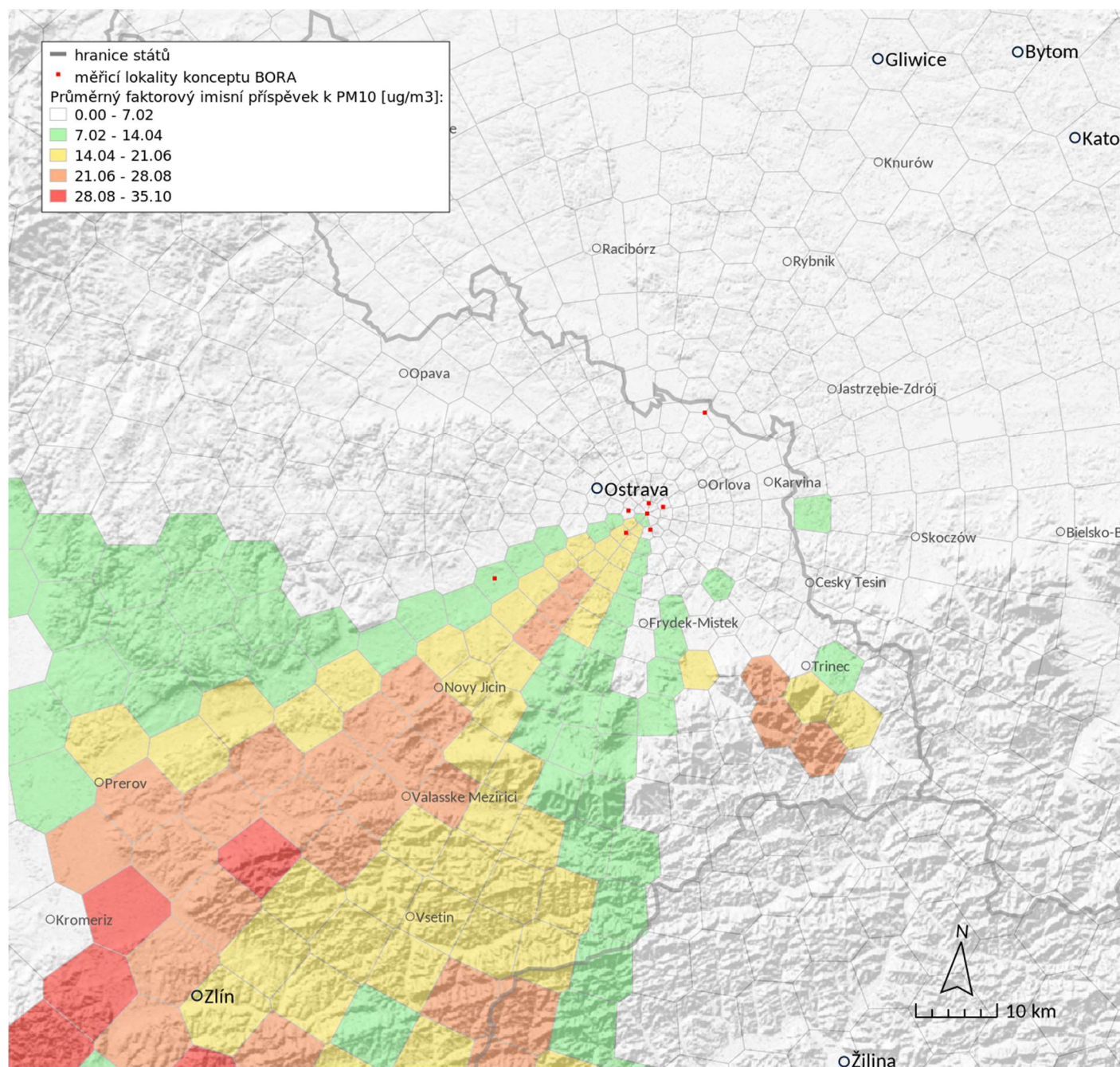
CRUSTAL



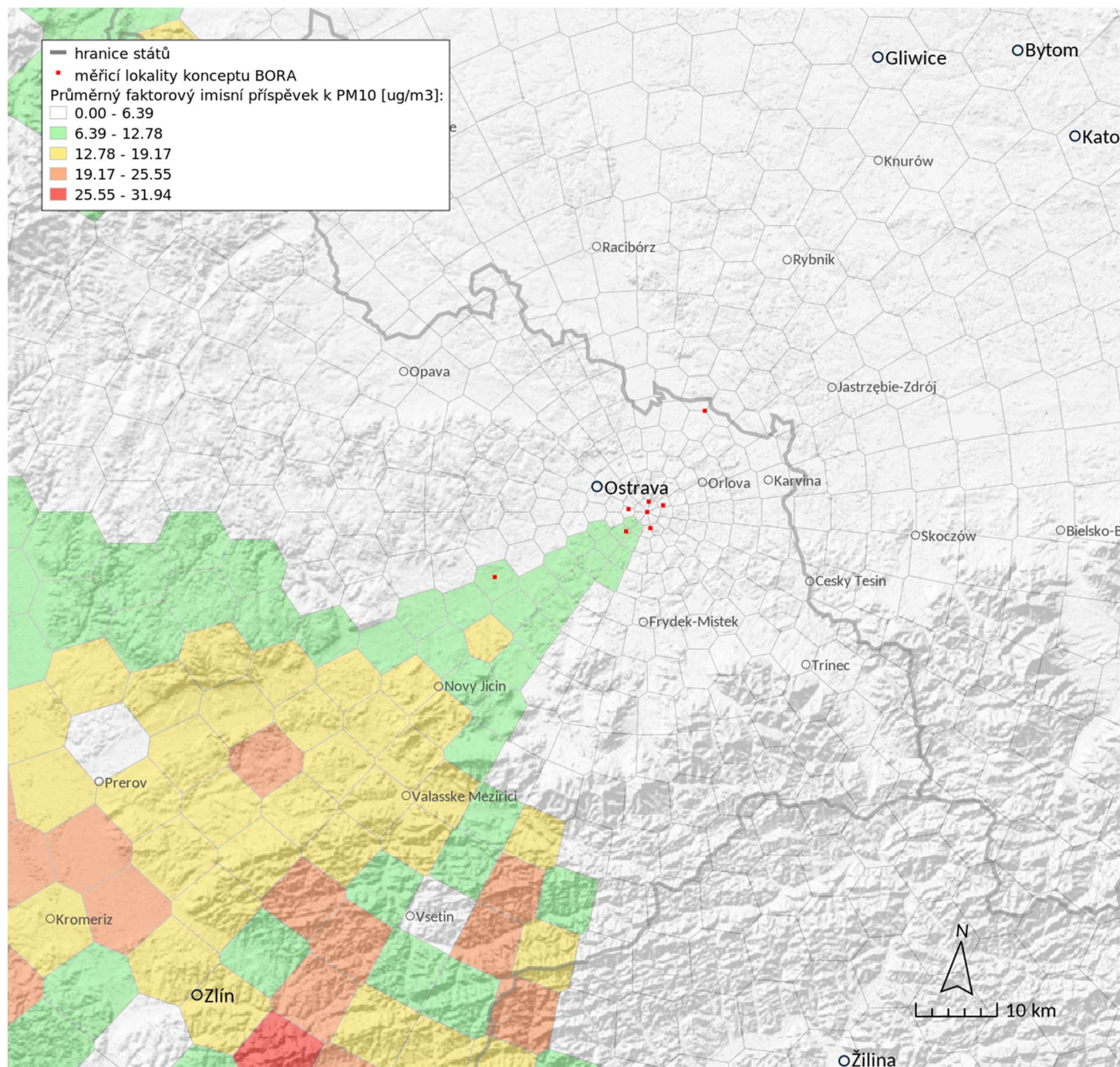
Na-Cl



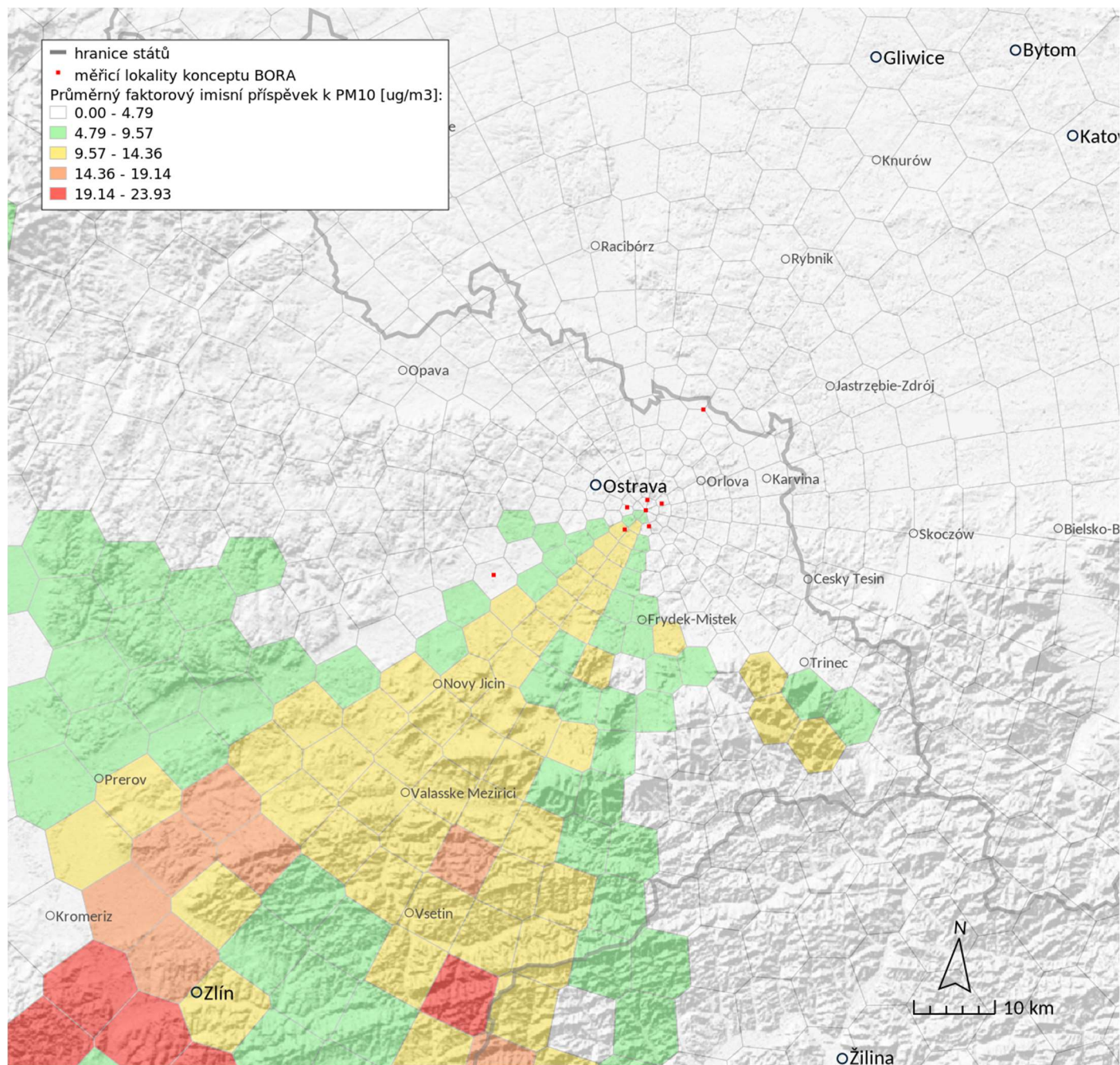
IND Ca



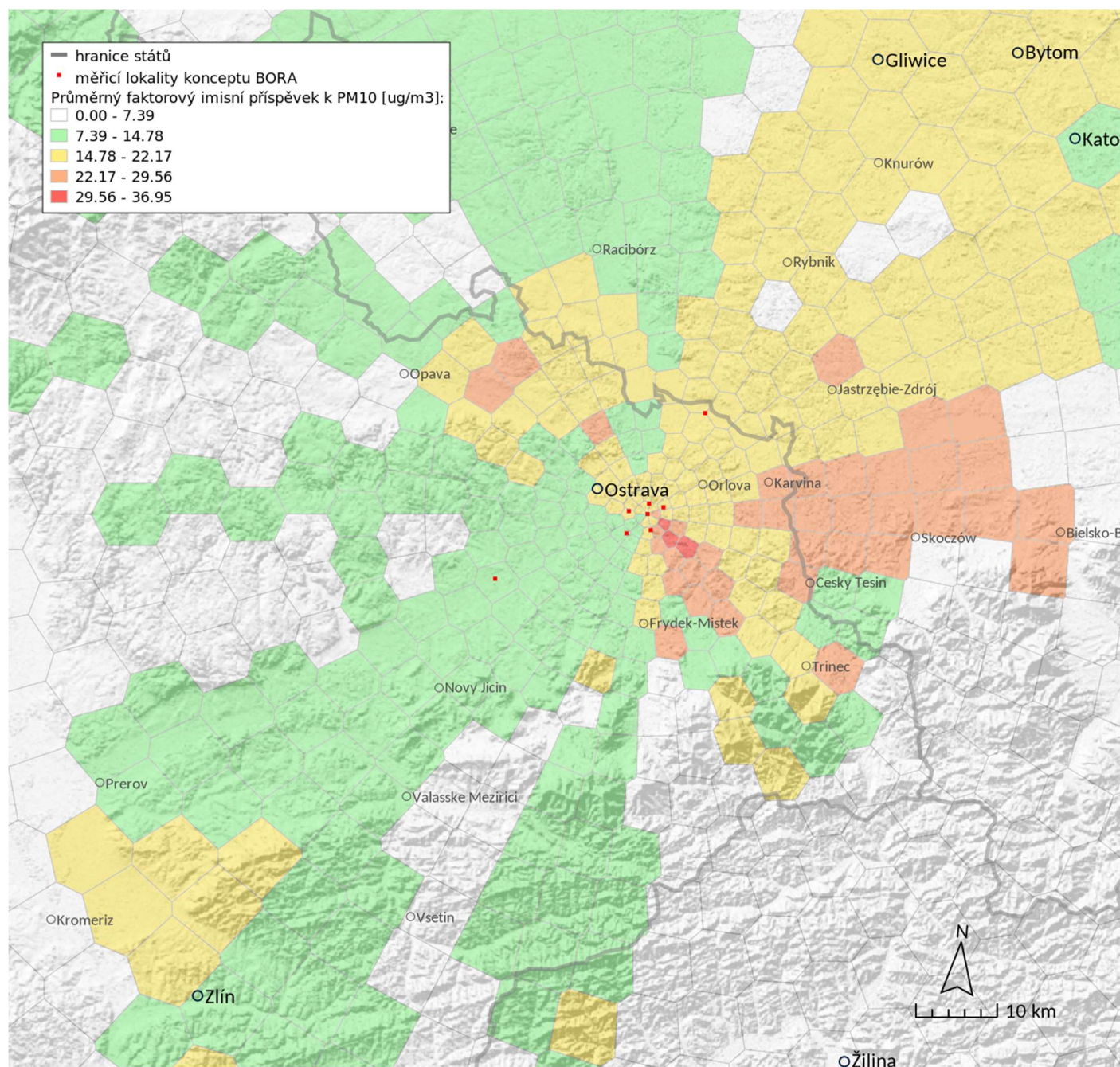
IND HM



IND PAH



SIA



C-Na-NO3

