

# Identifikace zdrojů znečištění ovzduší - souhrnná zpráva za oblast 3 (Brno, Hradec Králové, Olomouc)

Ing. Radim Seibert, Mgr. Blanka Krejčí, Ph.D.,  
RNDr. Vladimíra Volná, Ing. Daniel Hladký

<b>Konečný uživatel výsledků:</b>	Ministerstvo životního prostředí Vršovická 1442/65 110 10 Praha 10
<b>Název projektu:</b>	Měření a analýza znečištění ovzduší s důrazem na vyhodnocení podílu jednotlivých skupin zdrojů
<b>Číslo projektu:</b>	TITSMZP704
<b>Řešitel projektu:</b>	Český hydrometeorologický ústav Na Šabatce 17 143 06 Praha 4
<b>Doba řešení:</b>	1. 4. 2018–31. 12. 2021

#### Další informace o projektu:

Cílem je rozšířit znalosti o vlivu zdrojů na kvalitu ovzduší a ověřit modelové výpočty podílů zdrojů stanovených v Programech zlepšování kvality ovzduší ve vybraných lokalitách.

#### Autoři zprávy:

Ing. Radim Seibert

Mgr. Blanka Krejčí, Ph.D.

RNDr. Vladimíra Volná, Ph.D.

Ing. Daniel Hladký

# Obsah

<b>Úvod</b> .....	<b>6</b>
<b>Hodnocená oblast a měřicí lokality</b> .....	<b>7</b>
<b>Rozsah a metodika prací</b> .....	<b>9</b>
<b>Výsledky provedených prací</b> .....	<b>10</b>
Shrnutí hlavních naměřených parametrů .....	10
Model PMF .....	13
Popis identifikovaných faktorů.....	14
Imisní podíly identifikovaných faktorů .....	15
<b>Diskuse</b> .....	<b>20</b>
Diskuse k použitým metodám .....	20
Diskuse k modelovým výsledkům .....	22
Ověření interpretace modelu .....	24
Porovnání s výsledky chemického transportního modelování .....	28
<b>Předběžné vyhodnocení opatření PZKO s ohledem na získané výsledky</b> .....	<b>29</b>
Opatření navržená v PZKO 2020+.....	29
Soulad PZKO s výsledky provedené identifikace zdrojů.....	30
<b>Závěr</b> .....	<b>31</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Situace měřicího místa Brno - Kroftova .....	7
Obrázek 2	Situace měřicího místa Hradec Králové - Brněnská .....	8
Obrázek 3	Situace měřicího místa Olomouc - Velkomoravská .....	8
Obrázek 4	Průměrné sezonní koncentrace suspendovaných částic PM <sub>2,5</sub> , arsenu a B[a]P ..	11
Obrázek 5	Průměrné koncentrace suspendovaných částic PM <sub>2,5</sub> , arsenu a B[a]P v denní (18:00 – 06:00 UTC) a noční době (06:00 – 18:00 UTC). .....	11
Obrázek 6	Hmotnostní zastoupení hlavních složek suspendovaných částic PM <sub>2,5</sub> .....	12
Obrázek 7	Sezonně členěné absolutní imisní příspěvky PMF faktorů na základě datové sady ICP-MS .....	16
Obrázek 8	Sezonně členěné absolutní imisní příspěvky PMF faktorů na základě datové sady ED XRF .....	16
Obrázek 9	Identifikované relativní podíly zdrojů pomocí PMF s datovou sadou ICP-MS .	17
Obrázek 10	Identifikované relativní podíly zdrojů pomocí PMF s datovou sadou ED XRF..... .....	17
Obrázek 11	Korelace aethalometrického měření se sumou EC/OC .....	21
Obrázek 12	Zpětné trajektorie pro 25. 2. 2021 12:00 UTC a 10. 2. 2021 12:00 UTC.....	24
Obrázek 14	Modifikovaná metoda PSCF – faktor SA AS – lokalita Brno (vlevo nahoře), Hradec Králové (vpravo nahoře) a Olomouc (vlevo dole) .....	27

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Přehled naměřených průměrných koncentrací vybraných látek .....	10
Tabulka 2	Přehled identifikovaných faktorů .....	13
Tabulka 3	Procentuální podíly kategorií zdrojů na PM <sub>2,5</sub> v Aktualizaci PZKO 2020+ ....	28
Tabulka 4	Porovnání výsledků modelů CAMx PZKO 2020+ a PMF TAČR TITSMZP704 .....	29

## Seznam zkratk

BC	Black Carbon (černé uhlíkaté částice)
CAM <sub>x</sub>	Chemický transportní eulerovský model kvality ovzduší (Comprehensive Air Quality Model with Extensions)
CO	oxid uhelnatý
CPF	Conditional Probability Function
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
EC	elementární uhlík
ED XRF	energievě disperzní rentgenová fluorescenční spektrometrie
ICP-MS	hmotnostní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NO <sub>x</sub>	oxidy dusíku
OC	organický uhlík
PAH	polycyklické aromatické uhlovodíky
PM <sub>10</sub>	suspendované částice, které projdou selektivním filtrem o velikosti 10 μm s odlučivostí 50 %
PM <sub>2,5</sub>	suspendované částice, které projdou selektivním filtrem o velikosti 2,5 μm s odlučivostí 50 %
PMF	Positive Matrix Factorization (matematický model multikomponentní statistiky Positive Matrix Factorization, vyvinutý U. S. EPA)
PSCF	Potential Source Contribution Function
PZKO	Program zlepšování kvality ovzduší
R HOMOHop	17α(H)-21β(H)-22R-Homohopane
S HOMOHop	17α(H)-21β(H)-22S-Homohopane
TA ČR	Technologická agentura České republiky
TZL	tuhé znečišťující látky
U. S. EPA	Agentura na ochranu životního prostředí Spojených států amerických

# Úvod

V rámci projektu „Měření a analýza znečištění ovzduší s důrazem na vyhodnocení podílu jednotlivých skupin zdrojů“ (TAČR TITSMZP704), který je finančně podporován Technologickou agenturou České republiky (č. smlouvy 2018007), je prováděna identifikace zdrojů znečišťování ovzduší pomocí receptorového modelu PMF.

Cílem projektu je rozšířit znalosti o vlivu zdrojů na kvalitu ovzduší a umožnit popis původců znečištění ovzduší v konkrétní lokalitě vybrané ve spolupráci Ministerstva životního prostředí (MŽP ČR) a Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Tyto znalosti budou využity při aktualizacích Programů zlepšování kvality ovzduší a k přesnějším zacílení opatření v nich obsažených. Zároveň budou výsledky sloužit jako podklad pro upřesnění „Metodiky pro identifikaci a odhad podílu zdrojů znečištění“.

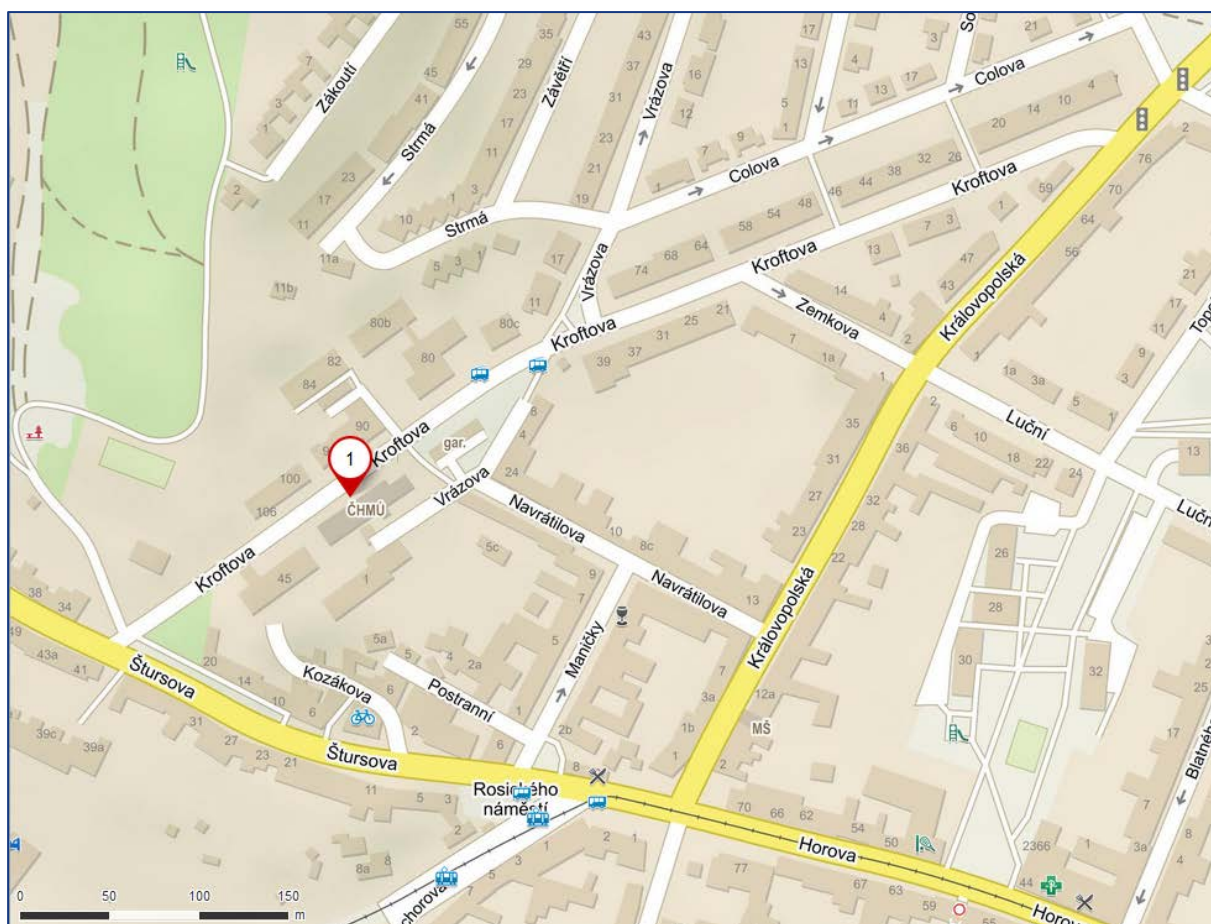
Předkládaná zpráva vychází z výsledků letní a zimní odběrové kampaně, které byly provedeny ve třech městech zatížených významně automobilovou dopravou. Jedná se o třetí a současně poslední z oblastí, ve kterých je plánován výzkum v rámci projektu TITSMZP704, části V1 „Identifikace zdrojů znečišťování ovzduší ve vybraných oblastech ČR“.

## Hodnocená oblast a měřicí lokality

Projektová oblast 3 zahrnuje dopravně významně exponovaná města. Měření proběhlo v těchto lokalitách:

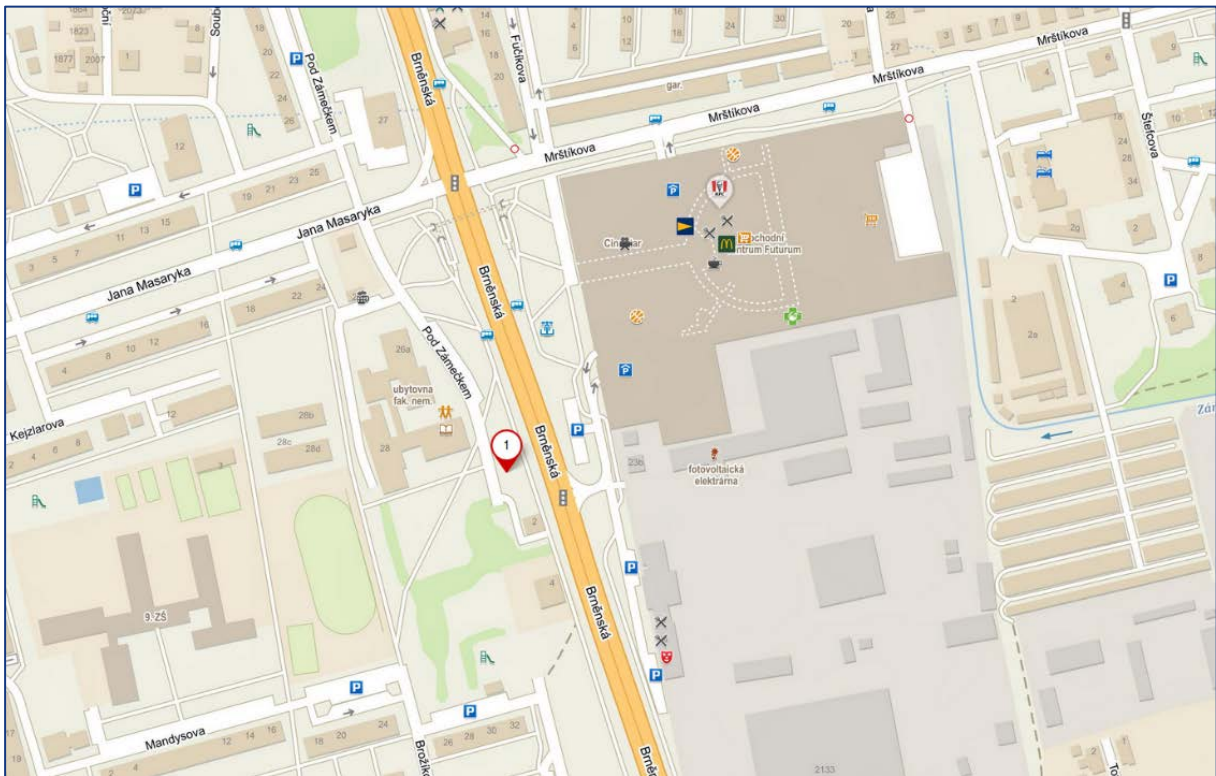
- Hradec Králové-Brněnská
- Olomouc-Velkomoravská
- Brno-Kroftova

Situaci lokalit dokumentují Obrázek 1 až Obrázek 3. Podrobná charakteristika lokalit byla součástí Protokolu o přípravě vybraných lokalit ve 3. projektové oblasti předloženého jako součást výstupů za 9. kvartál řešení projektu.

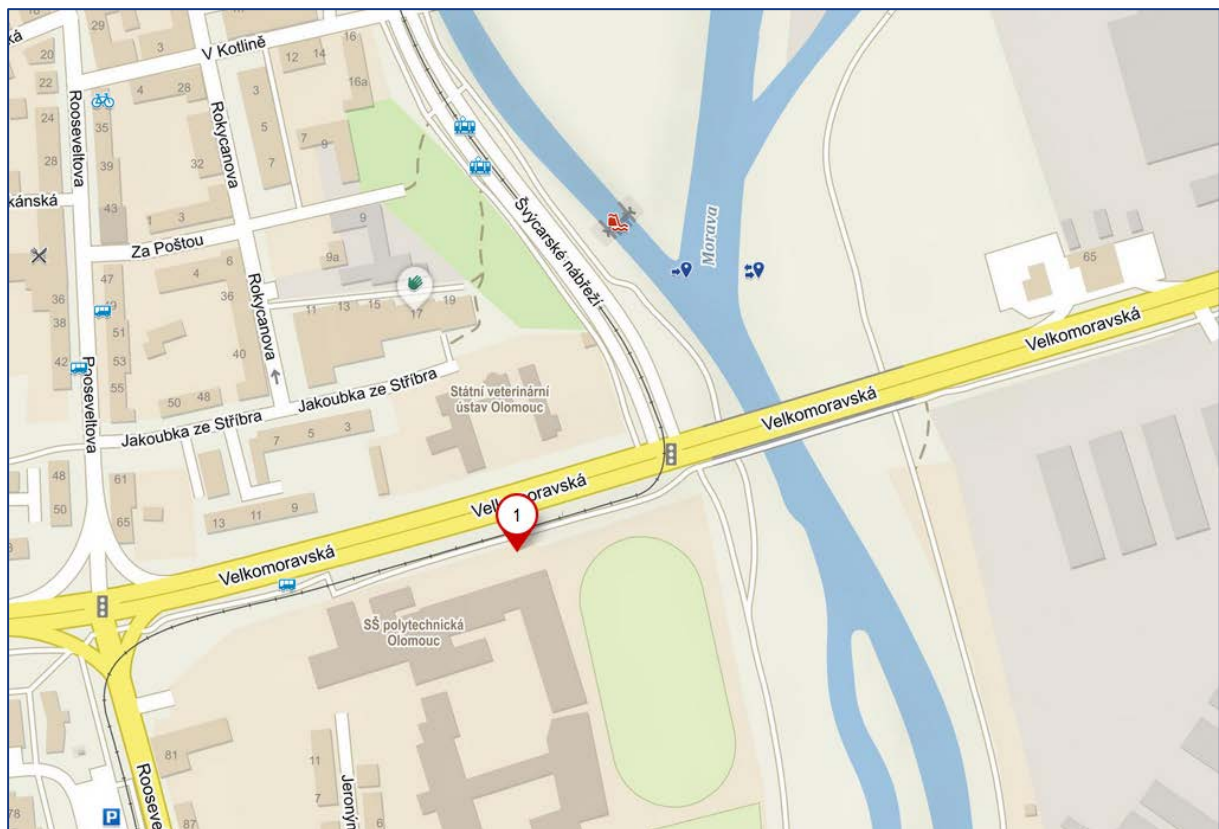


Obrázek 1 Situace měřicího místa Brno - Kroftova





Obrázek 2 Situace měřicího místa Hradec Králové - Brněnská



Obrázek 3 Situace měřicího místa Olomouc - Velkomoravská



## Rozsah a metodika prací

Každá měřicí lokalita byla osazena 5 ks sekvenčních automatických vzorkovačů fy Leckel. Tato sada vzorkovačů byla doplněna 1 ks manuálního vzorkovače stejné firmy k odběrům prašného aerosolu pro případnou analýzu skenovacím elektronovým mikroskopem. Ve všech případech se jednalo o 12hodinové odběry, s výjimkou 6hodinových vzorků pro mikroskopovou analýzu, které byly rozloženy přibližně rovnoměrně v rámci měřeného období. Dvanáctihodinové odběry byly provedeny v odstupe 36 hodin (start-start), tak aby bylo pokryto tříměsíční období, a zároveň aby byl počet vzorků rozložen rovnoměrně mezi denní a noční dobu. Cílem bylo zvýšit reprezentativnost vzhledem k různým meteorologickým podmínkám pokrytím delšího časového intervalu, než v případě předchozích dvou projektových oblastí, kde souvisle vzorkovaný časový úsek mohl být pokryt při stejném počtu odebraných vzorků pouze 1 měsíc.

Měření plynných znečišťujících látek v rozsahu NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> bylo prováděno kontinuálními analyzátory umístěnými v měřicích vozech. Na lokalitách Olomouc-Velkomoravská a Hradec Králové-Brněnská byla po celou dobu měření sledována rychlost a směr větru.

Po celou dobu odběrových kampaní bylo prováděno také měření černého uhlíku analyzátozem Aethalometer® AE33 fy Aerosol d.o.o., Ljubljana, Slovinsko. Jedná se o automatický 7kanálový analyzátor pracující na principu absorpce záření na tmavých aerosolových částicích zachycených na filtrační pásce. Vlnová délka měřeného spektra se pohybuje od 370 (kanál č. 1) do 950 nm (kanál č. 7). Získaná data byla zahrnuta do navazující identifikace zdrojů.

Letní odběrová kampaň proběhla v období 14. 5. 2020 6:00 UTC do 11. 8. 2020 06:00 UTC. Zimní odběrová kampaň proběhla v období 15. 12. 2020 6:00 UTC do 13. 3. 2021 18:00 UTC.

Laboratorní analýzy odebraných vzorků prašného aerosolu byly provedeny v rozsahu:

- gravimetrické měření suspendovaných částic PM<sub>2,5</sub>
- OC, EC a jejich teplotně rozlišené frakce OC1–OC4, resp. EC1–EC4
- anionty: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>
- kationty: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>
- PAH: Fl, FEN, A, FLU, PYR, BaA, CRY, BbF, BkF, BjF, BaP, I123cdP, DBahA, BghiPRL, COR, Per, Reten, Picen, BeP a nově také spektrum dalších, toxikologicky závažných kongenerů (BcFl, CPcdPYR, 5-MeCRY, DBaePYR, DBaiPYR, DBahPYR)<sup>1</sup>
- Cholestany a hopany: ααα 20S-Cholestane, αββ (20R)-Cholestane, ααα 20R-Cholestane, αββ 20R 24S-Methylcholestane, αββ 20R 24R-Ethylcholestane, ααα 20R 24R-Ethylcholestane, 17α(H)-22,29,30-Trisnorhopane, 17α(H),21β(H)-30-Norhopane, 17α(H),21β(H)-Hopane, 17β(H),21α(H)-Hopane, 17α(H),21β(H)-22S-Homohopane, 17α(H),21β(H)-22R-Homohopane
- ICP-MS: Li, B, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U
- ED XRF: Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, In, Sb, Ba, Pb

<sup>1</sup> Benzo[c]fluorene, Cyclopenta[cd]pyrene, 5-Methylchrysene, Dibenzo[a,e]pyrene, Dibenzo[a,i]pyrene, Dibenzo[a,h]pyrene

- Anhydrosacharidy (levoglucosan, mannosan, galactosan)

Oproti identifikaci zdrojů v projektových oblastech 1 a 2 byla datová základna rozšířena o teplotně rozlišené frakce organického a elementárního uhlíku, které byly při analýze OC/EC stanoveny s teplotním programem EUSAAR2. V rámci zavádění a ověřování spolehlivosti metody stanovení kationtů v ČHMÚ bylo provedeno paralelní stanovení v laboratoři externího dodavatele (stejně jako dosud metodou ICP-OES) a v laboratoři ČHMÚ, pobočce Ostrava (metoda iontové chromatografie (HPAE-PAD)). Oproti projektové oblasti 2 byly na stejném pracovišti stanoveny metodou iontové chromatografie (HPAE-PAD) navíc také koncentrace bezvodých cukrů (levoglucosan, mannosan, galactosan).

Výtěžnost měření při letní kampani byla 92 až 100% a při zimní kampani 98 až 100%, dle konkrétního vzorkovače a analytické metody.

Matematické modelování bylo provedeno s využitím programu PMF 5.0. Kroky při přípravě dat a ladění modelového výstupu vycházely z doporučeného postupu, který je shrnut v manuálu U. S. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0, Fundamentals and User Guide (04/2014) a ze zkušeností popsanych ve veřejně dostupných odborných studiích.

Paralelní vzorkování a laboratorní stanovení prvků pomocí metod ED XRF a ICP-MS umožnilo provést paralelní modelování všech tří měřících lokalit pomocí PMF a výsledná modelová řešení následně porovnat.

Pro interpretaci a ověření výsledků modelu PMF byly využity grafy CPF (Conditional Probability Function), PSCF (Potential Source Contribution Function) a zpětné trajektorie větru vyhodnocené interní aplikací ČHMÚ, která umožňuje dávkové zpracování velkého počtu trajektorií pro jejich následné statistické zpracování k odhadu zdrojových oblastí znečištění.

## Výsledky provedených prací

### *Shrnutí hlavních naměřených parametrů*

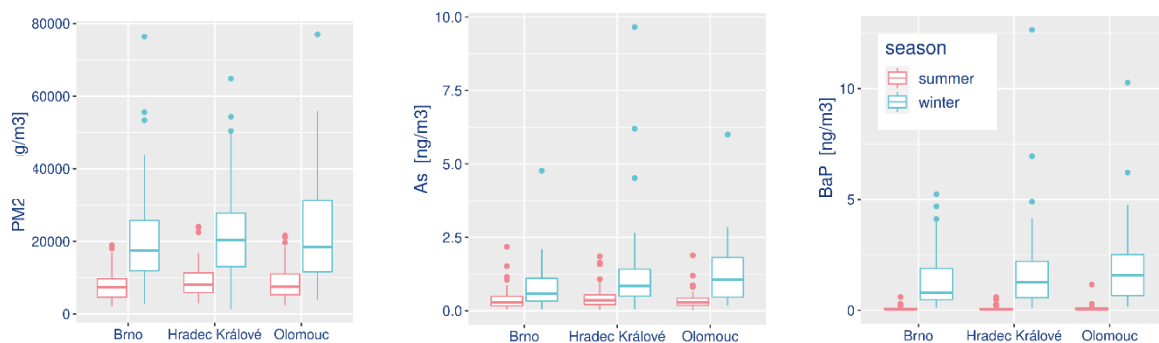
Přehled naměřených koncentrací vybraných látek za dobu měřicí kampaně, které patří mezi prioritní polutanty v ČR (suspendované částice PM<sub>2,5</sub>, benzo[a]pyren, jakožto největší zdroj příspěvku zdravotního rizika působeného znečištěním ovzduší, a As, jakožto nejproblematictější zástupce kovů z hlediska odstupu od imisního limitu) je obsahem Tabulky 1.

*Tabulka 1 Přehled naměřených průměrných koncentrací vybraných látek*

Lokalita	léto			zima		
	PM <sub>2,5</sub> [μg.m <sup>-3</sup> ]	As [ng.m <sup>-3</sup> ]	B[a]P [ng.m <sup>-3</sup> ]	PM <sub>2,5</sub> [μg.m <sup>-3</sup> ]	As [ng.m <sup>-3</sup> ]	B[a]P [ng.m <sup>-3</sup> ]
Brno	7.7	0.40	0.08	20.8	0.8	1.3
Hradec Králové	9.1	0.47	0.08	21.9	1.3	1.8
Olomouc	8.9	0.58	0.10	22.2	1.2	1.9

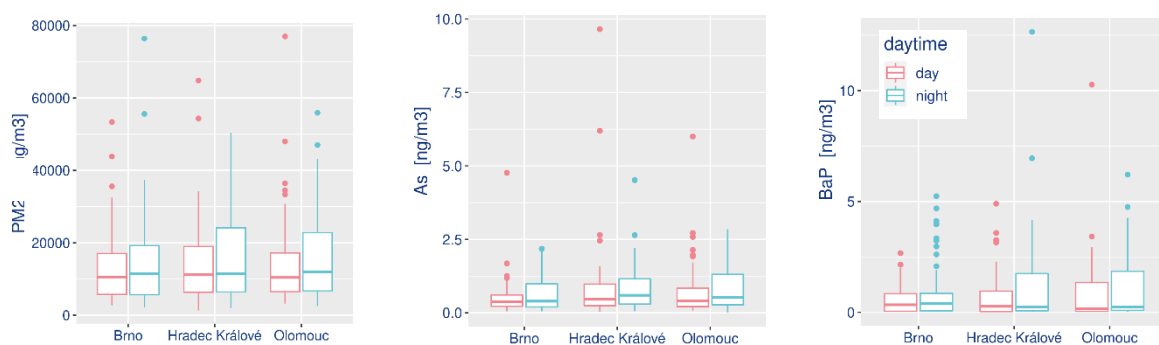
Koncentrace suspendovaných částic  $PM_{2,5}$  se mezi jednotlivými lokalitami v rámci příslušné sezony lišily více v létě (až o 18 %) než v zimě (max. o 7 %). V případě arsenu a B[a]P byly rozdíly mezi lokalitami vyšší (až přes 60 % u arsenu a až 46 % u B[a]P). Výrazně vyšší rozdíly mezi lokalitami u těchto dvou látek byly zjištěny v zimním období.

Rozdíl průměrné letní a průměrné zimní koncentrace byl významný u všech 3 vybraných látek. V případě  $PM_{2,5}$  byly zimní koncentrace cca 2,4krát až 2,7krát vyšší. Nejmenší nárůst  $PM_{2,5}$  byl zjištěn v Hradci Králové, nejvyšší v Brně. V případě arsenu byly zimní hodnoty cca 2,0krát až 2,7krát vyšší a v případě B[a]P přibližně 16krát až 23krát vyšší. Nejmenší nárůst As i B[a]P byl zjištěn v Brně, nejvyšší v Hradci Králové. Uvedené rozdíly mezi lokalitami a sezonami jsou dobře patrné z následujících grafů (Obrázek 4).



Obrázek 4 Průměrné sezonní koncentrace suspendovaných částic  $PM_{2,5}$ , arsenu a B[a]P

Pokud jde o denní chod koncentrací, u všech tří vybraných prioritních látek byly zjištěny vyšší rozptyl a vyšší koncentrace v noční době (19:00 – 07:00 středoevropského času) – viz Obrázek 5.

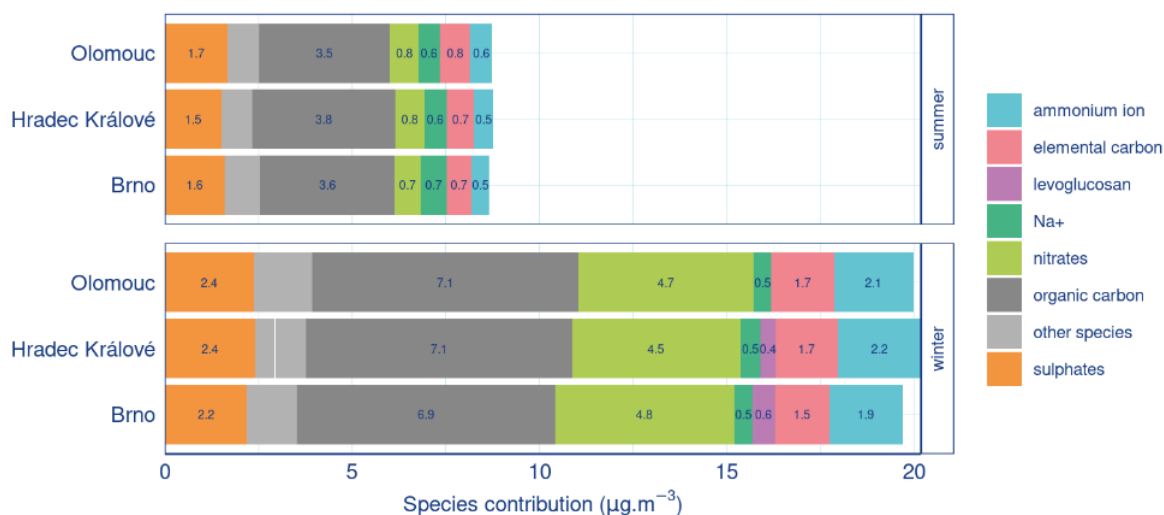


Obrázek 5 Průměrné koncentrace suspendovaných částic  $PM_{2,5}$ , arsenu a B[a]P v denní (18:00 – 06:00 UTC) a noční době (06:00 – 18:00 UTC).

Kampaňové měření, které bylo provedeno pro účely identifikace zdrojů, nezajišťuje dostatečné časové pokrytí roku pro posouzení plnění imisních limitů (nebylo cílem měření). Protože ale bylo měření koncipováno tak, aby reprezentovalo celkem 6 měsíců v roce (3 měsíce v létě a 3 v zimě), lze předpokládat, že byla zachycena většina spektra meteorologických situací, které se v průběhu roku vyskytují. Na základě průměrné koncentrace naměřené za celé období lze proto porovnání s hodnotou limitu provést alespoň orientačně. Jak vyplývá z Tabulky 1, v případě suspendovaných částic lze odhadovat, že ve všech třech místech měření (lokality v blízkosti frekventovaných silničních komunikací) se průměrná roční koncentrace suspendovaných částic

PM<sub>2,5</sub> pohybovala na úrovni přibližně ¾ imisního limitu (20 µg.m<sup>-3</sup>). Průměrná roční koncentrace arsenu byla oproti limitu (6 ng.m<sup>-3</sup>) násobně nižší. Koncentrace benzo[a]pyrenu byla pravděpodobně podlimitní v Brně, těsně podlimitní v Hradci Králové a přibližně na úrovni limitu v Olomouci (limit 1 ng.m<sup>-3</sup>).

Obrázek 6 ukazuje chemické složení suspendovaných částic PM<sub>2,5</sub> (průměr za dobu letní a zimní odběrové kampaně).



Obrázek 6 Hmotnostní zastoupení hlavních složek suspendovaných částic PM<sub>2,5</sub>

Nejvyšší podíl na celkové koncentraci suspendovaných částic PM<sub>2,5</sub> měl organický uhlík. Jeho zimní koncentrace byly v průměru přibližně dvojnásobné oproti letnímu období.

Zatímco v letním období byly druhou nejvíce zastoupenou složkou sírany, zejména síran amonný, v zimním období byly v důsledku meteorologických podmínek (nižší teplota a vyšší vlhkost) druhou hmotnostně nejvýznamnější složkou dusičnany, zejména dusičnan amonný. Jejich zastoupení (v zimě cca 4,5 až 4,8 µg.m<sup>-3</sup>, tj. cca pětina hmoty PM<sub>2,5</sub>) bylo asi o 2/3 vyšší než průměrný podíl dusičnanů v předchozí zimě na Kladensku (projektová oblast 2). Ukazuje to na silný vliv konverze oxidů dusíku na sekundární aerosol v podmínkách dopravně exponovaných lokalit Brna, Hradce Králové a Olomouce.

Po sekundárních částicích dusičnanu a síranu amonného byl třetí hmotnostně nejvýznamnější složkou elementární uhlík, jehož významné koncentrace byly naměřeny zejména v chladné části roku (více než dvojnásobné oproti letním hodnotám).

Poměrně stabilní méně významný podíl na koncentraci PM<sub>2,5</sub> (první jednotky %) připadal na sodíkové ionty (v létě převážně sůl pocházející z mořského aerosolu, v zimě také z chemického posypu vozovek). Podobným podílem se v zimě vyznačoval také levoglucosan (marker spalování biomasy). Hmotnost ostatních složek byla nižší než 1,5 % hmoty PM<sub>2,5</sub>.

Za pozornost stojí významný rozdíl v celkové hmotnosti měřených látek ve srovnání s gravimetricky zjištěnou hmotností PM<sub>2,5</sub>. Součet hmotnosti všech látek odebraných na filtry v průběhu měřicí kampaně dosahoval nejméně přibližně 95 % gravimetricky zjištěné hmotnostní koncentrace PM<sub>2,5</sub>, což je vynikající shoda a dobrý základ pro vysokou spolehlivost provedené identifikace zdrojů.

## Model PMF

Pro model PMF byly využity sloučené laboratorní výsledky letní a zimní odběrové kampaně. Příprava modelových dat a analytických nejistot byla provedena v souladu s manuálem U. S. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0, Fundamentals and User Guide (04/2014).

Na základě posouzení časové řady naměřených koncentrací bylo nutno z datové sady vyloučit pouze výsledky ze silvestrovské noci (vzorek 31. 12. 2020 18:00 – 1. 1. 2021 06:00 UTC), které byly silně ovlivněny emisemi z ohňostrojů (řádově vyšší koncentrace řady Al, Ba, Bi, Cu, Mg, Pd, Rb, Sr, K, V aj. oproti průměru měření) a zvyšovaly nejistotu modelu.

Model PMF byl vypracován ve 2 variantách lišících se použitou metodou laboratorní prvkové analýzy (ICP-MS vs. ED XRF). V případě sady ICP-MS bylo nalezeno stabilní interpretovatelné řešení pro 9 faktorů při přidané nejistotě 13 % a  $Q_{\text{true}}/Q_{\text{exp}} = 1,02$ . Souhrnné modelové řešení bylo v případě ED XRF vypracováno pro 11 faktorů s 12 % přidanou nejistotou modelu a poměrem  $Q_{\text{true}}/Q_{\text{exp}} = 0,96$ . Přidaná nejistota modelu byla zčásti využita pro zohlednění nejistoty odběru, která se u použitého typu automatických samplerů a související manipulace pohybuje okolo 8 %. V modelovém řešení se sadou ICP-MS bylo použito 48 analytů, z toho 43 klasifikovaných jako „strong“ a 5 jako „weak“. Řešení založené na metodě ED XRF využilo 42 analytů, z toho 41 „strong“ a 1 „weak“. Klasifikace vycházela kromě doporučeného postupu podle manuálu U. S. EPA (rozdělení analytů na základě poměru signál/šum) také z počtu hodnot pod mezí detekce v rámci časových řad analytů.

Přehled faktorů identifikovaných modelem PMF při využití jednotlivých datových sad (ICP-MS a ED XRF) je obsahem Tabulky 2.

Tabulka 2 Přehled identifikovaných faktorů

Faktor	Označení faktoru	
	Dataset ED XRF	Dataset ICP-MS
Primární částice z individuálního vytápění uhlím (CC) a biomasou (BB)	HEAT CC	HEAT CC
	HEAT BB	HEAT BB
Primární částice ze silniční dopravy – výfukové emise (E), otěry (W) a resuspenze (R)	TRA E+W	TRA E
	TRA R	TRA R
Minerální částice	CRUSTAL	CRUSTAL
Průmyslové emise těžkých kovů	IND HM	IND HM
Sůl (chlorid sodný a hořečnatý)	SALT	-
Sekundární aerosol – převážně síran amonný	SA AS	SA AS
Sekundární aerosol – převážně dusičnan amonný	SA AN	SA AN
Sekundární aerosol neutralizovaný alkáliemi (Na, K, Ca, Mg) – letní (SUMM) a zimní (WINT) varianta	SA ALK SUMM	SA ALK
	SA ALK WINT	



## **Popis identifikovaných faktorů**

### HEAT CC (primární částice z individuálního vytápění uhlím)

Zřetelná diagnostická kombinace PAH, EC/OC (zejména nízkoteplotních frakcí) a těžkých kovů (Ni, As, Pb, Se, V) s vysokým poměrem levoglucosan/mannosan. Řádový nárůst imisního příspěvku v chladné části roku oproti létu, výrazný rozdíl denních a nočních hodnot.

### HEAT BB (primární částice z individuálního vytápění biomasou)

Významné zastoupení PAH a EC/OC (zejména nízkoteplotních frakcí), ale relativně nižší než v případě faktoru HEAT CC. Nejvyšší zastoupení anhydrosacharidů ze všech faktorů, nejnižší poměr levoglucosan/mannosan. Z měřených prvků jsou významně zastoupeny K a Zn (pouze u sady ED XRF), bez těžkých kovů. Řádový nárůst imisního příspěvku v chladné části roku oproti létu, výrazný rozdíl denních a nočních hodnot.

### TRA E+W, resp. TRA E

Nejvyšší koncentrace oxidů dusíku s nejvyšším poměrem NO/NO<sub>2</sub> ze všech faktorů. Částice tvořené především elementárním uhlíkem, nízký až nulový poměr OC/EC. Z prvků akcesorický výskyt Fe, Mn, Cu, Zn, v případě použití sady ICP-MS také Mo, Ce, La, Co. Velmi výrazný denní chod příspěvků s maximy ve dne. Vyšší příspěvky modelem kvantifikovány v chladné polovině roku.

### TRA R

Diagnostická kombinace elementárního uhlíku (zejména vysokoteplotní frakce EC3) s Ba, Cu, Fe, Sb. Velmi výrazný denní chod příspěvků s maximy ve dne. Vyšší příspěvky modelem kvantifikovány v teplé polovině roku.

### CRUSTAL

Diagnostická kombinace prvků zemské kůry Al, Ca, Ba, Fe, La, Mn, Mg, Ti, Sr. Intenzivní koncentrační špičky a denní chod, vyšší příspěvky v teplé polovině roku. Vůbec nejvyšší příspěvky nastaly v únoru a na začátku března vlivem mimořádně intenzivního transportu částic z oblasti Sahary.

### IND HM

Lokálně specifický faktor na lokalitě v Olomouci. V chemickém profilu dominují kovy Pb, Zn, Mn, Cd, bez přítomnosti ostatních skupin analytů. Extrémně kolísavý a řádově vyšší příspěvek v Olomouci oproti ostatním dvěma měřicím lokalitám, bez průkazného denního a sezonního chodu.

### SALT

Částice tvořené dominantně Na s menším podílem Mg, pravděpodobně ve formě chloridů. Časový průběh modelových faktorových příspěvků velmi podobný na všech lokalitách, detekovatelné pouze v létě. V chladné polovině roku byl příspěvek mořské soli s ohledem na možnou interferenci s významnějšími zdroji sodíku pravděpodobně zahrnut v jiných faktorech (s ohledem na nízký příspěvek samostatně nedetekovatelný).



### SA AS

Sekundární aerosol tvořený dominantně síranem amonným doprovázený selenem a vanadem. Nevýrazný roční a denní chod. Podobný průběh koncentrací na všech měřicích lokalitách.

### SA AN

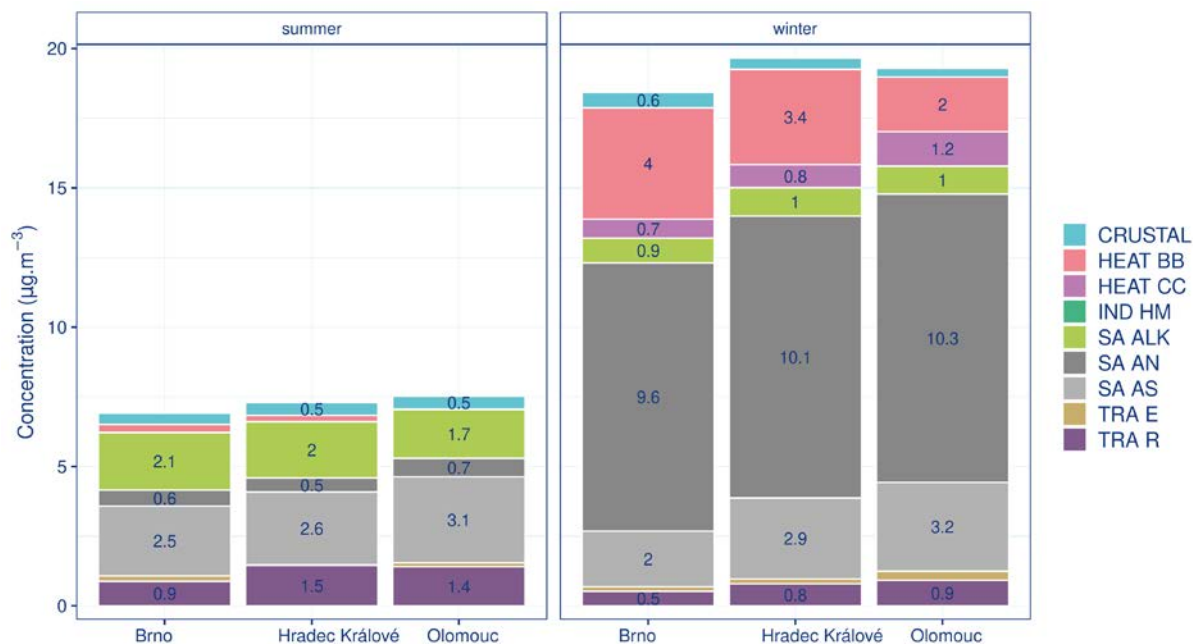
Sekundární aerosol tvořený směsí převažujícího dusičnanu amonného a méně zastoupeného síranu amonného. Z významně zastoupených složek se v chemickém profilu dále vyskytují draslík a draselné kationty, nízkoteplotní frakce elementárního uhlíku, organický uhlík, As, Se, In, K<sup>+</sup>. Výrazný roční chod s řádově vyššími příspěvky v zimě, denní chod nevýrazný. V chladné polovině roku zjištěn podobný průběh příspěvků na všech lokalitách.

### SA ALK SUMM a SA ALK WINT

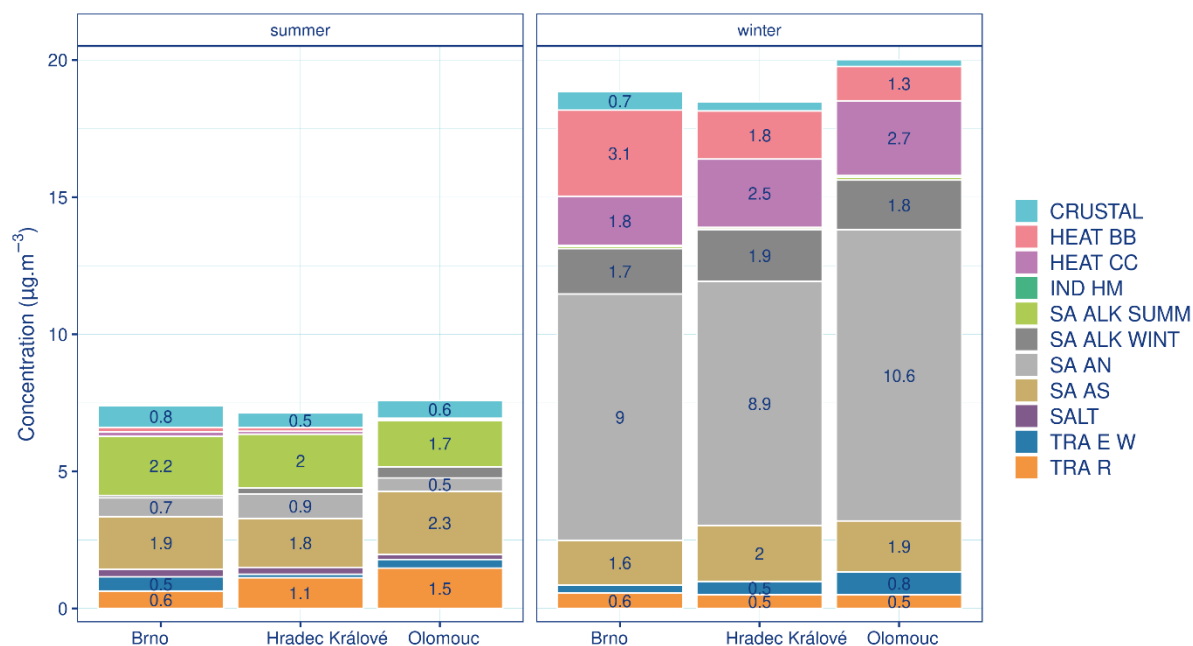
Převážně síranový sekundární aerosol silně neutralizovaný alkáliemi (nejvyšší zastoupení Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> ze všech faktorů). Při použití sady ED XRF faktor rozlišen na letní a zimní typ tohoto sekundárního aerosolu, přičemž chemické složení ukazuje na odlišné procesy jeho vzniku. Letní typ obsahuje nezanedbatelný podíl organického uhlíku a těžkých kovů (Sb, Ni, As, Se, V, Cu, Cr, Mg). V zimním typu je významně zastoupen menší počet zástupců kovů, ale shoduje se s letním v zastoupení Se, V, Cr a Mg. Zimní typ se oproti letnímu odlišuje především významným obsahem PAH, které v letním typu s výjimkou picenu chybí. Původ obou faktorů je pravděpodobně stejný, přičemž v chladné části roku k uvedené „letní“ směsi látek přistupují emise z individuálního vytápění v průběhu dálkového transportu. Pomineme-li modelové dělení faktoru na letní a zimní typ, roční chod příspěvku tohoto sloučeného faktoru vykazuje nižší hodnoty v chladné části roku, jak ukazuje výsledek modelu na základě sady ICP-MS, ve kterém jsou tyto dva typy nerozlišeny. Denní chod faktorového příspěvku je nevýrazný.

## ***Imisní podíly identifikovaných faktorů***

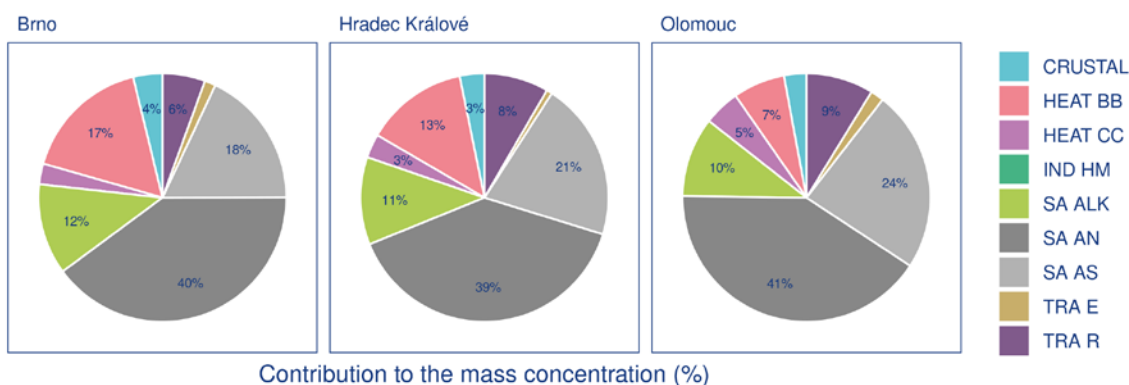
Níže jsou znázorněny výsledky modelu PMF zpracovaného pro hodnocené lokality s využitím prvkové analýzy ICP-MS a ED XRF (Obrázek 7 až Obrázek 10). Modelové odchylky těchto dvou sad se týkají faktorů, které ke koncentraci PM<sub>2,5</sub> přispívají málo významně (maximálně prvními jednotkami procent). Identifikace zdrojů provedená s těmito dvěma datovými sadami vede ke shodným závěrům, pokud jde o určení priority a návrh vhodných opatření k ochraně ovzduší v hodnocených lokalitách.



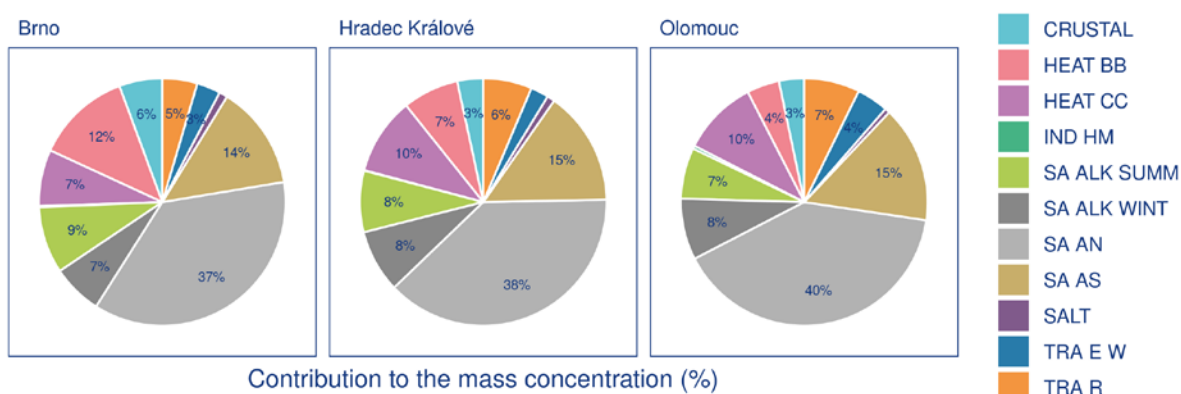
Obrázek 7 Sezonně členěné absolutní imisní příspěvky PMF faktorů na základě datové sady ICP-MS



Obrázek 8 Sezonně členěné absolutní imisní příspěvky PMF faktorů na základě datové sady ED XRF



Obrázek 9 Identifikované relativní podíly zdrojů pomocí PMF s datovou sadou ICP-MS



Obrázek 10 Identifikované relativní podíly zdrojů pomocí PMF s datovou sadou ED XRF

Nejvýznamnější podíl na celkové průměrné koncentraci  $PM_{2.5}$  tvořily částice sekundárního původu. Jejich celkový podíl tvořil v průměru dvě třetiny až tři čtvrtiny hmotnostní koncentrace  $PM_{2.5}$ , s minimálními rozdíly mezi lokalitami i mezi teplou a chladnou částí roku. Sezonně se ale významně mění chemická skladba a původ sekundárních částic.

Jako hmotnostně nejvýznamnější složka sekundárního aerosolu byla identifikována směs dusičnanu a síranu amonného (faktor SA AN), která se tvoří téměř výhradně v zimním období, protože nízká teplota a vyšší vlhkost jsou příznivé pro formaci a stabilitu dusičnanu amonného, dominantní sloučeniny v tomto faktoru. V chladné části roku tvořil tento faktor sám o sobě okolo 50 %, v teplé okolo 10 %  $PM_{2.5}$ . Z chemického složení faktorového profilu a sezonnosti faktorového imisního příspěvku je zřejmé, že je indukovan hlavně spalováním pevných paliv v domácnostech. Vliv automobilové dopravy na formaci této části znečištění není z faktorového chemického profilu zřejmý, s ohledem na její nejvyšší emise oxidů dusíku ze všech typů zdrojů je ale důvodné předpokládat, že poskytuje významnou nebo i hlavní část dusičnanového dusíku v tomto faktoru.

Hmotnostně druhou nejvýznamnější a sezonně stálou složkou sekundárního aerosolu byl síran amonný (faktor SA AS), který v teplé i chladné části roku přispíval ke koncentraci  $PM_{2.5}$  přibližně  $2 \mu g \cdot m^{-3}$  (relativně v létě čtvrtina až třetina, v zimě okolo 10 % celkové koncentrace).

Z ročního chodu a doprovodných polutantů v chemickém profilu tohoto faktoru je zjevné, že jeho hlavním zdrojem bylo průmyslové spalování uhlí ve velkých energetických zdrojích.

Podrobnější rozbor vyžadovala interpretace převážně sekundárního aerosolu s významným zastoupením alkálií (faktory SA ALK SUMM a SA ALK WINT, resp. sloučený celoroční faktor SA ALK v případě modelu se sadou výsledků z ICP-MS). Z neutralizačního poměru amonných iontů (neutralization ratio  $NR = [NH_4^+]/([NO_3^-] + [SO_4^{2-}])$ ) je zřejmý jejich nedostatek pro neutralizaci kyseliny dusičné a sírové na  $NH_4NO_3$ , resp.  $(NH_4)_2SO_4$ . Neutralizační poměr NR dosáhl hodnoty 0,56 v létě a 0,86 v zimě, bez výrazných rozdílů mezi lokalitami. Kyselina sírová proto byla pravděpodobně částečně neutralizována namísto  $NH_4^+$  ionty sodíku, draslíku, vápníku a hořčíku, a to silněji v létě, kdy byl neutralizační poměr nižší a dostupnost alkálií pravděpodobně vyšší vlivem vyšší minerální prašnosti (karbonáty, alumosilikáty). Takto vzniklé sírany a možná zčásti i dusičnany jsou reprezentovány zmíněným faktorem SA ALK. Podíl tohoto typu znečištění dosahuje v průměru cca 10 % až 15 %  $PM_{2,5}$ , podle použité metody prvkové analýzy. Faktorový profil obsahuje komplexní směs prvků, která ukazuje na původ ve spalování uhlí, ale nelze vyloučit ani příspěvek dopravních emisí. Významné zastoupení organického uhlíku v letní variantě (SA ALK SUMM) naznačuje, že součástí tohoto faktoru je ve významné míře také sekundární organický aerosol. Relativně významné podíly niklu a vanadu v letní i zimní variantě ukazují také na pravděpodobný vliv spalování ropných paliv, typických pro rafinerie a energetická zařízení v přímořských oblastech. Tomu by odpovídal i časový průběh naznačující nejmenší kolísání ze všech identifikovaných faktorů. Jedná se o znečištění přenášené na velké vzdálenosti se zdrojovou oblastí převážně mimo Českou republiku, které v chladném období roku reagují během transportu s regionálními emisemi ze spalování uhlí v domácnostech (oproti létu podstatné zvýšení koncentrace PAH, galactosanu a Na). Původ tohoto znečištění je tedy v létě pravděpodobně zejména průmyslový, s možným příspěvkem sekundárního organického aerosolu indukovaného automobilovými emisemi. V zimě se na formaci tohoto typu znečištění podílí pravděpodobně stejné zdroje s výjimkou dopravy, která je v chemickém profilu nahrazena degradovaným znečištěním z vytápění domácností.

Identifikované zdroje primárních částic se na celkové koncentraci  $PM_{2,5}$  podílely čtvrtinou až třetinou, nejvíce v Brně a nejméně v Olomouci. Ve všech třech městech zaujímal mezi primárními částicemi nejvyšší podíl vytápění domácností (faktory HEAT CC a HEAT BB) s vypočteným podílem mezi 13 % a 20 %. Model s datovou sadou ICP-MS se od modelu a základě ED XRF liší vzájemným poměrem mezi podílem vytápění uhlím (HEAT CC) a biomasou (HEAT BB). Oba modely se shodují na nejvyšším podílu vytápění biomasou v Brně a nejnižším naopak v Olomouci, přičemž v Brně se jednalo o nejvýznamnější zdroj primárních částic  $PM_{2,5}$ . Uvedený podíl vytápění domácností na koncentraci  $PM_{2,5}$ , je nižší než v předchozích projektových oblastech na Třinecku a Kladensku. Je to způsobeno pravděpodobně centrálním vytápěním a vyšším využitím zemního plynu. Relativní podíl spalování biomasy na celkovém znečištění z vytápění domácností je také oproti předchozím projektovým oblastem vyšší, což je dáno pravděpodobně vyšším využitím doplňkových zdrojů tepla (krbové vložky a kamna), než je tomu ve venkovských oblastech, kde je k vytápění relativně více využíváno uhlí. Ukazuje to na vyšší význam protiemisních opatření zaměřených na uvedené doplňkové zdroje tepla v příměstských oblastech než na venkově, kde by byl imisní přínos překryt vlivem provozu uhelných kotlů (minimálně do doby, než se zhorší dostupnost uhlí v návaznosti na postupný útlum jeho těžby).

Druhým nejvýznamnějším zdrojem primárních částic  $PM_{2,5}$  byla automobilová doprava (faktory TRA E a TRA R, resp. TRA E W a TRA R). Na všech lokalitách se její podíl v průměru teplé i chladné části roku pohyboval okolo 10 %. Hmotnostně nejvýznamnější složkou dopravních částic byla resuspenze z povrchu vozovky (5 až 10 %), naopak výfukové emise se

na částicích PM<sub>2,5</sub> podílely málo významně (prvními jednotkami %). Otěry brzdového obložení, pneumatik a vozovky nebylo možno modelem samostatně vyčlenit, z modelových fingerprintů je ale zřejmé jejich zastoupení ve faktoru dopravní resuspenze (TRA R v modelu se sadou ICP-MS), popř. ve faktoru společně s výfukovými emisemi (TRA E W v případě modelu se sadou ED XRF).

Málo významný podíl na koncentraci PM<sub>2,5</sub> byl zjištěn v případě minerální prašnosti a mořského aerosolu. Minerální prašnost tvořila v průměru podle modelu 3 až 6 % (v létě okolo 10 %, v zimě nejvýše první jednotky %, vázané převážně na epizody dálkového transportu částic z oblasti Sahary). Nejvyšší podíl minerální prašnosti byl zjištěn v Brně (přibližně dvojnásobný oproti oběma dalším lokalitám), což mohlo být způsobeno stavebními pracemi v blízkosti měřicího místa. Mořská sůl tvořila nejvýše první jednotky % PM<sub>2,5</sub>.

Hmotnostně nejméně významným faktorem z identifikovaných faktorů (méně než 1 % PM<sub>2,5</sub>) byly těžké kovy z lokálního bodového, pravděpodobně průmyslového zdroje v Olomouci. Z hlediska zlepšení imisní situace suspendovaných částic se tímto zdrojem nemá smysl zabývat.

# Diskuse

## *Diskuse k použitým metodám*

Ve třetí oblasti projektu TAČR TITSMZP704 byly v rámci aplikovaného výzkumu otestovány nové postupy pro identifikaci zdrojů, které se týkaly návrhu měřicích lokalit, odběru vzorků, laboratorních analýz a vyhodnocení pomocí PMF a interpretace výsledků.

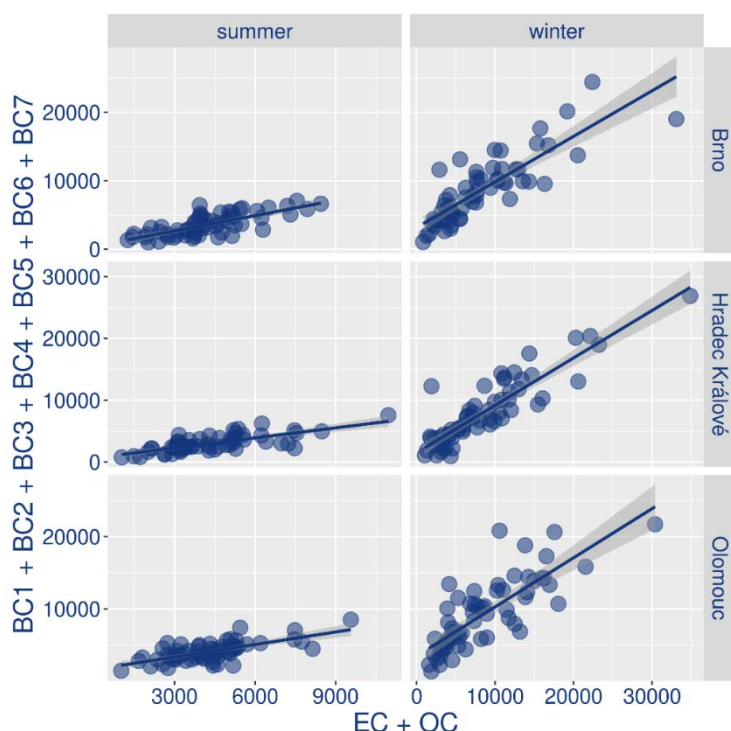
Poprvé byl použit režim vzorkování založený na 12hodinových vzorcích odebíraných v odstupe 36 hodin. Tento přístup, který umožnil rovnoměrné pokrytí větší části roku, a zahrnoval tedy větší různorodost meteorologických podmínek, se ukázal jako vhodný. Při následujícím vyhodnocení nebyly zjištěny žádné interpretační problémy způsobené tímto řešením. Jedinou nevýhodou je delší doba, po kterou je vázána měřicí technika a vyšší náklady na pronájem a odběr elektřiny, které jsou však málo významné vzhledem k celkovým nákladům identifikace zdrojů a jsou plně vyváženy vyšší vypovídací hodnotou pořízených dat.

Dosud ojedinělé bylo v rámci projektu zpracování společného modelu PMF pro lokality, které se nacházejí ve velké vzdálenosti od sebe (odlišné kraje). Ani tento přístup nekomplikoval následné vyhodnocení. Podmínkou úspěšnosti tohoto řešení je ale dodržení stejného typu lokalit z hlediska předpokládaného působení hlavních zdrojů znečišťování (městské dopravní lokality). Případnou kombinaci různých typů lokalit (městské, venkovské, průmyslové, obytné, dopravní) z různých regionů nelze doporučit, protože by při interpretaci nebylo možno využít vzájemné porovnání faktorových příspěvků a proporcí mezi jednotlivými identifikovanými faktory. Pro identifikaci zdrojů je tedy vhodné kombinovat buď různé typy lokalit v rámci malého území s podobným regionálním imisním pozadím (vzdálenosti lokalit max. desítky km) nebo stejné typy lokalit v rámci různých regionů (stovky km a více).

V oblasti laboratorních analýz a navazujícího hodnocení byly poprvé využity teplotně rozlišené frakce elementárního a organického uhlíku, které jsou měřeny při analýze EC/OC podle protokolu EUSAAR2. Z hlediska interpretace se jako zásadně přínosné ukázaly frakce elementárního uhlíku, na základě kterých lze pomocí PMF dobře separovat primární částice ze silniční dopravy (relativně vysoké zastoupení frakce EC3 jak ve výfukových emisích, tak i v otěrech a resuspenzi z vozovek) od individuálního vytápění (převaha frakcí EC1 a EC2). Teplotně rozlišené frakce lze také využít k určení typu zdroje emisí, který v atmosféře nejvíce přispívá k tvorbě konkrétního typu sekundárního aerosolu.



Měření aethalometrem bylo poprvé provedeno na všech lokalitách. Byly potvrzeny předběžně vyhodnocené přínosy této metody zjištěné v projektové oblasti 2 (Kladensko). Metoda je využitelná jako vynikající ukazatel spalování biomasy (parametr  $\Delta C$ , tj. rozdíl koncentrace měřené na kanálu BC1 a koncentrace kanálu BC7). Zjištěné statisticky významné korelace aethalometrického měření s EC+OC ( $R^2 > 0,7$ , viz Obrázek 11) a PAH umožňují nahradit tyto analýzy a snížit tak náklady na identifikaci zdrojů v případech, kdy není vyžadována vysoká přesnost modelu (pro ověření hlavních priorit ochrany ovzduší v konkrétní lokalitě nebo jako screeningové měření). Pro tento účel ale doporučujeme v rámci každé měřicí kampaně kalibraci aethalometrického měření k naměřené koncentraci EC+OC na omezené sadě paralelně odebraných vzorků.



Obrázek 11 Korelace aethalometrického měření se sumou EC/OC

Veškeré analýzy anhydrosacharidů použité k identifikaci zdrojů v oblasti 3 byly v rámci zavádění této laboratorní metody provedeny v laboratoři pro identifikaci zdrojů ČHMÚ. Výsledky jednak ověřily použitelnost měření z tohoto pracoviště pro účely identifikace zdrojů, jednak jasně ukázaly na přínos souběžného stanovení více zástupců této skupiny, zejména levoglucosanu a mannosanu. Zatímco levoglucosan sám o sobě nepostačuje pro spolehlivé odlišení spalování biomasy od hnědého uhlí, kombinace těchto dvou látek je v tomto ohledu velmi spolehlivá a umožnila tak vyšší rozlišení modelu PMF.

Pokud jde o metodu prvkové analýzy ED XRF, měřením v oblasti 3 bylo potvrzeno, že je pro identifikaci zdrojů receptorovým modelem PMF v podmínkách České republiky dobře použitelná. Ačkoliv je oproti ICP-MS celkově méně přesná, s datovými sadami ED XRF lze snadněji identifikovat faktory složené převážně z lehkých prvků a/nebo prvků zemské kůry

(minerální částice, resuspenze ze zemského povrchu, mořská sůl apod.). Využitelnost XRF tak vyniká v letním období, kdy tyto faktory mohou mít významný podíl na koncentraci PM<sub>2,5</sub>.

## Diskuse k modelovým výsledkům

Jedním z hlavních cílů identifikace zdrojů v projektové oblasti 3 bylo ověření schopnosti modelu PMF v podmínkách České republiky kvantifikovat imisní podíl automobilové dopravy na koncentraci PM<sub>2,5</sub>. S ohledem na to, že měření v Brně, Hradci Králové a Olomouci bylo provedeno na lokalitách v blízkosti rušných městských komunikací, může se zdát vypočtený desetinový podíl primárních emisí ze silniční dopravy na celkové koncentraci PM<sub>2,5</sub> nízký (v absolutní hodnotě 1 až 2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Běžně používané rozptylové modely, které zahrnují pouze primární emise, predikují pro podobně frekventované silnice imisní příspěvky PM<sub>2,5</sub> se zahrnutím resuspenze v řádu nejvýše prvních jednotek  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a bez resuspenze v desetínách  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . V tomto kontextu je výsledek receptorového modelu PMF v souladu s gaussovskými modely používanými v rozptylových studiích.

Jak je zde uvedeno, podíl primárních emisí z dopravy je na všech hodnocených lokalitách vůči celkové koncentraci PM<sub>2,5</sub> poměrně nízký, přesto bývá v městských lokalitách zjištěno výrazně vyšší znečištění ovzduší oproti okolnímu území. Nepřímo tak z provedené identifikace zdrojů vyplývá, že zvýšené znečištění ve městech je většinou působeno dusičnanovým sekundárním aerosolem, který je pravděpodobně rozhodující měrou indukovan oxidy dusíku emitovanými silniční dopravou. Tomu nasvědčuje vzájemný poměr dvou hlavních identifikovaných složek sekundárního aerosolu. Zjištěný poměr identifikovaného podílu dusičnanového (SA AN) a síranového (SA AS) aerosolu byl v zimě 3,2 až 4,8, přičemž nejvyšší v Brně a nejnižší v Olomouci. V dopravně méně zatížených lokalitách v předchozí projektové oblasti (Kladensko) byl tento poměr výrazně vyšší v Libušíně a Švermově (1,8 a 1,5) a výrazně nejnižší v dopravou nezatíženém Zbečně (1,1). Je tedy zřejmé, že podíl dusičnanů, jakožto hmotnostně nejvýznamnější složky zimního sekundárního aerosolu i celkové průměrné koncentrace PM<sub>2,5</sub>, roste přímo úměrně s intenzitou automobilové dopravy v okolí měřicích míst. Za pozornost v této souvislosti stojí, že vliv dopravy na celkové koncentrace PM<sub>2,5</sub> se projevuje podstatně silněji v zimě, kdy meteorologické podmínky umožňují formaci dusičnanu amonného. V létě tato hmotnostně nejvýznamnější část znečištění z automobilové dopravy z fyzikálně-chemických důvodů nevzniká. Pravděpodobně jde o jeden z podstatných důvodů, proč jsou zimní koncentrace ve městech oproti letní úrovni podstatně vyšší.

Z výše uvedených skutečností vyplývá také podstatné zjištění, že posuzování vlivu jednotlivých komunikací v městských oblastech, které je pro účely ochrany ovzduší v praxi běžně prováděno prostřednictvím rozptylových studií v EIA a navazujícím procesu povolování staveb, má zanedbatelnou vypovídací hodnotu. Protože do těchto modelů vstupují pouze emise primárních částic, výsledek reprezentuje pouze malý zlomek celkového skutečného imisního příspěvku. Z tohoto hlediska je namísto zvážit změnu stávajícího způsobu, jakým jsou na lokální úrovni hodnoceny vlivy dopravní infrastruktury. Posuzování jednotlivých dopravních staveb postrádá z hlediska ochrany ovzduší praktický smysl. Aby modelem predikovaný imisní vliv dopravní infrastruktury nebyl výrazně podhodnocen, je nezbytné hodnotit širší území (okresní a větší měřítko) se zohledněním kumulativního efektu silničních komunikací, včetně procesů formace sekundárního aerosolu. Predikce očekávaného vlivu dopravy je vhodné provádět na základě regionálních rozptylových modelů, které umožňují zohlednit tvorbu sekundárních částic. Pro hodnocení stávajícího vlivu dopravy je vhodné využívat buď tyto pokročilé transportní modely, nebo je možné kombinovat výsledek nejčastěji používaných gaussovských modelů (pole

imisiích příspěvků primárních částic) s výsledkem receptorového modelování (doplňující bodová informace o podílu dopravy na sekundárních částicích).

Jak je výše uvedeno, formace dusičnanů z  $\text{NO}_x$  byla identifikována jako významný vliv automobilové dopravy na kvalitu ovzduší. Doprava je ve městech sice pravděpodobně hlavním, nikoliv ale jediným zdrojem emisí, který vyvolává vznik tohoto sekundárního anorganického aerosolu. Místní emise z vytápění plynem a transport znečištění z větších vzdáleností mohou mít v chladné části roku na koncentraci dusičnanů také významný podíl. Pro přesnější hodnocení celkového vlivu dopravy by bylo nutné tyto zdroje odlišit, což se provedenou identifikací nepodařilo. Bližší rozlišení by bylo pravděpodobně možné na základě zahrnutí velikostního složení částic do modelu PMF. Při stárnutí sekundárního aerosolu se uplatňují procesy kondenzace a koagulace, kterými se velikost částic zvětšuje. Na základě velikostního složení částic v jednotlivých PMF faktorech by proto bylo pravděpodobně možné odlišit místní znečištění od částic transportovaných z větších vzdáleností. Do budoucna je proto pro účely identifikace zdrojů vhodné rozvíjet metody měření velikostního složení aerosolu, včetně ultra jemných částic ( $<0,1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Přesnější hodnocení vlivu dopravy ve městech na koncentrace  $\text{PM}_{2,5}$  nabude na významu v souvislosti s budoucími přísnějšími imisiními limity této znečišťující látky. Pro hodnocení vlivu dopravy na formaci sekundárních částic stojí proto za zvážení případné zavedení stálého měření koncentrace dusičnanů ve městech a mimo ně na vybraných stanicích Státní sítě imisiního monitoringu prostřednictvím stávajících vzorkovačů. Stanovení dusičnanů je z analytického hlediska spolehlivé, s nízkou relativní nejistotou a je relativně levné. Z výsledku provedené identifikace zdrojů pomocí PMF vyplývá, že rozdíl koncentrace dusičnanů na vhodně vybraných městských a venkovských stanicích by bylo možné využít jako dobrou informaci o podílu automobilové dopravy na tvorbě sekundárního anorganického aerosolu, tedy o hlavním příspěvku, kterým se podílí tento typ zdrojů na koncentraci  $\text{PM}_{2,5}$ . Časová řada těchto měření by umožnila podstatně přesnější hodnocení podílu dopravy na koncentraci  $\text{PM}_{2,5}$  a jeho trendu, než jaké umožňuje stávající rozsah imisiních měření a modelování. Naměřené koncentrace dusičnanů by mohly být použity také k ověření a lokálnímu upřesnění chemických transportních modelů, kterými je v současnosti vliv dopravy hodnocen.

K vlivu automobilové dopravy je vhodné také poznamenat, že obecně známým souvisejícím vlivem je tvorba sekundárního organického aerosolu (SOA), zejména fotochemickými procesy v letním období. V rámci provedené identifikace zdrojů sice nebyly měřeny koncentrace organických látek, které při těchto reakcích vznikají, ale organický aerosol by se projevil v zastoupení měřeného organického uhlíku v některém z faktorů reprezentujících sekundární aerosol (vzhledem k časovému průběhu je velmi nepravděpodobná interference příspěvku SOA s lokálními faktory reprezentujícími primární částice). V rámci těchto faktorů byl organický uhlík obsažen nejvíce v „zimním“ nitrátovém sekundárním aerosolu (SA AN) a v „letním alkalickém“ aerosolu (SA ALK SUMM). Organický uhlík ve faktoru SA AN je pravděpodobně tvořen degradovanými emisemi z vytápění domácností. Ve faktoru SA ALK SUMM může mít komplexní původ v mnoha typech zdrojů na trase dálkového transportu znečištění nebo se jedná minimálně zčásti o sekundární organický aerosol indukovaný automobilovou dopravou. Vzhledem k významnému imisičnímu podílu faktoru SA ALK SUMM (okolo  $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a skutečnosti, že většinu hmotnostního příspěvku tohoto faktoru tvoří právě organický uhlík, může být letní podíl dopravou indukovaného SOA v tomto faktoru významný a je potřeba s ním počítat v rámci nejistoty odhadu celkového imisičního příspěvku dopravy ke koncentraci  $\text{PM}_{2,5}$ .

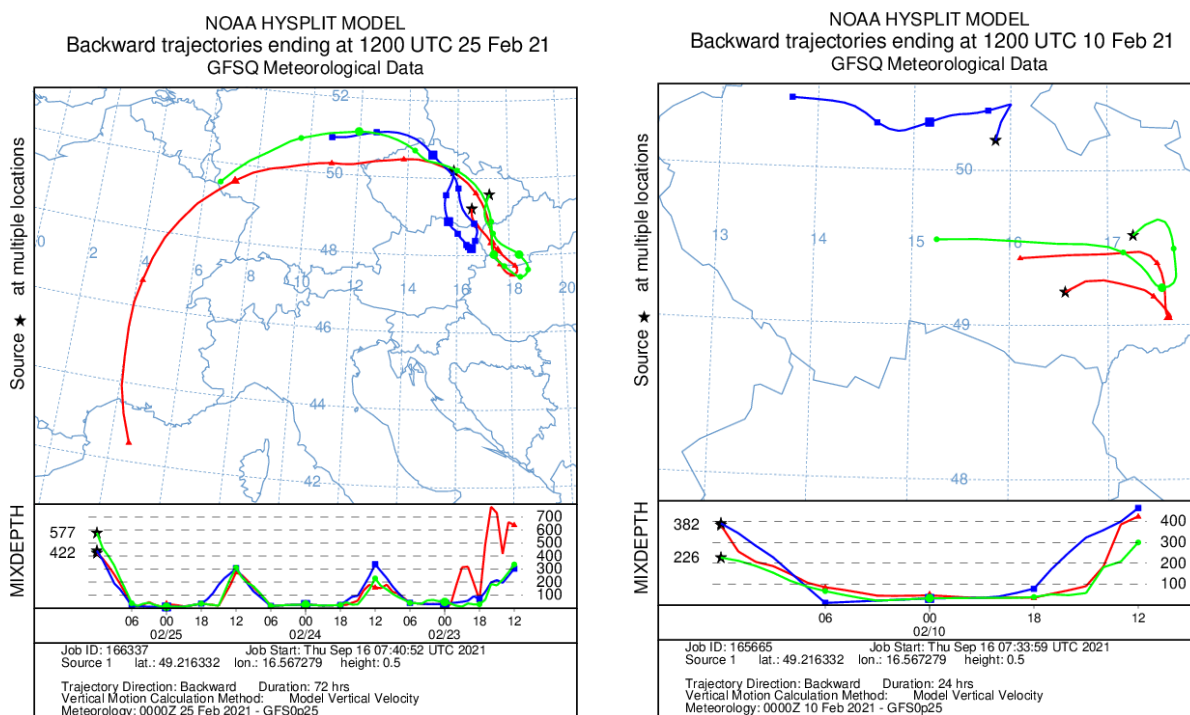
Při interpretaci jednotlivých typů sekundárního aerosolu se jako slabina ukázala absence srovnávacího měření mimo zvolené městské lokality. Porovnání faktorových profilů a imisičních podílů kvantifikovaných modelem PMF uvnitř a vně městských území v příslušném kraji by

umožnilo přesněji určit, nakolik formace kvantifikovaných sekundárních aerosolů souvisí s lokální dopravou v příslušných městech, a nakolik se jedná o regionální pozadí, či transport z větších vzdáleností.

## Ověření interpretace modelu

Součástí výzkumu a vývoje v rámci řešeného projektu bylo také testování a vývoj metod k ověření modelových výsledků. Výsledky PMF v oblasti 3 byly ověřeny jednak pomocí funkce Conditional Probability Function (CPF), která byla využita pro lokálně působící zdroje, jednak na základě výsledku hromadného zpracování zpětných trajektorií. Ty byly aplikovány na modelové faktory regionálně a nadregionálně působících zdrojů. Pro výjimečné epizody dálkového přenosu znečištění minerálním prachem ze Sahary (zahrnutý ve faktoru CRUSTAL) nemělo hromadné zpracování zpětných trajektorií význam, proto bylo ověření provedeno na základě jednotlivě konstruovaných trajektorií modelem HYSPLIT.

Pro ilustraci jsou do textu zařazeny dva příklady ověření výsledků PMF pomocí jednotlivých zpětných trajektorií vypracovaných modelem HYSPLIT. Prvním z nich je situace 25. 2. 2021, kdy byl zaznamenán extrémně vysoký imisní příspěvek modelového faktoru CRUSTAL (viz Příloha 2). Správnost interpretace tohoto faktoru jako minerální prašnosti je doložena trajektorií směřující z oblasti Sahary přes středomoří do České republiky (vzhledem k délce trajektorie 72 hodin nezasahuje až nad africký kontinent, směr je ale zřejmý). Jak ukazuje Obrázek 12, částice byly velkou rychlostí transportovány do střední Evropy, kde došlo k prudkému snížení rychlosti větru a změně jeho směru, což umožnilo intenzivní několikadenní sedimentaci nad naším územím a způsobilo vysoké naměřené koncentrace.



Obrázek 12 Zpětné trajektorie pro 25. 2. 2021 12:00 UTC a 10. 2. 2021 12:00 UTC

Kromě ověření výsledků byly zpětné trajektorie využity také k lepšímu pochopení původu znečištění. Příkladem je hodnocení situace dne 10. 2. 2021, kdy dosáhl imisní příspěvek několika faktorů velmi vysokých hodnot. Obrázek 12 dokládá, že důvodem byla mimořádně



zhoršená rozptylová situace s nízkou rychlostí větru, nestálým směrem proudění a nízkou výškou směšovací vrstvy. Tato situace zasáhla všechny tři hodnocené lokality, Brno poněkud slaběji než Hradec Králové a Olomouc. V ovzduší proto došlo ke kumulaci lokálních emisí ze vzdálenosti řádově desítek km od měřicích lokalit. Vysoké imisní příspěvky byly modelem zjištěny u faktorů reprezentujících vytápění domácností uhlím (HEAT CC), sekundární nitrátový aerosol (SA AN) a sekundární síranový aerosol (SA AS). Tato skutečnost dokládá, že významná až dominantní část těchto zdrojů a typů znečištění vzniká lokálně.

Grafy CPF a vážené koncentrační růžice pro lokálně působící faktory jsou obsahem příloh 3 a 4. Průkaznost těchto metod je nejlepší v případech hodnocení zdrojů s jasnou lokalizací, které působí z jasně definovaného směru (např. bodové průmyslové zdroje). V případě rozsáhlých plošných nebo liniových zdrojů (např. vytápění domácností, silniční síť na území města) nemohou přinést tak jednoznačné výsledky, a to zejména v případech, kdy se tyto zdroje nacházejí v několika směrech od receptoru. Vybraná měřicí místa v centrech měst jsou těmito zdroji obklopena z mnoha směrů, takže vypovídací hodnota provedených analýz je omezená. Grafy CPF a vážené koncentrační růžice jsou vypracovány pro lokality Hradec Králové a Olomouc, ve kterých to umožňují naměřené hodnoty směru a rychlosti větru (na lokalitě Brno-Kroftova nebyly tyto parametry měřeny). Závěry indikované na základě modelu PMF a na něj navazující interpretací grafů CPF a koncentračních růžic pro uvedená dvě města jsou shrnuty v následujícím textu.

### Hradec Králové

Vytápění domácností uhlím a biomasou ovlivňuje měřicí lokalitu zejména ze severního až severovýchodního směru (nizkopodlažní zástavba čtvrti Malšovice mezi ul. Brněnská a Kmochova).

Vliv automobilové dopravy se projevuje z mnoha směrů. CPF poskytuje výsledek pouze s nízkou mírou pravděpodobnosti. Podle koncentrační růžice převládá v případě resuspenze, výfukových emisí a otěrů vliv se severovýchodu a východu (nejvyšší příspěvky od ul. Brněnská, západní směr je ale také významný, což je buď chybou modelu, nebo vlivem přilehlého parkoviště.

Směr, odkud pochází minerální prašnost, nelze podle CPF věrohodně určit, koncentrační růžice ukazuje na původ západně a východně s nevýznamnými ostatními směry. Z východu se takto pravděpodobně projevuje resuspenze z povrchů s odkrytými zeminami bez vegetace a zpevněných ploch v areálu přilehlé průmyslové zóny, na západ od lokality je původ nejasný, může jít o školní hřiště (pokud je s antukovým povrchem) nebo o zeminový prach vířený v letním období z přilehlých travnatých ploch (při sečení nebo při nedostatečně zapojeném trávníku).

### Olomouc

V Olomouci je z hlediska vytápění domácností graf CPF neprůkazný, podle koncentrační růžice je celkově největší podíl znečištění přinášen z jihovýchodního směru, a to převážně v nižších koncentracích (pravděpodobně Holice), západní a severní směry se ale vyznačují také vysokými příspěvky (prostor mezi ulicemi Polská, Velkomoravská a Švýcarské nábřeží).

Resuspenze vyvolaná dopravou působí v místě měřicího místa vysoký příspěvek podle CPF nejvíce ze severovýchodu, podle koncentrační růžice ze severozápadu, severu a severovýchodu (ul. Velkomoravská). Směr působení výfukových emisí nelze pomocí CPF věrohodně určit, podle koncentrační růžice přicházejí z mnoha směrů, výrazně nejvíce ale od severozápadu až západu (křiž. ul. Velkomoravská a Rooseveltova).

Minerální prašnost pochází podle CPF pravděpodobně z východního směru, ale spolehlivost tohoto hodnocení je nízká. Podle koncentračních růžic jsou minerální částice transportovány od jihovýchodu (přílehlé hřiště s nekvalitním trávníkem, popř. průmyslový areál mezi měřicím místem a čtvrtí Nový Svět).

Poloha průmyslového zdroje těžkých kovů (faktor IND HM) se podle CPF může nacházet severně nebo jihovýchodně od lokality, ale výsledek je neprůkazný (pravděpodobnost <0,4). Podle koncentrační růžice nejvyšší imisní příspěvky tohoto zdroje přicházejí ze směru od severozápadu (pravděpodobně podle katastru nemovitostí Moravské železářny a.s., nyní UNEX a.s., v části Řepčín).

Celkově lze považovat na základě výsledků CPF a koncentračních růžic výsledky PMF za reálné (směr, odkud imisně působí modelem identifikované zdroje, se v zásadě shoduje s umístěním skutečných zdrojů těchto typů znečištění), a to i přesto, že tato kontrola je v městských podmínkách obtížná (použité metody, zejména CPF, se vyznačují nižší mírou spolehlivosti oproti územím s menším počtem zdrojů).

Jako využitelnější se ukázala, podobně jako v předchozích projektových oblastech 1 a 2, metoda vážených koncentračních růžic, která obsahuje více informací než grafy CPF.

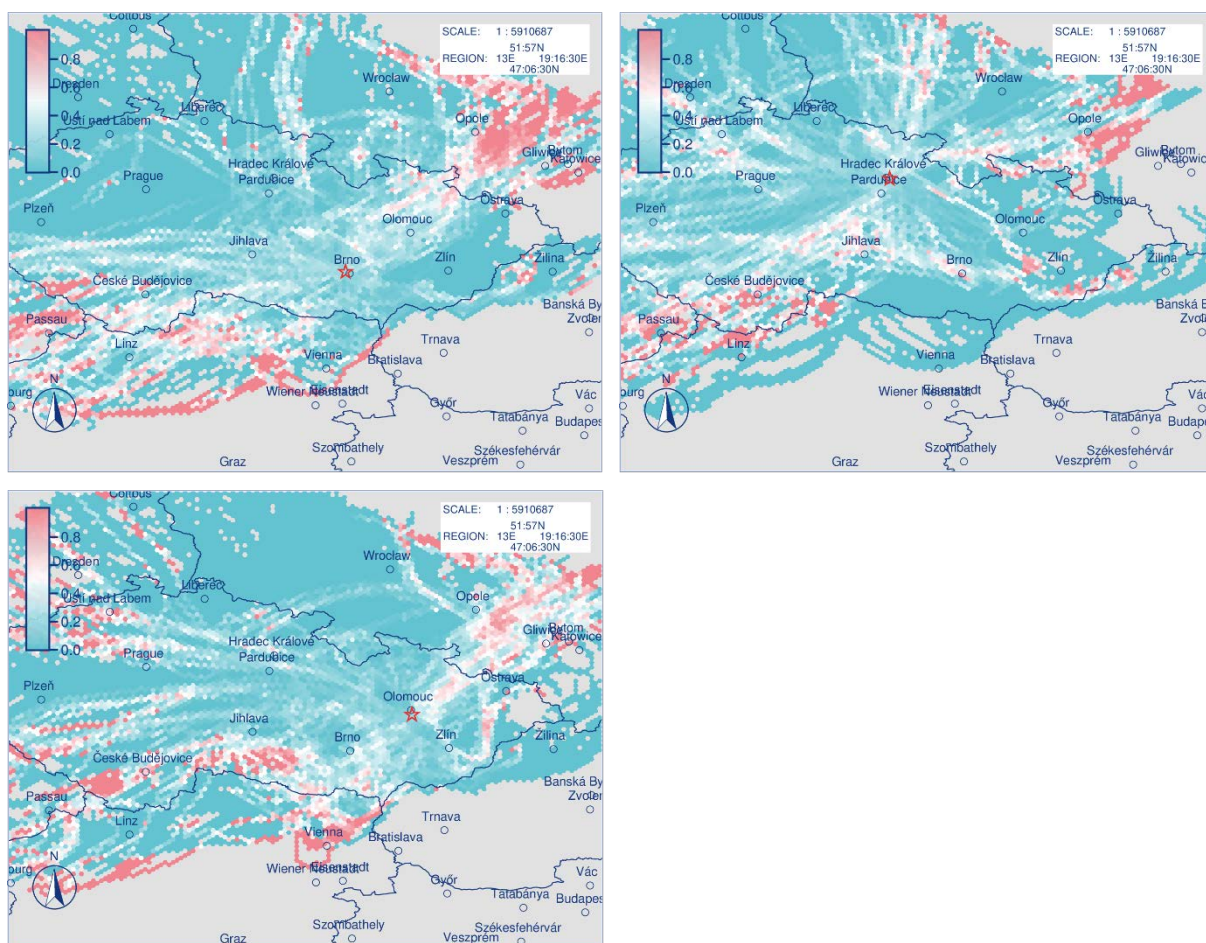
Součástí projektových prací byl také vývoj nových nástrojů pro ověřování modelových výsledků a zlepšení jejich interpretace. Ve spojení s hromadným zpracováním zpětných trajektorií byla v oblasti 3 otestována upravená metoda PSCF (Potential Source Contribution Function). Obvykle používaná metoda PSCF využívá pouze trajektorie z období nejvyšších imisních příspěvků příslušného PMF faktoru. Umožňuje tak znázornit oblasti, ze kterých přicházejí nejvyšší příspěvky (často se používá 90. percentil faktorového imisního příspěvku). Upravená metodika do mapování zahrnuje jak údaje o nejvyšších (90. percentil), tak i nejnižších (10. percentil) imisních příspěvcích a znázorňuje tak oblasti, ze kterých přicházejí vysoké, ale i naopak nízké příspěvky znečištění. Podle původní metodiky je v každou mapovou buňku vypočtena hodnota odpovídající míře pravděpodobnosti, že zdroj vysokých imisních příspěvků se nachází právě v této buňce. Podle upravené metodiky se naproti tomu pro každou výpočtovou buňku počítá index v intervalu hodnot 0 až 1. Nulová hodnota znamená, že přes tuto buňku procházely pouze trajektorie s nízkým imisním příspěvkem (<10. percentil). Naopak hodnota indexu 1 znamená, že přes tuto buňku procházely pouze trajektorie s nejvyššími imisními příspěvky (>90. percentil). Upravená metodika tak oproti původní metodice zvýrazňuje rozdíly mezi zdrojovými a ostatními oblastmi. Grafický výsledek posouzení zdrojových oblastí různých typů sekundárního aerosolu upravenou metodou PSCF je obsahem přílohy 5.

K výsledkům je vhodné poznamenat, že přeshraniční znečištění je metodou PSCF indikováno nezřetelně, protože přesah hodnotitelné oblasti za hranice ČR je malý (je omezen délkou zpracovaných zpětných trajektorií). V těchto okrajových částech analýzy lze očekávat její nižší spolehlivost. Druhým důvodem je skutečnost, že měřicí stanice byly umístěny hluboko uvnitř České republiky, takže vliv zahraničních zdrojů je zastřen vlivem tuzemských zdrojů podél migrační trasy znečištění.

Pro ilustraci uvádíme na následujícím Obrázek 13 pravděpodobnou zdrojovou oblast průmyslového sekundárního síranového aerosolu (SA AS). Provedená analýza naznačuje



původ především v polské části Slezska a nejasně také jižně od hranice ČR (střed přibližně v okolí města Linz).



Obrázek 13 Modifikovaná metoda PSCF – faktor SA AS – lokalita Brno (vlevo nahoře), Hradec Králové (vpravo nahoře) a Olomouc (vlevo dole)

Původ sekundárního převážně dusičnanového anorganického aerosolu (SA AN) je nejasný. Podle provedené analýzy by mohl být tento faktor spíše lokální až regionální, vázaný na tuzemské zdroje. Málo průkazně je indikována zvýšená pravděpodobnost vzniku na střední Moravě (prostor mezi Brnem, Zlínem a Olomoucí), a pak také na Ostravsku a v přilehlé části polského Slezska. Pro tento závěr ale není dostatek dat. Vlivem meteorologických podmínek chybí z této oblasti zpětné trajektorie pro lokalitu Hradec Králové, proto lze na zdrojovou oblast usuzovat pouze na základě trajektorií pro Brno a Olomouc a i ty leží na okraji hodnotitelné oblasti a mají tedy zvýšenou nejistotu.

Letní typ sekundárního síranového alkalického aerosolu (SA ALK SUMM) pochází nejpravděpodobněji z polské části Slezska, pravděpodobně také východní části Moravy (Zlínsko, Ostravsko) a a oblasti jižně od hranice ČR (prostor mezi městy Linz a Jihlava).

V případě sekundárního síranového aerosolu alkalického typu (SA ALK WINT) analýza naznačuje tři zdrojové oblasti – širší oblast na německo-polském pomezí (vysoký instalovaný výkon energetických zdrojů Turów, Jänschwalde, Boxberg, Schwarze Pumpe, a Polski Koncern Naftowy ORLEN S.A.), polskou část Slezska a na jihu prostor mezi městy Linz a Jihlava.

## Porovnání s výsledky chemického transportního modelování

Výsledky modelu PMF byly porovnány s podíly zdrojů kvantifikovanými chemickým transportním modelem CAMx, který byl použit v rámci Analýzy příčin znečištění pro Aktualizované Programy zlepšování kvality ovzduší 2020+ (viz následující Tabulka 3).

Tabulka 3 Procentuální podíly kategorií zdrojů na PM<sub>2,5</sub> v Aktualizaci PZKO 2020+

	R 1a2	R 1a2 – energetika	R 1a2 - LCPR	1a2 – průmysl	R3 - lokální vytápění	R3 – doly	R3 – chovy	R3 – pole	R3 – výstavba	R4 - silniční doprava celkem	R4 - sčítaná silniční dop.	R4 - nesčítaná silniční dop.	R4 - tunely Praha	R4 - nesilniční doprava	R4 - letiště Praha Ruzyně	R 1a2 - zdroje nad 50 km	primární PM ze zahraničí	sekundární částice
Brno – Kroftova	0	0	0	0	29	0	0	0	0	12	10	2	0	0	0	0	7	52
Hradec Králové – Brněnská	1	0	0	0	19	0	0	0	0	10	8	2	0	0	0	0	6	64
Olomouc – Hejčín*	1	0	0	1	27	0	0	0	0	11	10	2	0	0	0	0	7	54

\* Pro projektovou lokalitu Olomouc-Velkomoravská nebyly výsledky v Analýze příčin znečištění PZKO 2020+ publikovány, proto je pro porovnání zvolena jiná olomoucká stanice s podobnou imisní charakteristikou s výjimkou podílu dopravy, který lze v případě lokality Velkomoravská očekávat vyšší.

Vzhledem k odlišnému formátu výsledků nelze přímo porovnat modelem vypočtené podíly všech kategorií zdrojů. V případě zahraničního příspěvku znečištění model PMF nerozlišil primární a sekundární částice, model CAMx naopak nerozlišuje tak detailně jako PMF zdroje primárních částic a typy sekundárního aerosolu. Z tohoto důvodu byly některé skupiny zdrojů, resp. typů znečištění, pro účely porovnání sloučeny (viz Tabulka 4).

Tabulka 4 Porovnání výsledků modelů CAMx PZKO 2020+ a PMF TAČR TITSMZP704

Zdroj	Aktualizace PZKO 2020+	PMF TAČR TITSMZP704
Individuální vytápění domácností	19 – 29	13 – 20
Silniční doprava	10 – 12	8 – 11
Sekundární částice + primární částice ze zahraničí	58 – 71	66 – 77

Receptorový model PMF oproti modelu CAMx udával přibližně o třetinu nižší imisní příspěvek vytápění domácností. Naopak podíl sekundárních částic byl modelem PMF vyčíslen o 8 až 14 % vyšší. Podíl automobilové dopravy byl oběma typy modelů kvantifikován s nevýznamnou odchylkou. Při hodnocení rozdílů obou modelů je vhodné vzít v úvahu, že model CAMx zpracovaný pro PZKO 2020+ vycházel z emisních a meteorologických vstupů roku 2015, zatímco pro PMF se jednalo o data z let 2020–2021. Tato skutečnost mohla významně ovlivnit zejména podíl individuálního vytápění a sekundárních částic, které jsou silně závislé na meteorologických podmínkách v konkrétní topné sezoně. To může vysvětlovat rozdílný výsledek posuzovaných modelů, který je i tak z hlediska rozhodování o opatřeních na ochranu ovzduší přijatelný. Roli mohlo sehrát také použité prostorové rozlišení modelu CAMx, při kterém nemusel být přesně kvantifikován případný lokální vznik sekundárních částic.

## Předběžné vyhodnocení opatření PZKO s ohledem na získané výsledky

Na základě modelových výsledků bylo posouzeno zacílení opatření navržených v Aktualizovaném PZKO 2020+.

### Opatření navržená v PZKO

Projektová oblast 3 zahrnovala tři města v různých zónách, resp. aglomeraci. Na všechny tři lokality se vztahují následující nová opatření v sektoru lokálního vytápění pro omezení znečištění ovzduší částicemi benzo[*a*]pyrenem:

- PZKO\_2020\_1 - Účinná kontrola plnění požadavků kladených na provozovatele spalovacích zdrojů zákonem o ochraně ovzduší
- PZKO\_2020\_2 - Zvýšení povědomí provozovatelů o vlivu spalování pevných paliv na kvalitu ovzduší, významu správné údržby a obsluhy zdrojů a volby spalovaného paliva

V Brně k těmto opatřením přistupují také opatření v sektoru doprava pro omezení znečištění ovzduší NO<sub>2</sub>, částicemi PM<sub>2,5</sub> a PM<sub>10</sub> (PZKO\_2020\_5 Kompletní dostavba Velkého městského okruhu v Brně a navazujících komunikací). Podpůrnými opatřeními jsou v Brně omezování prašnosti ze stavební činnosti a omezování emisí ze stavební mechanizace, omezování spalování suchých rostlinných materiálů na otevřených ohništích a dopravní opatření vedoucí ke snížení objemu individuální automobilové dopravy a podpoře jiných způsobů dopravy.

Nová opatření zacílená na vytápění domácností jsou v Hradci Králové doplněna podpůrnými opatřeními omezení znečištění z domácností, opatření ke snížení vlivu dopravy na úroveň znečištění ovzduší a opatření ke snížení vlivu stacionárních zdrojů na úroveň znečištění ovzduší.

V Olomouci je kromě sektoru lokálního vytápění kladen důraz na nová opatření v sektoru průmyslu pro omezení znečištění ovzduší částicemi PM<sub>2,5</sub> (PZKO\_2020\_3 - Snížení vlivu stávajících stacionárních zdrojů na úroveň znečištění ovzduší – snižování fugitivních a vykazovaných emisí).

## **Soulad PZKO s výsledky provedené identifikace zdrojů**

Opatření v aktualizovaném PZKO2020+ odpovídají zjištěním z provedené identifikace zdrojů, pokud jde o prioritní skupiny zdrojů primárních částic. Podle modelu PMF zaujímalo ve všech třech městech mezi primárními částicemi nejvyšší podíl vytápění domácností. PZKO 2020+ je tedy s výsledky provedeného modelování plně v souladu, protože na opatření v tomto segmentu zdrojů klade největší důraz.

Pro Brněnskou aglomeraci stanovuje PZKO 2020+ opatření v sektoru dopravy, zatímco v ostatních dvou zónách nikoliv. Provedenou identifikací zdrojů byla získána bodová informace o podílech zdrojů v místě měření. Získanou informaci nelze v případě zdrojů primárních částic zobecnit na širší území. Opodstatněnost přístupu v PZKO 2020+ proto nelze na základě modelu PMF posoudit. Z výsledků je ale zřejmé, že vyšší vliv na imisní situaci PM<sub>2,5</sub> má automobilová doprava prostřednictvím sekundárního aerosolu, než prostřednictvím primárních částic. Považujeme proto za vhodné, aby v budoucích strategiích na ochranu ovzduší byl podíl dopravou indukovaného sekundárního aerosolu kvantifikován a vzat do úvahy při prioritizaci opatření. Aktivity tímto směrem doporučujeme rozvíjet i proto, že potřeba detailnější a přesnější kvantifikace vlivu dopravy bude pravděpodobně narůstat s postupným snižováním emisí z vytápění domácností.

V Hradci Králové jsou opatření PZKO 2020+ v souladu s výsledky provedené identifikace zdrojů. Stejně tak v Olomouci, která je jedinou projektovou lokalitou projektové oblasti 3 s identifikovaným vlivem místního průmyslového zdroje. Pravděpodobným původcem znečištění identifikovaným pomocí PMF (fugitivní emise těžkých kovů) jsou podle katastru nemovitostí Moravské železářny, a.s., nyní UNEX, a.s., který je i podle PZKO významným zdrojem emisí k provedení opatření pro dodatečné snížení emisí.



## Závěr

V létě 2020 a v zimním období na počátku roku 2021 byla provedena měřicí kampaň v projektové oblasti 3 (automobilovou dopravou významně zatížená města Brno, Hradec Králové a Olomouc). Laboratorně zpracované výsledky byly následně využity k identifikaci zdrojů znečištění ovzduší a typů znečištění suspendovanými částicemi PM<sub>2,5</sub> v těchto lokalitách.

Při zohlednění výše uvedených souvislostí a nejistot lze podíly zdrojů kvantifikované modelem PMF shrnout následovně:

- Pouze čtvrtinu až třetinu celkové průměrné koncentrace PM<sub>2,5</sub> tvořily primární částice, zbývající dvě třetiny až tři čtvrtiny hmoty PM<sub>2,5</sub> představoval sekundární aerosol, převážně anorganické povahy. Podíl sekundárního organického aerosolu činil přibližně 5 %.
- Z primárních částic zaujímalo nejvyšší podíl vytápění domácností pevnými palivy, které tvořilo necelou pětinu znečištění PM<sub>2,5</sub>. Sekundárními částicemi se na koncentraci PM<sub>2,5</sub> vytápění domácností podílelo přibližně 15 až 25 %. Celkově tak **vytápění domácností pevnými palivy přispívá k průměrné koncentraci PM<sub>2,5</sub> třetinou až necelou polovinou**. Provedená identifikace zdrojů tak ukazuje na skutečnost, že domácnosti mohou být nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím kvality ovzduší i v centrech velkých měst, a to především v důsledku přenosu znečištění z venkovských oblastí. Zjištěný podíl lokálních primárních emisí z domácností ale rovněž není zanedbatelný, pravděpodobně vlivem emisí na periferiích měst. Pozoruhodný je kvantifikovaný podíl emisí ze spalování biomasy, který je na rozdíl pod předchozích projektových oblastí na hodnocených lokalitách srovnatelný nebo dokonce vyšší než vliv spalování uhlí. Za pravděpodobnou příčinu považujeme vyšší podíl vytápění krbovými vložkami a krbovými kamny v okrajových částech měst oproti venkovským oblastem, kde je relativně větší část výroby tepla v domácnostech zajištěna uhelnými kotli.
- Automobilová doprava se na celkové koncentraci PM<sub>2,5</sub> podílela primárními částicemi cca 10 %, sekundárními cca 10 až 20 % (dolní odhad za předpokladu, že doprava přispívá k letní koncentraci organického uhlíku v sekundárních částicích a k zimní koncentraci dusičnanů polovinou; horní odhad pro hypotetický případ, že by tyto částice pocházely výhradně z automobilové dopravy). **Celkový emisní příspěvek dopravy na měřicích lokalitách tedy dosahoval cca 20 až 30 %** průměrné koncentrace PM<sub>2,5</sub>.
- **Průmyslová uhelná energetika** se na koncentraci PM<sub>2,5</sub> podílela téměř výhradně sekundárními částicemi. Její relativní průměrný příspěvek za dobu měření dosáhl přibližně **15 %** PM<sub>2,5</sub>. Dalšími cca 5 až 10 % se podílel průmysl na celkové koncentraci PM<sub>2,5</sub> prostřednictvím sekundárních síranů alkálií transportovaných na velkou vzdálenost. Podle chemického profilu se jedná pravděpodobně o velké spalovací zdroje na topný olej a rafinerie mimo území ČR. V posuzovaných lokalitách lze tedy celkový vliv velkých průmyslových spalovacích zdrojů na průměrné koncentraci PM<sub>2,5</sub> odhadovat na **20 až 25 %**.
- **Minerální prašnost tvořila nejvýše cca 6 %**, mořský aerosol maximálně první jednotky procent celkové průměrné hmotnostní koncentrace PM<sub>2,5</sub>.
- Jediný specifický průmyslový zdroj primárních částic byl identifikován v Olomouci. Jeho podíl na hmotnostní koncentraci PM<sub>2,5</sub> byl nevýznamný (< 1 %).

Rozdíly v podílech zdrojů mezi jednotlivými měřicími lokalitami byly poměrně malé. Brno-Kroftova se vyznačovala ze všech tří lokalit nejvyšším podílem vytápění domácností, převážně biomasou, a také výrazně vyšším podílem minerální prašnosti, což mohlo být ovlivněno dočasnými stavebními pracemi v blízkosti měřicího místa. Lokalita Olomouc-Brněnská se vyznačovala oproti ostatním dvěma lokalitám vyšším imisním příspěvkem ze spalování uhlí v domácnostech a naopak nejnižším podílem spalování biomasy. V Olomouci je patrný také vyšší vliv průmyslové energetiky, hlavně v letním období, což souvisí s intenzivnějším přenosem znečištění ze severovýchodu, zejména z polské části Slezska.

Výsledky provedené identifikace zdrojů se s přesností, která je dostatečná pro návrh strategických opatření v oblasti ochrany ovzduší, shodují s dřívějšími výsledky chemického transportního modelu použitého pro Analýzu příčin znečištění v rámci přípravy aktualizace PZKO 2020+. Jsou také plně v souladu s nově navrženými opatřeními v PZKO 2020+.

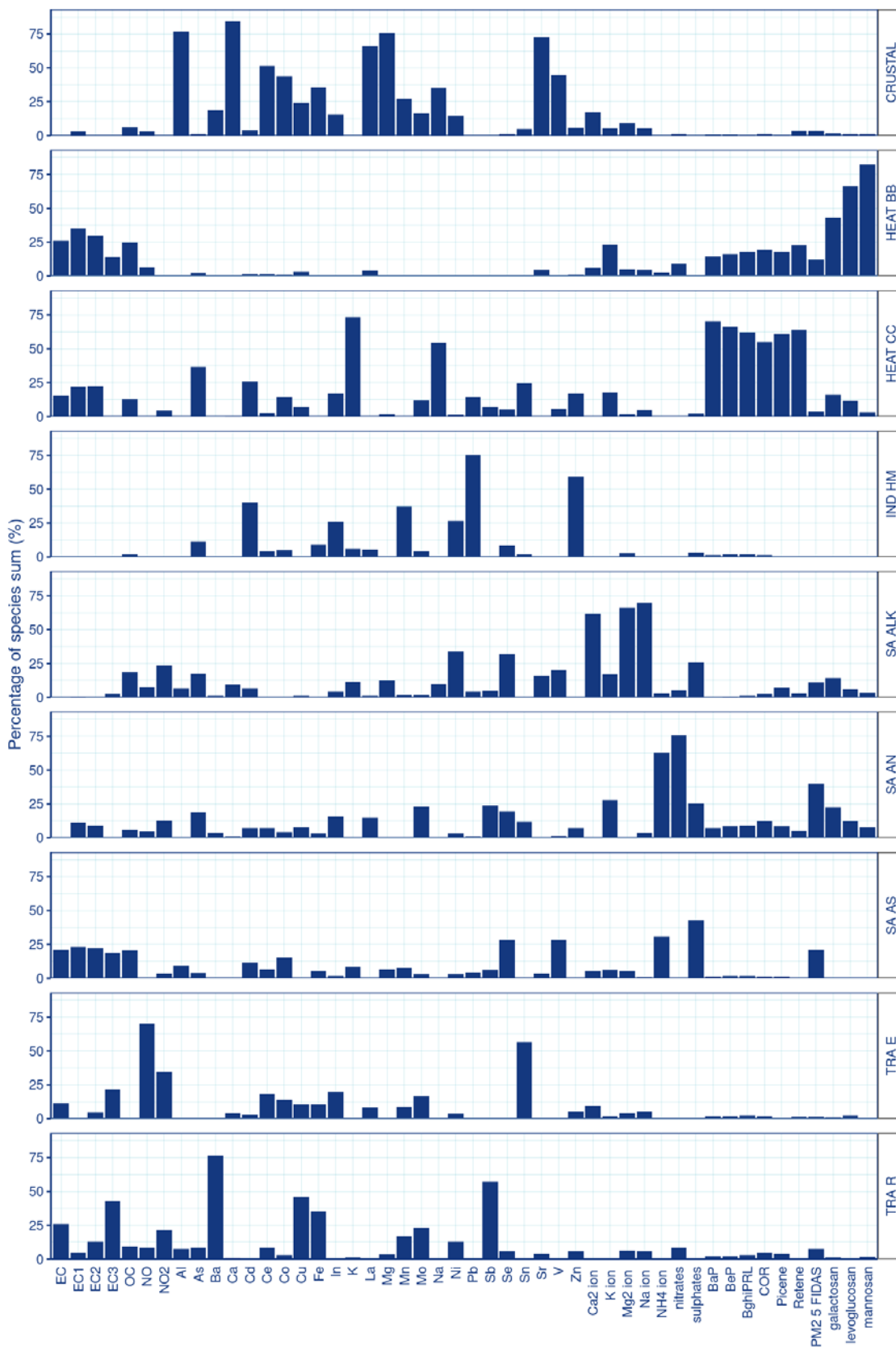
Identifikace zdrojů znečišťování ovzduší ve 3. projektové oblasti prokázala dobrou použitelnost modelování pomocí PMF pro strategické účely v ochraně ovzduší (určení prioritních skupin zdrojů pro realizaci opatření ke snížení emisí). Během tří let od počátku projektu byly vyvinuty a otestovány nové markery a způsoby hodnocení, které umožňují vyšší rozlišení (na počátku projektu 5 až 6, v současnosti okolo 10 faktorů) a spolehlivější odlišení jednotlivých zdrojů. Dobrá spolehlivost modelu PMF je nyní doložitelná shodou s výsledky analýz pro PZKO i v případě faktorů, které byly na počátku obtížně interpretovatelné, např. automobilové dopravy. Významným přínosem hodnocení pomocí PMF je, že poskytuje kvalitativně odlišnou informaci oproti chemickým transportním modelům. Umožňuje rozlišení různých typů sekundárního aerosolu, které mohou být kvalitativně odlišné od typů sekundárního aerosolu kvantifikované chemickými transportními modely. Oba modelové přístupy se tak vhodně doplňují. Protože sekundární aerosol je hmotnostně nejvýznamnější složkou znečištění ovzduší částicemi PM<sub>2,5</sub> v ČR, model PMF umožňuje nasměrovat správným směrem aktivity k ochraně ovzduší. Použitý způsob receptorového modelování je vhodný také k ověření příčin znečištění v oblastech s vysokou nejistotou emisních dat pro modelování (identifikace lokálních zdrojů s obtížně nebo nesprávně vyčíslenými emisemi, např. průmyslových fugitivních emisí, resuspenze ze zemského povrchu a vozovek atd.). Rozvoj laboratorních metod a vyhodnocení v ČHMÚ v rámci projektu umožnil zlevnění procesu identifikace zdrojů (méně vzorkovačů, realizace nových laboratorních metod vlastním technickým zařízením a personálními kapacitami), čímž se zvýšila jeho dostupnost pro běžné použití ke snížení nejistoty hodnocení založeného na imisním monitoringu a transportním modelování.



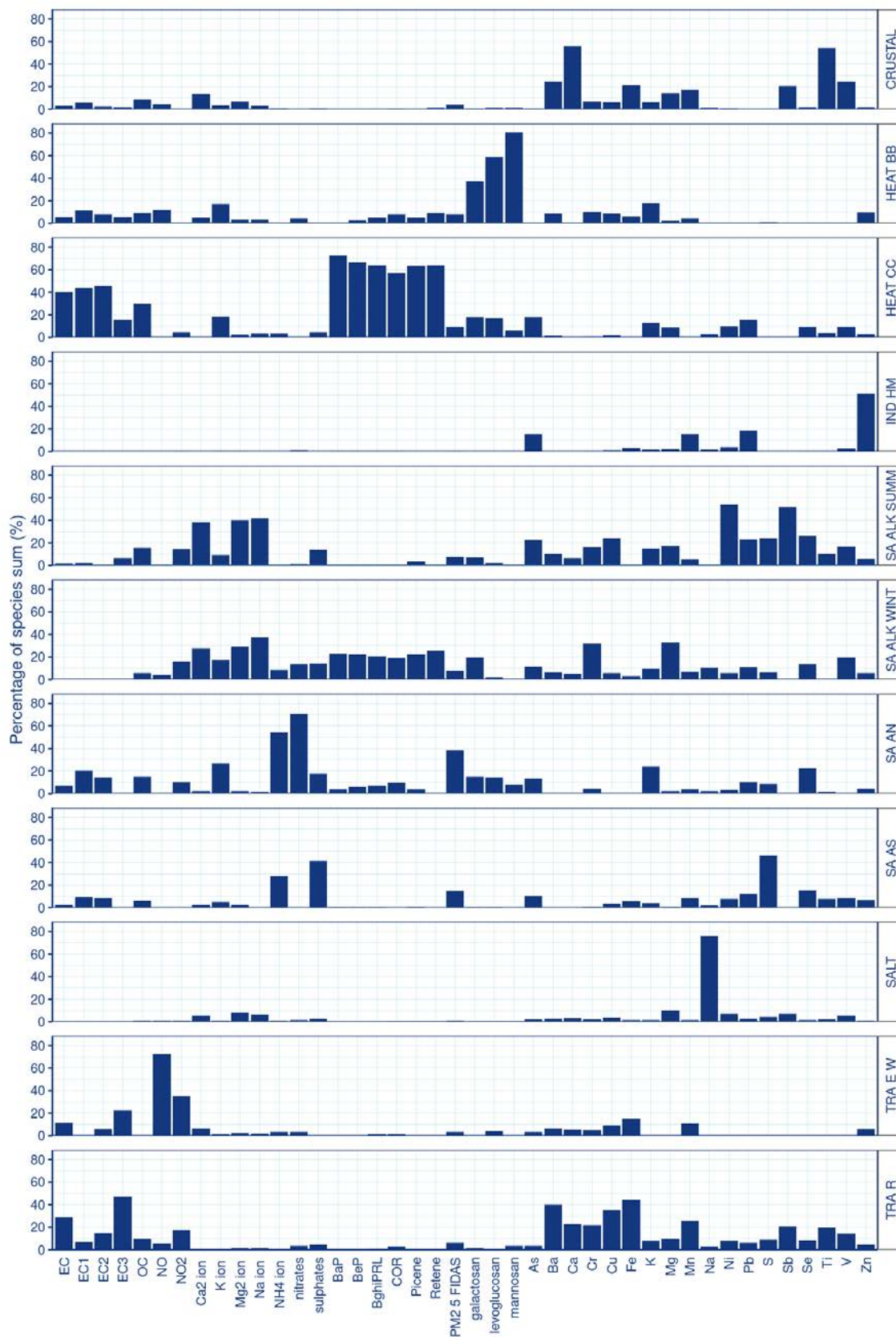
## Příloha 1

# Chemické profily faktorů identifikovaných pomocí PMF

### Výsledek PMF s prvkovou analýzou ICP-MS



## Výsledek PMF s prvkovou analýzou ED XRF



## Příloha 2

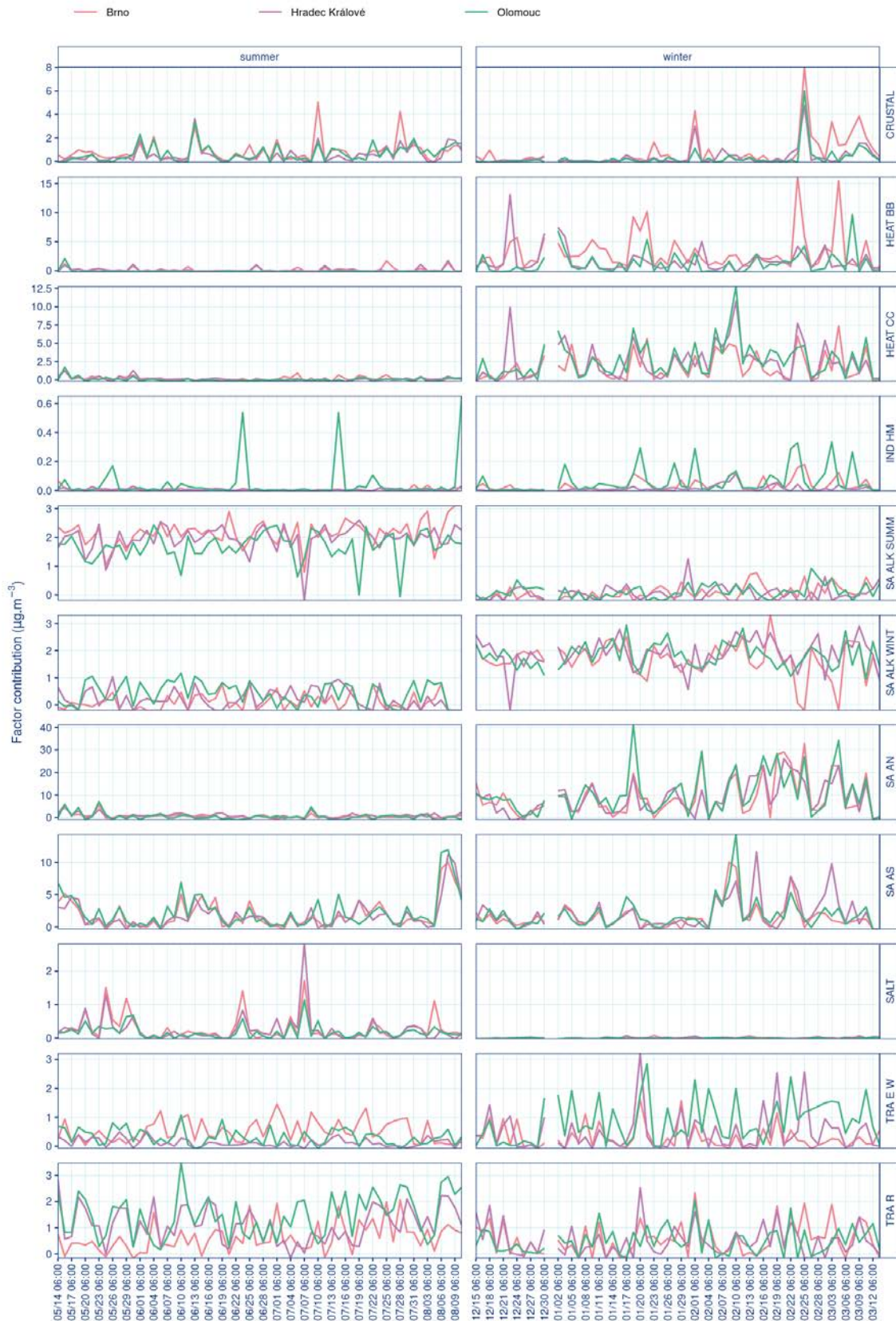
# Časové řady faktorů identifikovaných pomocí PMF

## Výsledek PMF s prvkovou analýzou ICP-MS





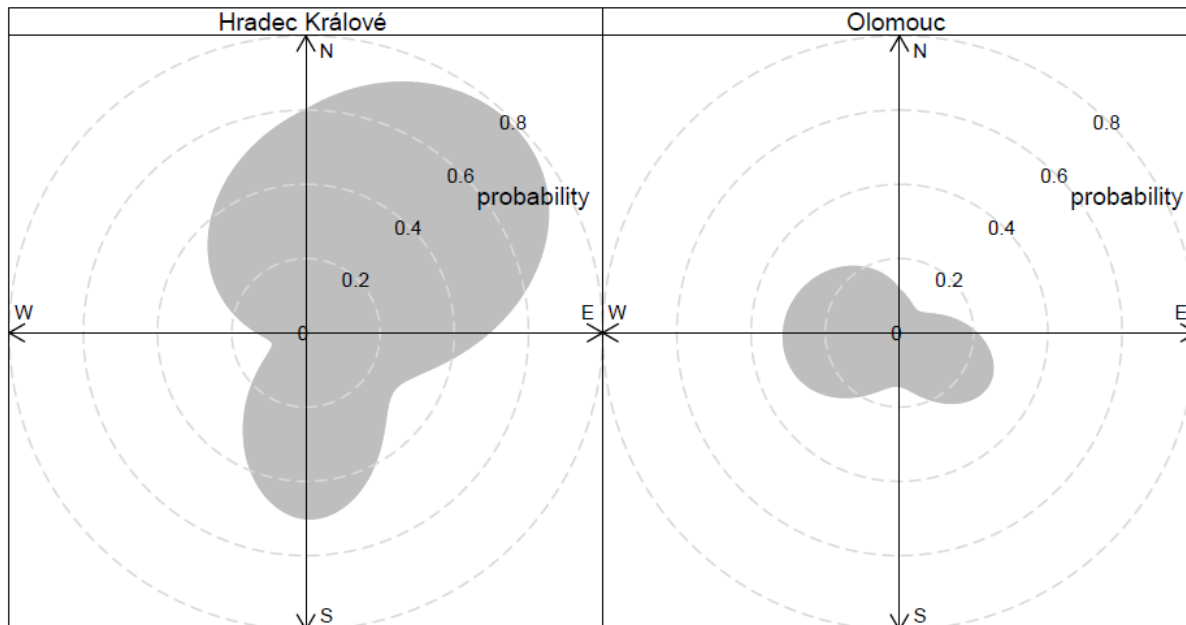
## Výsledek PMF s prvkovou analýzou ED XRF



## Příloha 3

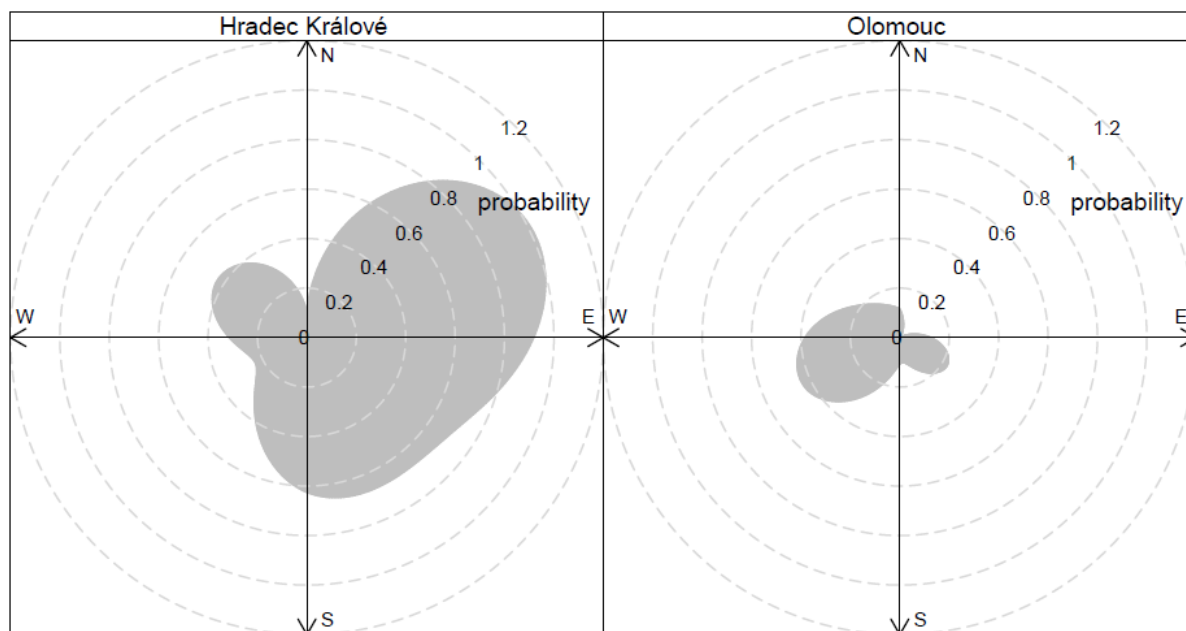
# Grafy Conditional Probability Function pro identifikované lokálně působící faktory

### HEAT CC



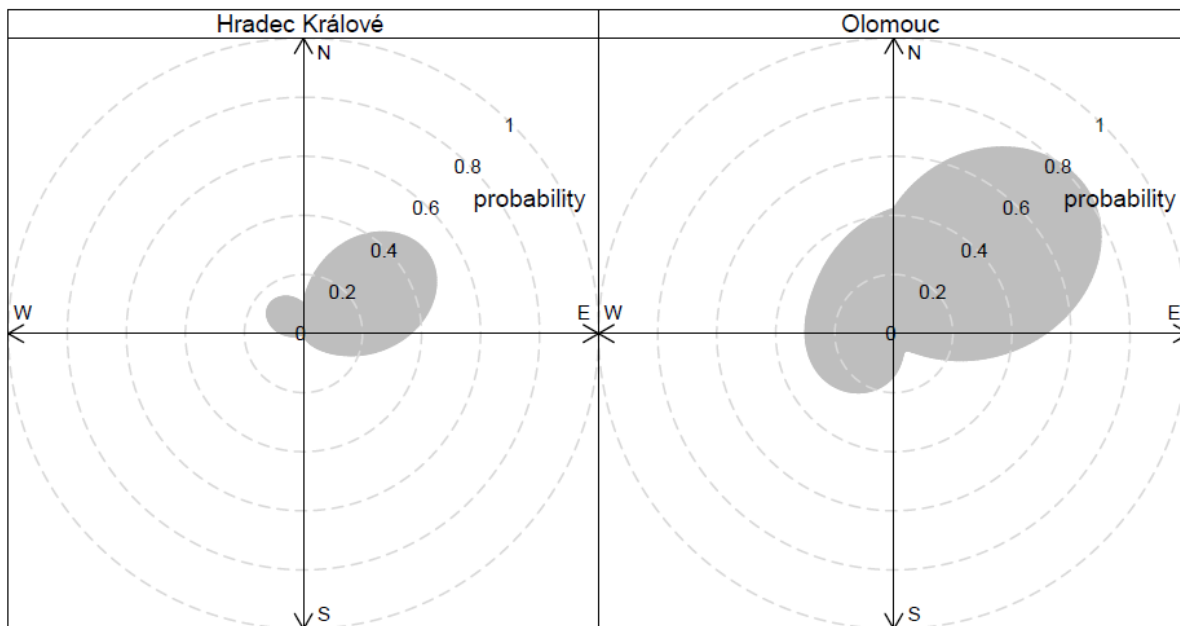
**CPF at the 75th percentile (=3026.8)**

### HEAT BB



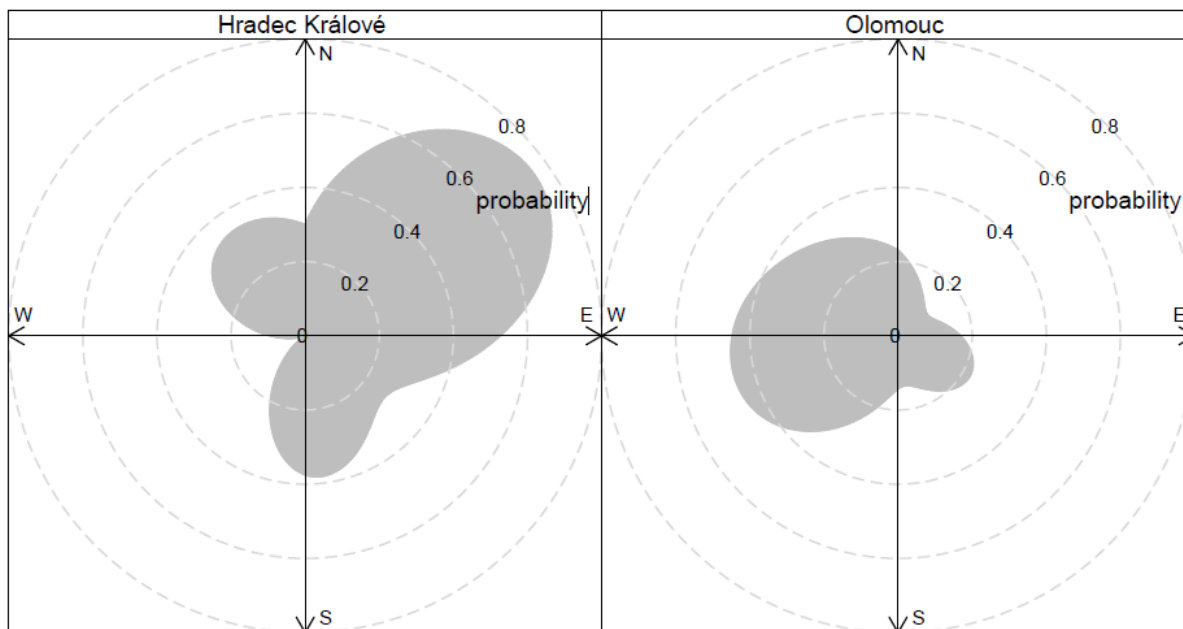
**CPF at the 75th percentile (=1372.4)**

### TRA R



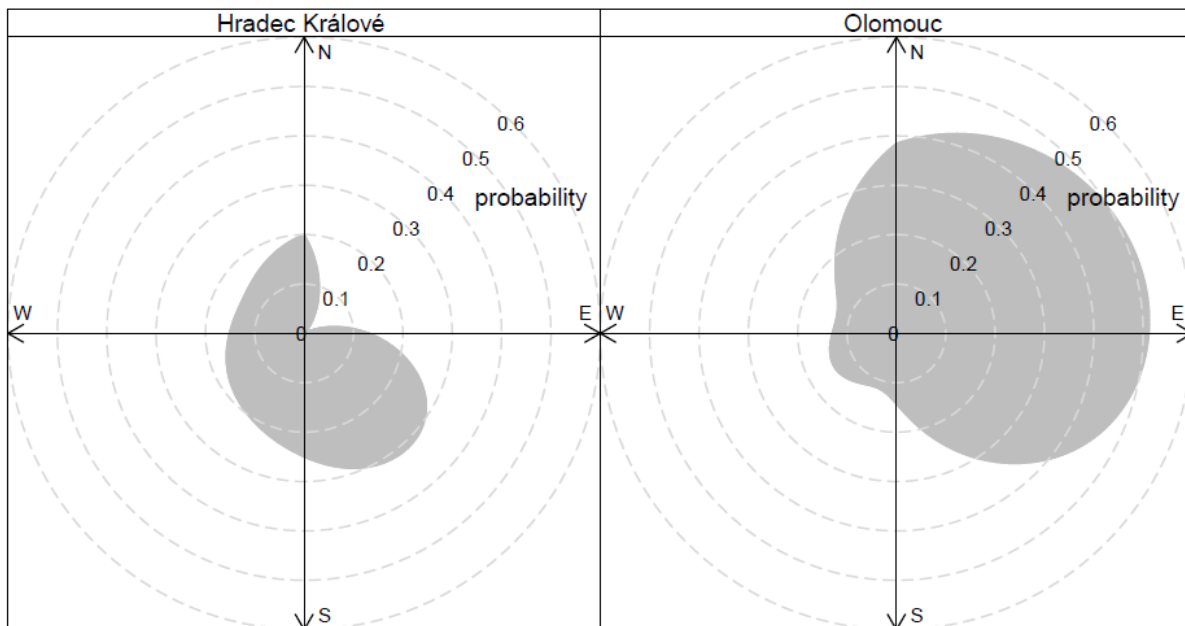
**CPF at the 75th percentile (=1291.3)**

### TRA E W

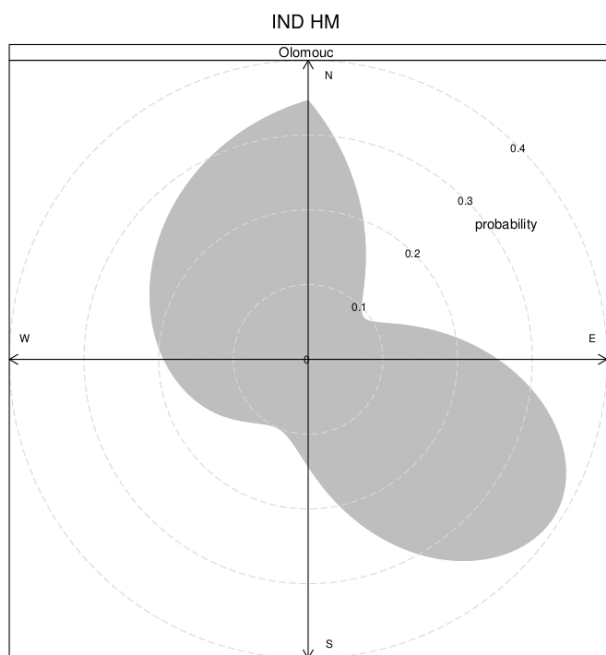


**CPF at the 75th percentile (=732.6)**

## CRUSTAL



**CPF at the 75th percentile (=516.7)**

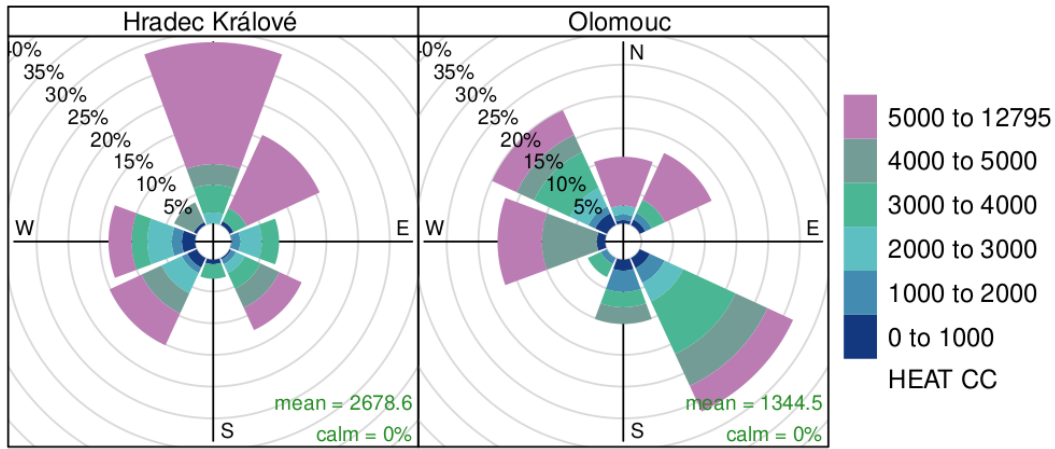


**CPF at the 75th percentile (=39.6)**

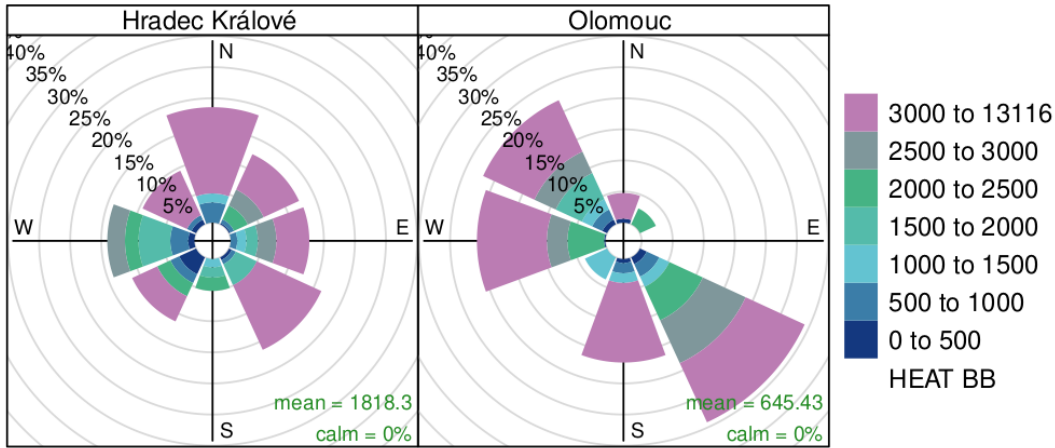


## Příloha 4

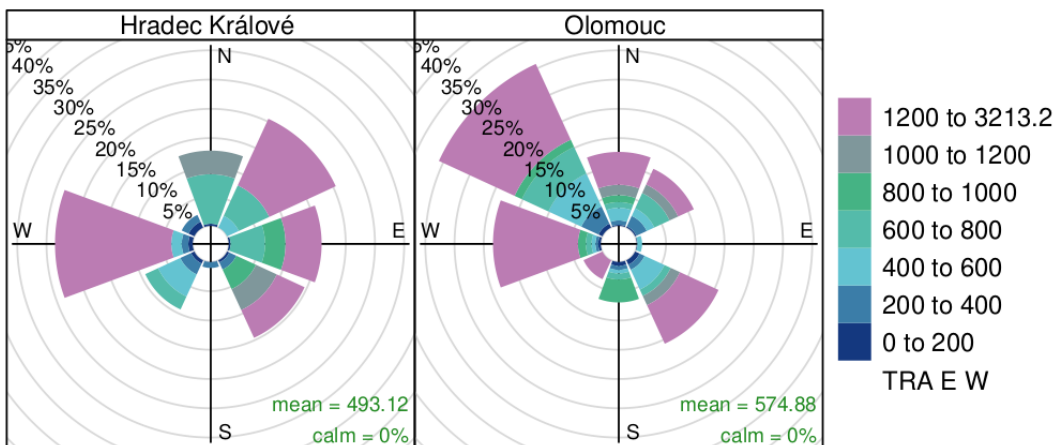
# Koncentračně vážené růžice pro identifikované lokálně působící faktory



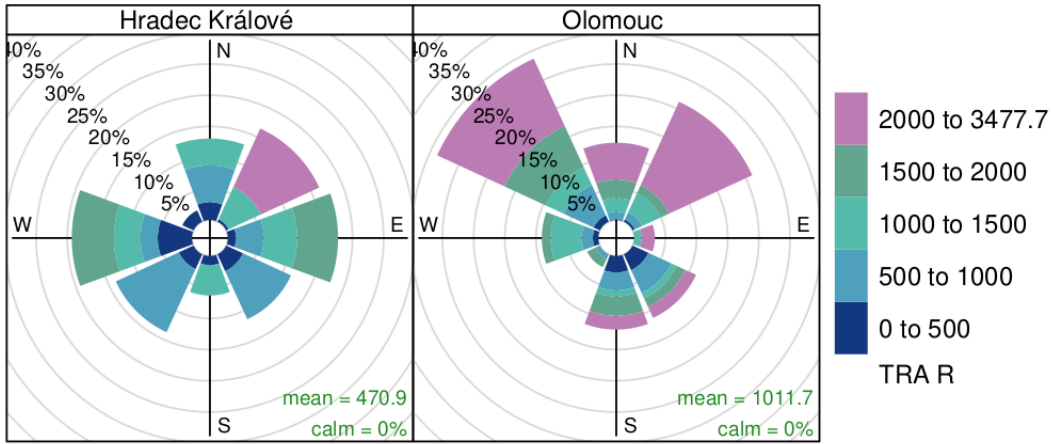
Proportion contribution to the mean (%)



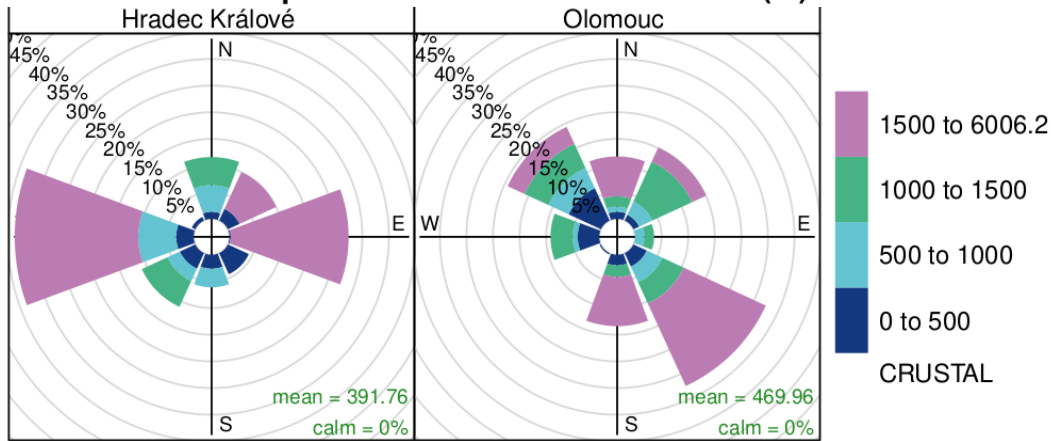
Proportion contribution to the mean (%)



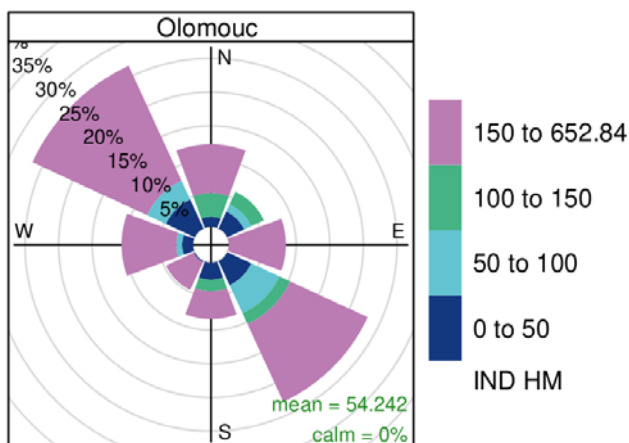
Proportion contribution to the mean (%)



**Proportion contribution to the mean (%)**



**Proportion contribution to the mean (%)**

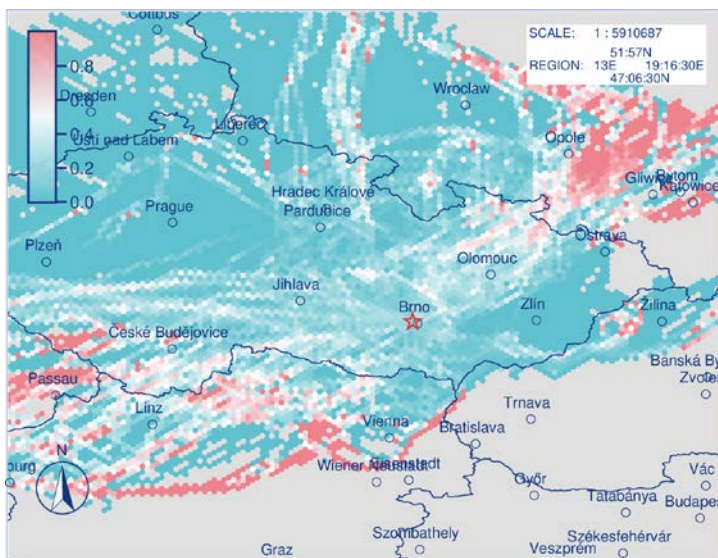


**Proportion contribution to the mean (%)**

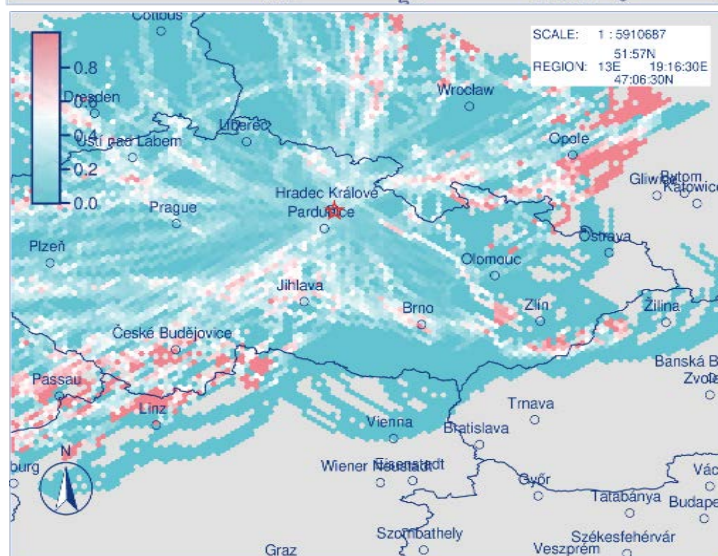
## Příloha 5

# Výsledky modifikované metody PSCF

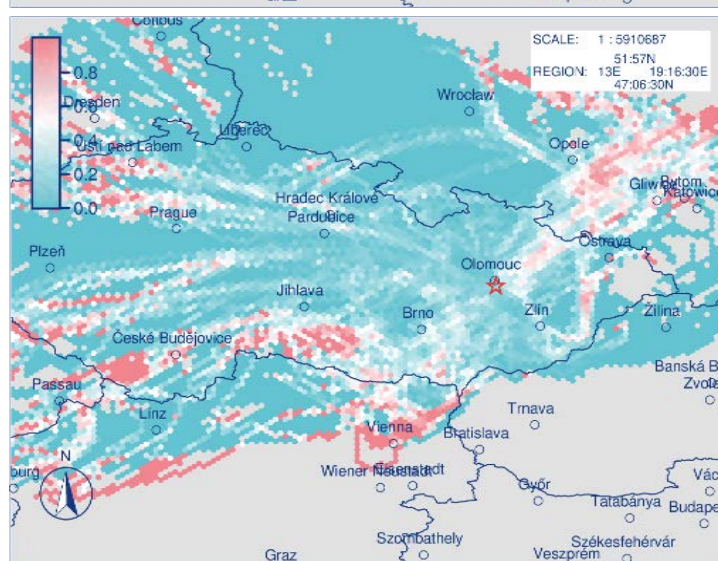
## Faktor SA AS



Brno



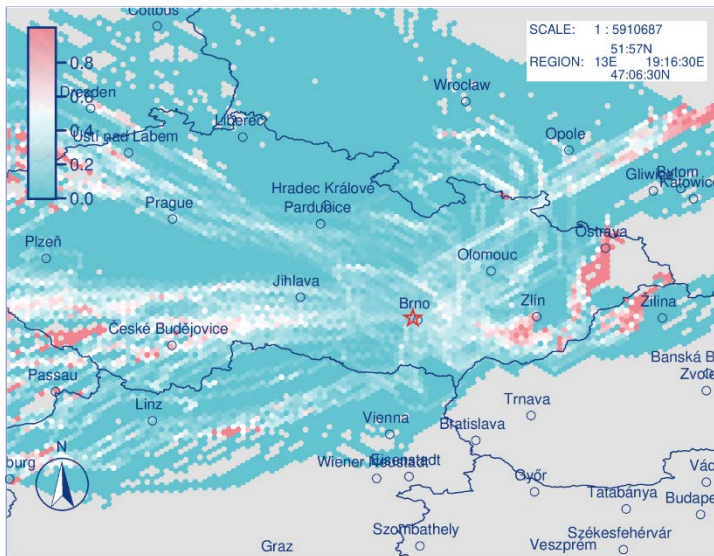
Hradec Králové



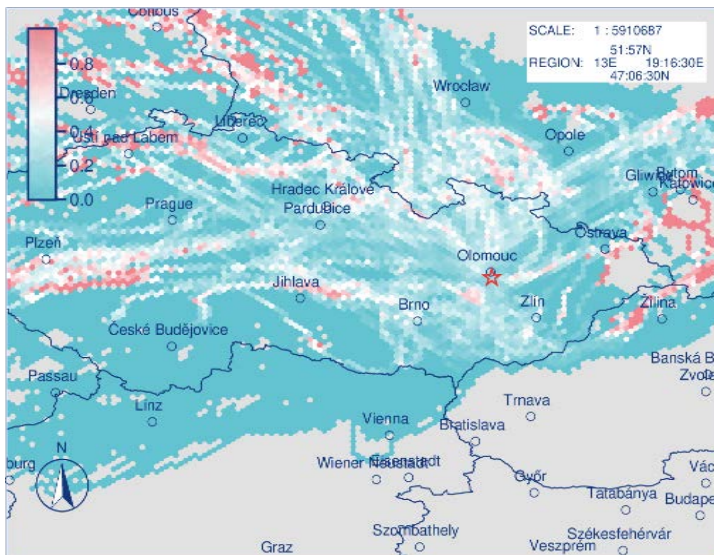
Olomouc



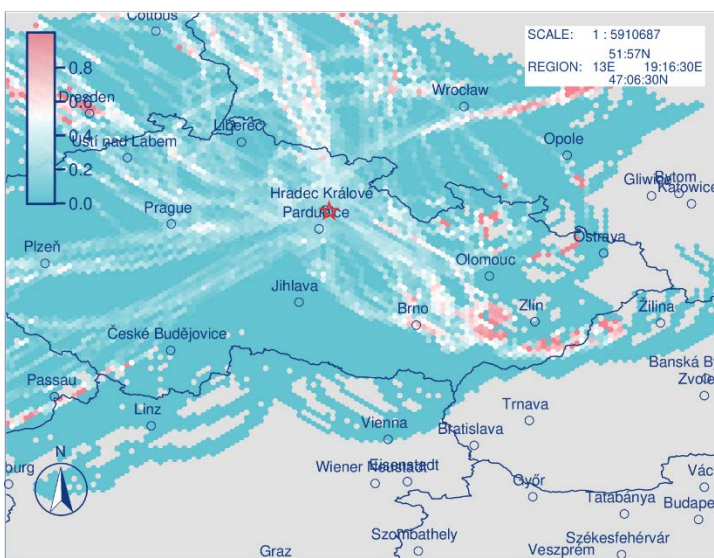
## Faktor SA AN



Brno

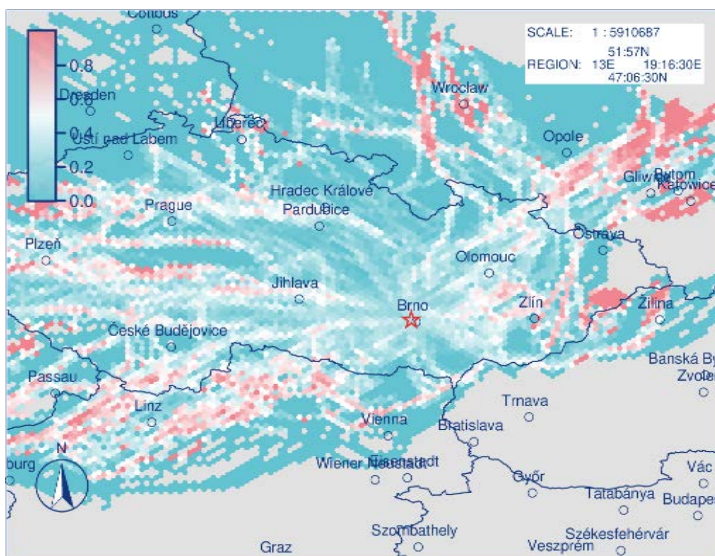


Hradec Králové

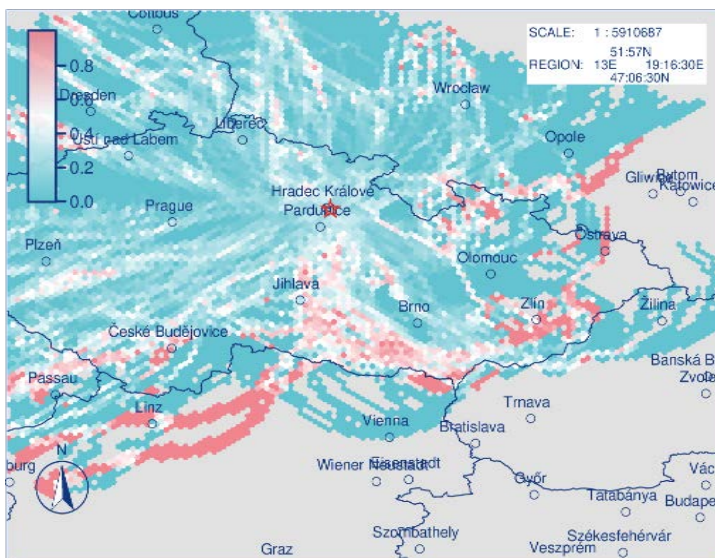


Olomouc

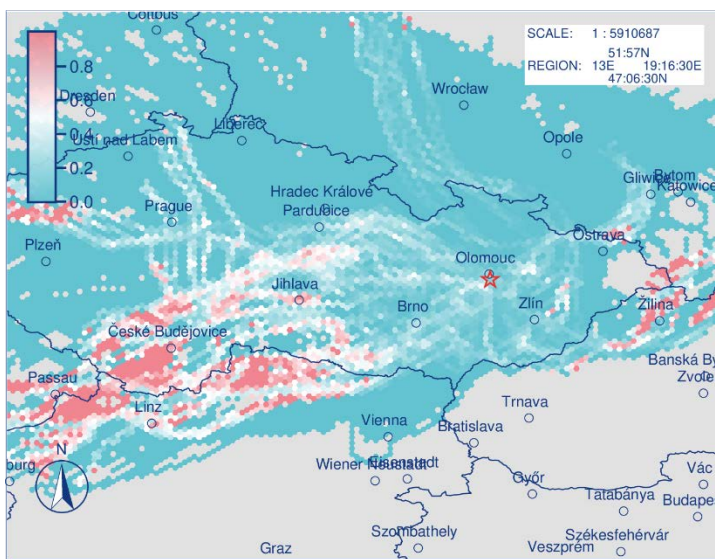
## Faktor SA ALK SUMM



Brno



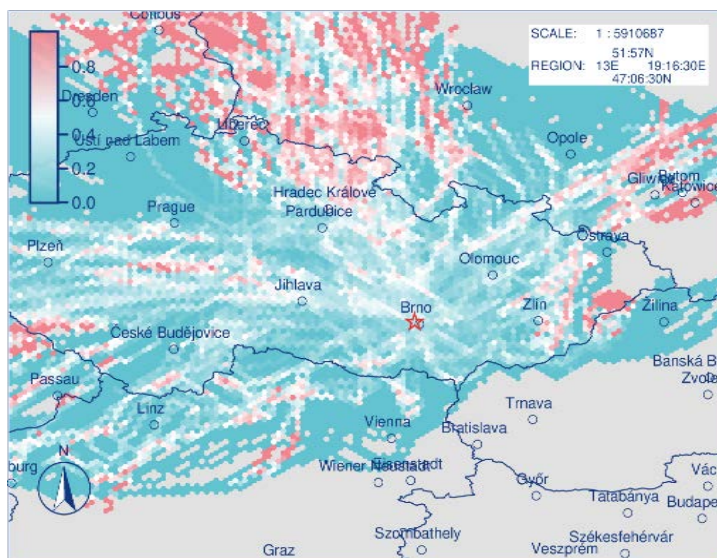
Hradec Králové



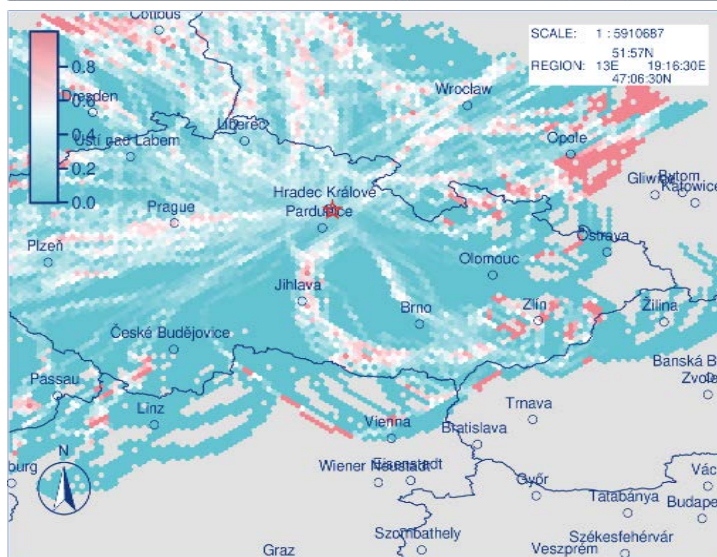
Olomouc



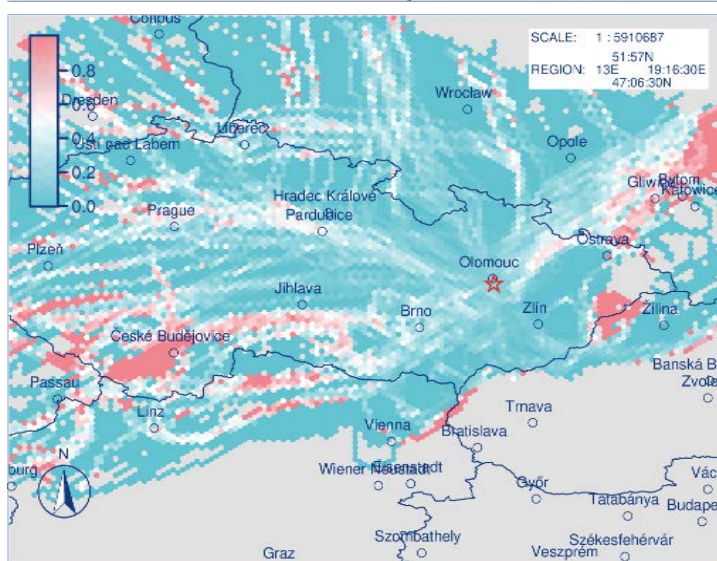
## Faktor SA ALK WINT



Brno



Hradec Králové



Olomouc