

Identifikace zdrojů znečištění ovzduší - souhrnná zpráva za oblast 2 (Kladensko)

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

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

Úvod	5
Hodnocená oblast a měřicí lokality	6
Popis měřicí lokality Kladno-Švermov	6
Popis měřicí lokality Libušín	8
Popis měřicí lokality Zbečno	10
Rozsah a metodika prací	11
Výsledky provedených prací	13
Meteorologické parametry	13
Statistické zhodnocení analytických dat	16
Koncentrace a hmotnostní složení aerosolu PM _{2,5}	16
Koncentrace B[a]P a As	17
Koncentrace černého, elementárního a organického uhlíku	19
Korelace hmotnostně významných iontů	22
Výsledek modelu PMF	24
Model s prvkovou analýzou ED XRF	25
Model s prvkovou analýzou ICP-MS	28
Přibližný model lokality Švermov na základě omezeného analytického rozsahu	32
Charakteristika identifikovaných faktorů kvality ovzduší	33
Ammonium nitrate	33
Ammonium sulphate	33
Heating type 1	33
Heating type 2	33
Mineral	34
Road traffic	34
Sea salt	34
Secondary industry	34
Diskuse výsledků	36
Nedostatky a neurčitosti hodnocení	41
Nejistoty spojené meteorologickými podmínkami	41
Nejistoty laboratorních analýz	41
Předběžné vyhodnocení opatření PZKO s ohledem na získané výsledky	44
Závěry a doporučení	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Umístění měřicích lokalit v projektové oblasti č. 2.....	6
Obrázek 2	Fotodokumentace měřicího místa Kladno-Švermov – pohled od SV	7
Obrázek 3	Fotodokumentace měřicího místa Kladno-Švermov – pohled od JV	8
Obrázek 4	Fotodokumentace měřicího místa Libušín – pohled od SV	9
Obrázek 5	Fotodokumentace měřicího místa Libušín – pohled od JZ.....	9
Obrázek 6	Fotodokumentace měřicího místa Zbečno – pohled od SZ	10
Obrázek 7	Fotodokumentace měřicího místa Zbečno – pohled od J	11
Obrázek 8	Větrné růžice reprezentující samostatně letní a zimní část odběrové kampaně	13
Obrázek 9	Celková větrná růžice reprezentující období měřicích kampaní	14
Obrázek 10	Hmotnostní zastoupení hlavních látek v PM _{2,5} [μg.m ⁻³]	17
Obrázek 11	Korelace výsledků laboratorního a aethalometrického stanovení forem uhlíku [ng.m ⁻³]	20
Obrázek 12	Korelace koncentrace organického a celkového uhlíku [ng.m ⁻³]	21
Obrázek 13	Korelace koncentrace elementárního a celkového uhlíku [ng.m ⁻³]	21
Obrázek 14	Korelace koncentrace uhlíkatých částic a B[a]P v chladné části roku [ng.m ⁻³]	22
Obrázek 15	Korelace koncentrace dusičnanů, síranů a amonných iontů [ng.m ⁻³].....	22
Obrázek 16	Korelace koncentrace K ⁺ a EC/OC [ng.m ⁻³].....	23
Obrázek 17	Korelace koncentrace K ⁺ , dusičnanů a amonných iontů [ng.m ⁻³]	24
Obrázek 18	Chemické profily faktorů identifikovaných s datovou sadou ED XRF.....	26
Obrázek 19	Časové řady faktorů identifikovaných s datovou sadou ED XRF.....	27
Obrázek 20	Absolutní podíly faktorů identifikovaných s datovou sadou ED XRF na celkové koncentraci PM _{2,5}	28
Obrázek 21	Relativní podíly faktorů identifikovaných s datovou sadou ED XRF na celkové koncentraci PM _{2,5}	28
Obrázek 22	Chemické profily faktorů identifikovaných s datovou sadou ICP-MS	29
Obrázek 23	Časové řady faktorů identifikovaných s datovou sadou ICP-MS.....	30
Obrázek 24	Absolutní podíly faktorů identifikovaných s datovou sadou ICP-MS na celkové koncentraci PM _{2,5}	31
Obrázek 25	Relativní podíly faktorů identifikovaných s datovou sadou ICP-MS na celkové koncentraci PM _{2,5}	31
Obrázek 26	Absolutní a relativní podíly faktorů identifikovaných s limitovanou datovou sadou na celkové koncentraci PM _{2,5}	32
Obrázek 27	Zpětné trajektorie pro 29. 11. 2019 a 9. 12. 2019.....	37
Obrázek 28	Zpětné trajektorie pro 20. 11. 2019 a 5. 12. 2019.....	38
Obrázek 29	Zpětné trajektorie pro 15. 11. 2019 a 17. 11. 2019.....	39
Obrázek 30	Zpětné trajektorie pro 24. 11. 2019 a 27. 11. 2019.....	39

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Základní statistiky vlhkosti a teploty v době měření	15
Tabulka 2	Naměřené 24hodinové koncentrace suspendovaných částic PM _{2,5} [μg.m ⁻³]....	16
Tabulka 3	Přehled naměřených koncentrací B[a]P a As [ng.m ⁻³]	17
Tabulka 4	Průměrné koncentrace BC naměřené při zimní kampani v lokalitě Švermov [ng.m ⁻³]	19
Tabulka 5	Průměrné koncentrace EC/OC naměřené při zimní kampani [ng.m ⁻³].....	19

Úvod

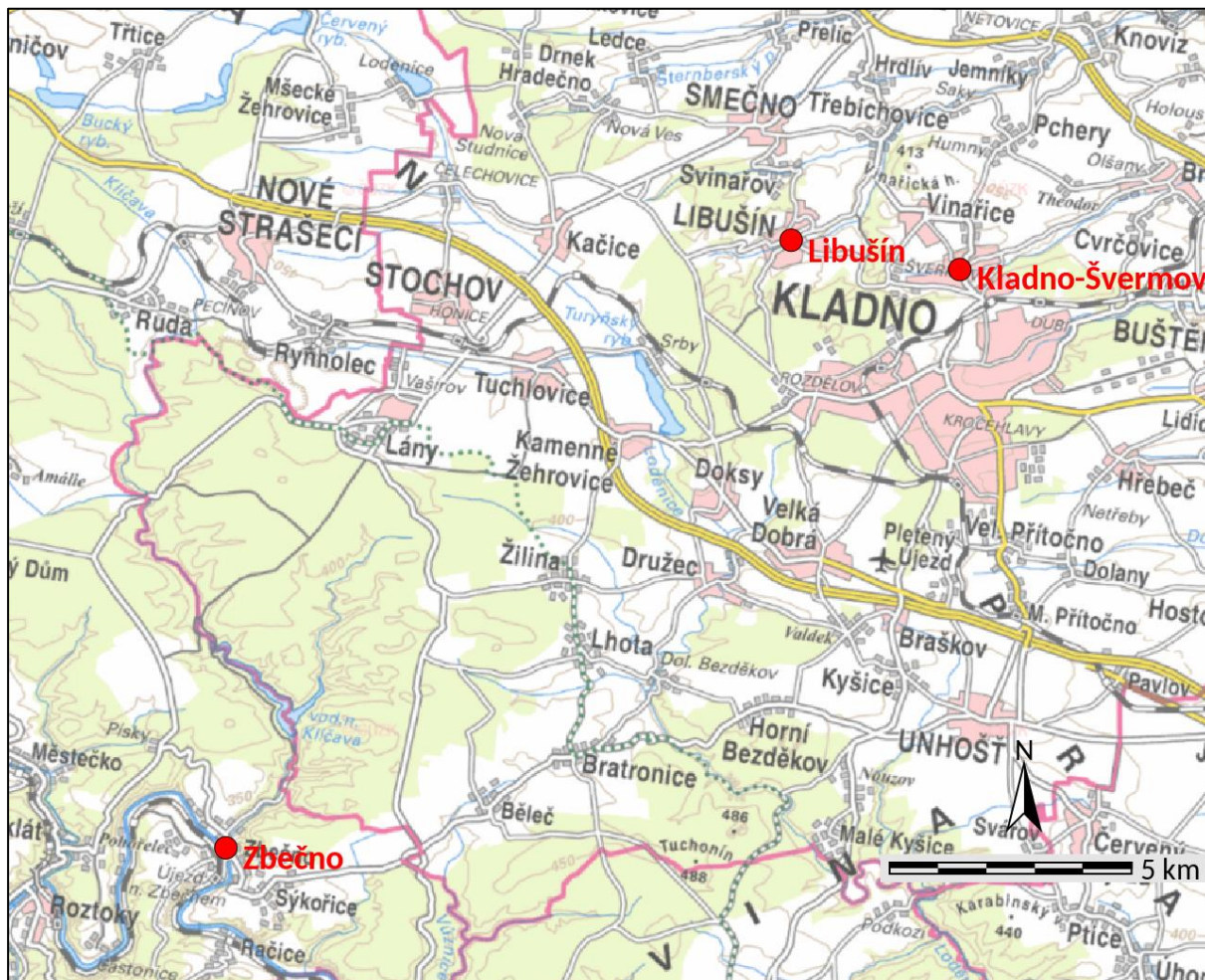
V rámci projektu „Měření a analýza znečištění ovzduší s důrazem na vyhodnocení podílu jednotlivých skupin zdrojů“ (TAČR TITSMZP704), který je finančně podporován Technologickou agenturou České republiky (č. smlouvy 2018007), je prováděna identifikace zdrojů znečišťování ovzduší pomocí receptorového modelu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

Hodnocená oblast a jednotlivé lokality byly zvoleny tak, aby se jejich charakter z hlediska imisního zatížení odlišoval od situace v první projektové oblasti, kterou bylo Trinecko. Jedná se o místa s předpokládaným významným vlivem individuálního vytápění domácností, který zde byl předběžně považován za nejvýznamnější faktor kvality ovzduší. Měřicími lokalitami byly Kladno-Švermov, Libušín a Zbečno. Jejich umístění znázorňuje Obrázek 1.



Obrázek 1 Umístění měřicích lokalit v projektové oblasti č. 2

Popis měřicí lokality Kladno-Švermov

Měřicí lokalita se nachází v centru městské části Kladno-Švermov na travnaté ploše uprostřed Havlíčkova náměstí, v bezprostředním sousedství stávající lokality imisního monitoringu SKLS Kladno-Švermov.

Charakteristika lokality:

- počet obyvatel: 4 854 (městská čtvrť Kladno-Švermov k roku 2011 dle <https://cs.wikipedia.org/wiki/Švermov>)

- souřadnice GPS: 50.1673964N, 14.1061517E
- umístění měřicí techniky na veřejném prostranství ve vlastnictví města
- připojení elektrické energie ze stávající stanice imisního monitoringu SKLS (provozuje ČHMÚ)
- zástavba je tvořena nízkopodlažními rodinnými domy
- vytápění: lokální, obec plynofikována
- doprava: výhradně silniční, nejbližší sčítaný úsek č. 1-1271 ve vzdálenosti cca 50 m, dle celostátního sčítání ŘSD 2016 cca 10 000 voz. /den
- průmyslové zdroje: průmyslová zóna Kladno-východ cca 1 km J až JV (nakládání se sypkými hmotami hutního a důlního původu, brownfield, hutní provozy); teplárna Kladno cca 2,1 km JV, výsypky po důlní činnosti cca 1,1 a 1,5 km SV, resp. SZ



Obrázek 2 Fotodokumentace měřicího místa Kladno-Švermov – pohled od SV



Obrázek 3 Fotodokumentace měřicího místa Kladno-Švermov – pohled od JV

Popis měřicí lokality Libušín

Měřicí lokalita se nachází v centru města Libušín, na travnaté ploše v sousedství parku na ulici Náměstí v bezprostřední blízkosti trafostanice ČEZ.

Charakteristika lokality:

- počet obyvatel: 3 394 (ČSÚ k 1. 1. 2020)
- souřadnice GPS: 50.1683689N, 14.0566514E
- umístění měřicí techniky na veřejném prostranství ve vlastnictví města
- připojení elektrické energie z budovy bývalé hasičské stanice ve vlastnictví města
- zástavba je tvořena nízkopodlažními rodinnými domy a několika bytovými domy do výšky max. 4 podlaží
- vytápění: lokální, obec plynofikována
- doprava: výhradně silniční, komunikace nejsou zařazeny do celostátního sčítání, odhad průměrné denní intenzity dopravy max. okolo 3000 voz. /den
- průmyslové zdroje: bývalý důl Schoeller cca 1,4 km JZZ (nakládání se sypkými hmotami, brownfield), rekultivační aktivity (manipulace se zeminami a sypkými hmotami) cca 900 m J a cca 900 m SV



Obrázek 4 Fotodokumentace měřicího místa Libušín – pohled od SV



Obrázek 5 Fotodokumentace měřicího místa Libušín – pohled od JZ

Popis měřicí lokality Zbečno

Měřicí lokalita se nachází v centru obce Zbečno, na travnaté ploše v areálu fary v sousedství kostela.

Charakteristika lokality:

- počet obyvatel: 559 (ČSÚ k 1. 1. 2020)
- souřadnice GPS: 50.0418222N, 13.9198722E
- umístění měřicí techniky na pozemku ve vlastnictví Římskokatolické farnosti Zbečno, s omezeným přístupem veřejnosti
- připojení elektrické energie z objektu fary
- zástavba je tvořena nízkopodlažními rodinnými domy
- vytápění: lokální, obec bez plynofikace
- doprava: výhradně silniční, nejbližší sčítaný úsek č. 1-2919 ve vzdálenosti cca 20 m, dle celostátního sčítání ŘSD 2016 cca 900 voz. /den
- průmyslové zdroje: úpravnické zařízení kamenolomu Sýkořice cca 850 m JJZ, skladování a manipulace s kamenivem cca 700 m JJZ



Obrázek 6 Fotodokumentace měřicího místa Zbečno – pohled od SZ



Obrázek 7 Fotodokumentace měřicího místa Zbečno – pohled od J

Rozsah a metodika prací

K získání analytického rozsahu potřebného pro navazující matematický model PMF byla každá měřicí lokalita osazena 5 ks sekvenčních automatických vzorkovačů fy Leckel. Tato sada vzorkovačů byla doplněna 1 ks manuálního vzorkovače stejné firmy k odběrům prашného aerosolu pro případnou analýzu skenovacími elektronovými mikroskopy. Ve všech případech se jednalo o dvanáctihodinové, na sebe bezprostředně navazující odběry, s výjimkou 6hodinových vzorků pro mikroskopovou analýzu, které byly rozloženy přibližně rovnoměrně v rámci měřeného období. Měření plynných znečišťujících látek v rozsahu NO, NO₂, NO_x, SO₂, CO, O₃ bylo prováděno kontinuálními analyzátory umístěnými v měřicích vozech. Na všech lokalitách byla po celou dobu měření sledována rychlost a směr větru.

Letní odběrová kampaň proběhla v období 28. 6. 2019 6:00 do 28. 7. 2019 18:00. Odběry v chladné části roku probíhaly od 14. 11. 2019 6:00 do 15. 12. 2019 18:00. Ve všech případech je čas uveden v UTC. Ačkoliv byla druhá odběrová kampaň provedena na přelomu podzimní a zimní sezóny, pro zjednodušení je toto měřicí období v následujícím textu označováno jako zimní, protože reprezentuje chladnou polovinu roku s intenzivním provozem zdrojů sloužících k individuálnímu vytápění.

Ojedinelé výpadky měření trvaly maximálně několik hodin, takže použitelné byly všechny na filtry odebírané vzorky. Z každé lokality bylo odebráno v letním období 61 a v zimním 63 vzorků aerosolů, celkem tedy 124 vzorků.

Laboratorní analýzy odebraných vzorků prašného aerosolu byly provedeny v rozsahu:

- gravimetrické měření suspendovaných částic PM_{2,5}
- OC, EC
- anionty: SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺
- PAH: 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)¹
- 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

Úspěšně byly laboratorně zpracovány všechny odebrané vzorky s výjimkou analýzy EC a OC z lokality Švermov ze dne 7. 12. 2019 6:00 – 18:00.

Z důvodu přetrvávajících kapacitních problémů na straně externích laboratoří nebylo možno při vyhodnocení použít výsledky analýzy odebraných vzorků levoglucosanu. V současnosti proto intenzivně probíhá testování metody stanovení této látky v laboratoři ČHMÚ, aby mohly být k analýze archivovaných vzorků v další fázi projektu použity interní kapacity.

Na lokalitě Švermov byl po dobu zimní měřicí kampaně testován Aethalometer® AE33 fy Aerosol d.o.o., Ljubljana, Slovinsko, sloužící k měření koncentrace černého uhlíku. 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 statisticky zpracována a zahrnuta do navazujícího hodnocení.

Co se týče metodiky identifikace zdrojů, na všech 3 lokalitách byl zpracován samostatný model PMF s využitím prvkové analýzy ICP-MS a ED XRF pro detailní ověření použitelnosti ED XRF, jakožto alternativy k ICP-MS. V této souvislosti byl posouzen také vliv kalibrace ED XRF pomocí nových standardů, které ve spojení s předchozími umožnily dvoubodovou kalibraci metody. Pro model PMF byla následně použita nově kalibrovaná data.

Nově byla v PMF modelu použita datová sada z aethalometrického měření a byl předběžně vyhodnocen jeho přínos pro identifikaci zdrojů, a také možnost využít tuto metodu spolu s ED XRF jako finančně méně náročnou alternativu k laboratorním analýzám PAH a EC/OC.

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 EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0, Fundamentals and User Guide (04/2014) a ze zkušeností popsanych ve veřejně dostupných odborných studiích. Po odladění vstupních souborů byly testovány různé modelové varianty řešení, zejména s ohledem na shodu

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

predikovaných a naměřených hodnot a vzájemnou statistickou nezávislost vyhodnocených faktorů.

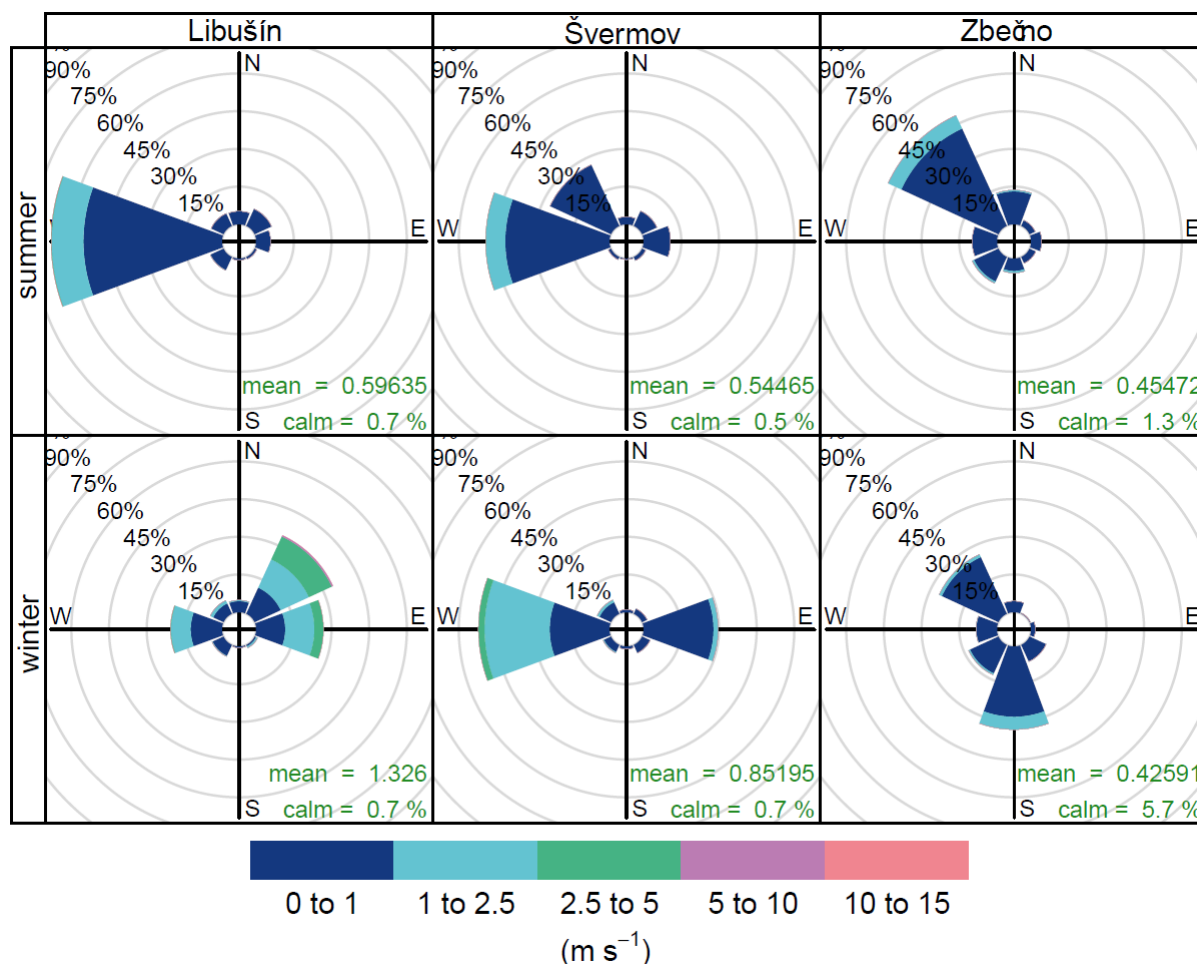
Paralelní vzorkování a laboratorní stanovení prvků pomocí metod ED XRF a ICP-MS umožnilo provést paralelní modelování všech tří měřicích lokalit pomocí PMF a výsledná modelová řešení následně porovnat.

Pro interpretaci modelu PMF byly poprvé v rámci projektu využity zpětné trajektorie vyhodnocené modelem HYSPLIT.

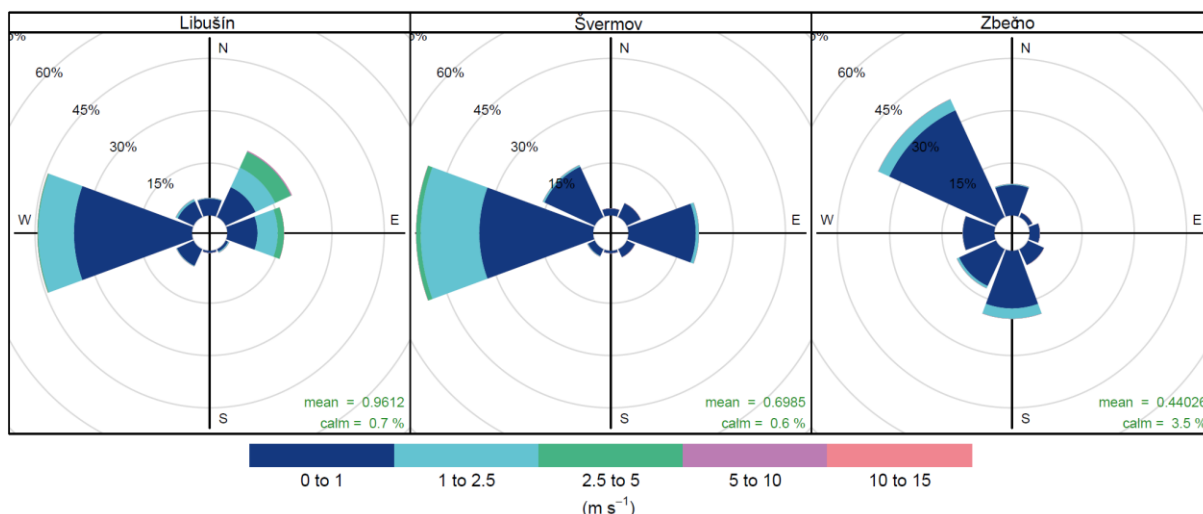
Výsledky provedených prací

Meteorologické parametry

Větrné růžice zkonstruované na základě naměřených průměrných hodinových hodnot znázorňuje Obrázek 8.



Obrázek 8 Větrné růžice reprezentující samostatně letní a zimní část odběrové kampaně



Obrázek 9 Celková větrná růžice reprezentující období měřicích kampaní

Celkově největrnější lokalitou byl za dobu měření Libušín, naopak nejnižší rychlosti větru byly měřeny ve Zbečně. Zbečno se také vyznačovalo výrazně nejčtenějším výskytem bezvětrí, zejména v období zimní měřicí kampaně. Podstatně vyšší rychlosti proudění oproti létu nastaly v průběhu zimní měřicí kampaně, a to zejména v Libušíně. Údolní lokalita Zbečno naopak vykazovala z hlediska rychlosti proudění malý sezónní rozdíl.

Nejméně proměnlivý směr a rychlost větru z měřicích lokalit byl zjištěn ve Švermově, v Libušíně byly tyto parametry mezi měřicími kampaněmi naopak zcela odlišné. V letním období převažovaly na hodnocených lokalitách výrazněji západní a severozápadní směry proudění oproti chladné části roku, kdy v Libušíně a Švermově vzrostla četnost východních a severovýchodních směrů a ve Zbečně četnost jižních směrů proudění. Celkově nejčtenější bylo ve Švermově a Libušíně západní proudění (45 až 50 % hodnoceného období), zatímco ve Zbečně převládal severozápadní směr (mírně přes 30 %). Druhým nejčtenějším směrem byl ve Švermově a Libušíně východní až severovýchodní směr větru (v součtu 20 až 35 % měřeného období), ve Zbečně směr jižní (okolo 20 % případů).

Na základě vyhodnocení směrů a rychlostí větru lze konstatovat, že nejpříznivější podmínky pro rozptyl znečištění panovaly v době měření v Libušíně, zejména vlivem větrného počasí v chladné části roku. Lepší rozptyl znečištění v chladné části roku oproti létu lze na základě naměřené rychlosti větru odhadovat i v lokalitě Švermov. Naopak nejpomalejší rozptyl znečištění lze za dobu měření očekávat ve Zbečně, a to v průběhu obou hodnocených sezón.

Po dobu odběrových kampaní byly měřeny také teplota ve 2 m nad zemí a vlhkost vzduchu. Následující tabulka 1 shrnuje naměřené hodinové hodnoty.

Tabulka 1 Základní statistiky vlhkosti a teploty v době měření

Minimální hodnoty			
Období	Lokalita	h [%]	T [°C]
Léto	Libušín	17	8.5
	Švermov	15	10.1
	Zbečno	18	5.9
Zima	Libušín	53	-5.3
	Švermov	53	-2.5
	Zbečno	56	-6.4
Maximální hodnoty			
Období	Lokalita	h [%]	T [°C]
Léto	Libušín	94	37.6
	Švermov	93	39.1
	Zbečno	98	38.1
Zima	Libušín	98	13.1
	Švermov	96	14.4
	Zbečno	99	14.5
Aritmetický průměr			
Období	Lokalita	h [%]	T [°C]
Léto	Libušín	56	20.9
	Švermov	54	22.7
	Zbečno	63	20.5
Zima	Libušín	84	4.1
	Švermov	82	5.6
	Zbečno	86	4.5

Nejvyšší průměrné, minimální i maximální teploty vzduchu byly naměřeny v lokalitě Švermov, naopak nejnižší v lokalitě Zbečno. Z hlediska vlhkosti vzduchu bylo pořadí lokalit opačné. Teplotní rozdíl mezi měřícími kampaněmi je výrazný. Zimní část odpovídala obvyklým podmínkám v topné sezóně a byla proto reprezentativní pro hodnocení vlivu provozu zdrojů znečišťování vázaných na topné období.

Statistické zhodnocení analytických dat

Podobně jako u předchozích datových sad získaných projektovými kampaněmi měly naměřené koncentrace většiny sledovaných látek přibližně lognormální rozdělení, které je u řady látek narušeno zvýšenou četností v oblasti vysokých hodnot vlivem občasného výskytu koncentračních špiček.

Statistická analýza byla provedena přímo v software PMF v. 5.0. Pouze v případě ED XRF a aethalometrického měření byla provedena předchozí hlubší analýza naměřených dat.

Koncentrace a hmotnostní složení aerosolu PM_{2,5}

Naměřené 12hodinové koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5} byly agregovány na dobu 24 hodin, aby byly lépe srovnatelné s obvykle sledovanými průměrnými denními hodnotami PM₁₀. Přehled takto vypočtených hodnot je obsahem tabulky 2.

Tabulka 2 Naměřené 24hodinové koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5} [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

Období	Lokalita	Minimum	Maximum	Arit. průměr
Léto	Libušín	7.0	16.0	11.4
	Švermov	7.0	20.7	12.5
	Zbečno	6.7	16.8	11.9
Zima	Libušín	<3.2*	63.2	22.1
	Švermov	6.5	59.8	25.2
	Zbečno	5.3	45.5	22.6
Celkově	Libušín	<3.2*	63.2	16.9
	Švermov	6.5	59.8	18.9
	Zbečno	5.3	45.5	17.3

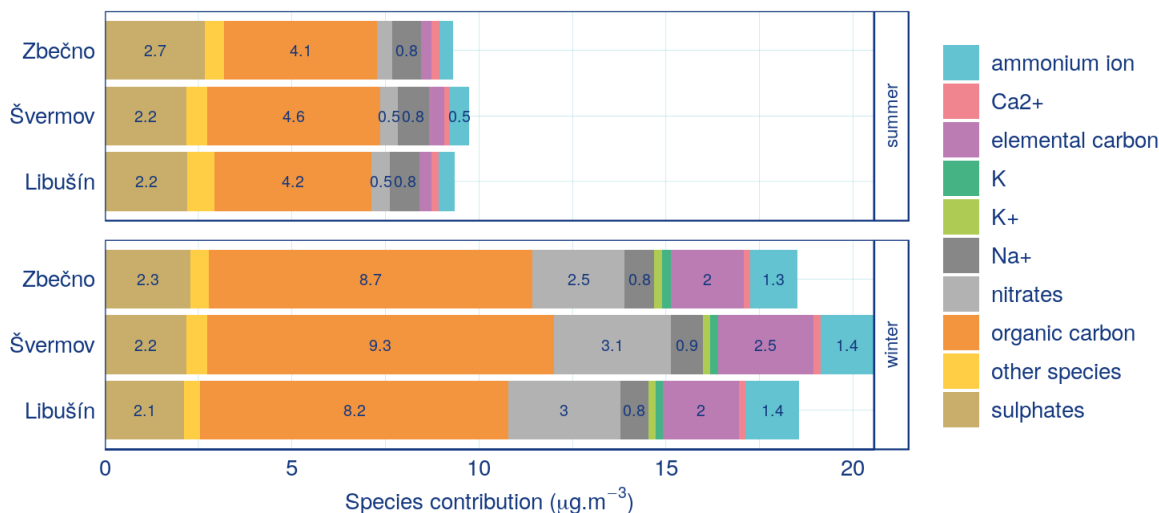
* hodnota pod mezí detekce gravimetrického stanovení

Rozdíly koncentrací 24hodinových koncentrací suspendovaných částic PM_{2,5} mezi hodnocenými lokalitami jsou relativně malé. V průměru o cca 10 % vyšší znečištění oproti ostatním měřicím místům bylo zjištěno v Kladně-Švermov, přičemž větší rozdíl zde byl naměřen v zimním období. Celková úroveň koncentrace za obě měřicí kampaně je o cca 15 až 20 % nižší než hodnota 20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, která odpovídá imisnímu limitu stanovenému pro průměrnou roční koncentraci. Lze odhadovat, že imisní limit pro PM_{2,5} na hodnocených lokalitách byl v roce 2019 splněn, ale odstup od hodnoty limitu je natolik malý, že v rozptylově nepříznivých letech může docházet k jeho překročení.

V chladné části roku byly na všech hodnocených lokalitách zjištěny přibližně dvojnásobné koncentrace této znečišťující látky oproti letnímu období, a to i přes příznivější rozptylové podmínky (viz podkapitola „Meteorologické parametry“).

Součet hmotnosti všech látek odebraných na filtry v průběhu měřicích kampaní tvořil cca 80 % naměřené hmotnostní koncentrace PM_{2,5}. Rozdíly ve skladbě hmotnostně nejvýznamnějších látek byly na všech 3 sledovaných lokalitách poměrně malé. Většinu hmoty suspendovaných částic PM_{2,5} tvořil organický a elementární uhlík. Relativní podíl elementárního uhlíku byl v chladné části roku několikanásobně vyšší, podíl organického uhlíku přibližně dvakrát vyšší. Zdrojem elementárního uhlíku je podle výsledků modelu PMF především vytápění domácností. Stejná skutečnost byla zjištěna v rámci projektu v oblasti 1 (Třinecko). Druhou nejvíce

zastoupenou skupinou látek byly dusičnany a sírany, převážně sekundárního původu, zejména dusičnan a síran amonný. Je zřejmé rozdílné poměrné zastoupení síranů a dusičnanů mezi letní a zimní částí měření. V chladné části roku výrazně narostl absolutní i relativní podíl dusičnanů, zatímco podíl síranů zůstal v absolutní úrovni přibližně stejný jako v létě. Grafické znázornění podílů hlavních látek zjištěných v suspendovaných částicích PM_{2,5} je obsahem obrázku 10.



Obrázek 10 Hmotnostní zastoupení hlavních látek v PM_{2,5} [µg.m⁻³]

Koncentrace B[a]P a As

Vzhledem k tomu, že Kladensko je nadprůměrně zatíženo arsenem a benzo[a]pyrenem, bylo jako součást přípravy dat pro modelování pro celkovou představu o vzájemných vazbách provedeno jednoduché statistické zhodnocení imisních koncentrací těchto látek za dobu měření (Tabulka 3).

Tabulka 3 Přehled naměřených koncentrací B[a]P a As [ng.m⁻³]

Období	Lokalita	As (ICP-MS)	B[a]P
Léto	Libušín	0.29	0.022
	Švermov	0.29	0.032
	Zbečno	0.51	0.041
Zima	Libušín	6.1	3.7
	Švermov	5.8	4.8
	Zbečno	10.5	3.0
Celkově	Libušín	3.2	1.9
	Švermov	3.1	2.5
	Zbečno	5.6	1.6

V případě benzo[a]pyrenu i arsenu je na všech lokalitách patrný řádový nárůst imisních koncentrací v zimě oproti letnímu období, což indikuje jejich vazbu na individuální vytápění domácností. Průměrná koncentrace benzo[a]pyrenu na všech lokalitách překročila hodnotu ročního imisního limitu (1 ng.m⁻³). Nejvyšší koncentrace byly naměřeny v lokalitě Švermov, naopak nejnižší ve Zbečně. Průměrná koncentrace v lokalitě Švermov za dobu měření dosáhla

2,5 ng.m⁻³, přičemž celoročním měřením v rámci Státní sítě imisního monitoringu zde byla v roce 2019 naměřena koncentrace 3,2 ng.m⁻³. Podrobnějším rozbohem bylo zjištěno, že zimní kampaň realizovaná v listopadu a prosinci 2019 se vyznačovala průměrnou koncentrací benzo[a]pyrenu ve Švermově ve výši 4,8 ng.m⁻³, přičemž za tyto dva měsíce byla prostřednictvím Státní sítě imisního monitoringu na této lokalitě stanovena koncentrace 4,9 ng.m⁻³. Shoda projektového měření a měření v rámci imisního monitoringu za srovnatelné období je tedy velmi dobrá. Vyšší průměrnou roční koncentraci naměřenou v imisním monitoringu oproti vypočítanému celkovému průměru za období obou projektových kampaní proto přisuzujeme vysokým koncentracím na počátku roku 2019 (průměrně 6,85 ng.m⁻³ za leden a únor), které nebyly projektovým měřením časově pokryty.

V souvislosti s uvedeným hodnocením je nutno upozornit na chybné hodnocení koncentrací benzo[a]pyrenu v předběžné zprávě ze zimní měřicí kampaně za 9. kvartál projektu (vypracována v červnu 2020), kde došlo k záměně benzo[a]pyrenu za jiný kongener PAH. Na tomto základě bylo nesprávně vyvozováno, že v posuzované oblasti nedochází k překračování imisního limitu B[a]P.

Průměrná naměřená koncentrace arsenu dosahovala výrazně nejvyšší hodnoty v lokalitě Zbečno a blížila se zde hodnotě imisního limitu stanoveného pro průměrnou roční koncentraci (6 ng.m⁻³). Ve Švermově a Libušíně byly naměřeny téměř o polovinu nižší koncentrace. Průměrná koncentrace arsenu za dobu projektového měření v lokalitě Švermov dosáhla 3,1 ng.m⁻³, zatímco celoročním imisním monitoringem v tomto místě byla naměřena koncentrace 3,3 ng.m⁻³. Tato nevýznamná odchylka se nachází v rámci obvyklé nejistoty odběru a laboratorních analýz, a to přesto, že v rámci Státní sítě imisního monitoringu je pro stanovení těžkých kovů vzorkována frakce PM₁₀, zatímco v případě projektové kampaně frakce PM_{2,5}. Poměrně velký rozdíl koncentrace arsenu ve Zbečně oproti Libušínu a Švermovu svědčí o výrazně proměnlivých emisích této znečišťující látky v posuzované oblasti. Nižší prezentované výsledky PMF ukazují na příčinu těchto rozdílů ve skladbě paliv pro vytápění domácností.

Podle očekávání existuje zřetelná vzájemná lineární souvislost těchto látek mezi sebou a s koncentracemi PM_{2,5}. Podrobnější popis těchto vazeb včetně grafických výstupů byl předmětem dílčí zprávy za 9. kvartál projektu, v předkládané zprávě je proto uvedeno pouze jejich shrnutí. Při hodnocení zimního období, jehož koncentrace tvoří rozhodující příspěvek k průměrné roční koncentraci PM_{2,5}, arsenu i benzo[a]pyrenu, je v Libušíně a Švermově vzájemná lineární závislost As a B[a]P na PM_{2,5} podobná, přičemž Zbečno vykazuje při stejné úrovni PM_{2,5} vyšší koncentrace As. V případě B[a]P je situace opačná. To naznačuje pravděpodobně lokálně vyšší emise arsenu ve Zbečně oproti ostatním sledovaným lokalitám.

Pozoruhodný je také vztah B[a]P, As a draslíku. Ve Zbečně je s rostoucí koncentrací B[a]P nárůst koncentrace draslíku strmější, což by mohlo naznačovat vyšší zastoupení dřeva v palivovém mixu individuálního vytápění. S rostoucí koncentrací As roste ale koncentrace K naopak ve Zbečně méně strmě než v ostatních lokalitách, takže arsen a draslík ve Zbečně pravděpodobně nemají původ ve stejném typu zdroje. Protože hlavním zdrojem draslíku v zimním období v malých obcích je spalování biomasy, je předpokládaným hlavním zdrojem arsenu ve Zbečně specifický druh uhlí pro individuální vytápění domácností (jako jediná z hodnocených obcí není Zbečno plynofikováno). Tato hypotéza je podpořena i výsledky modelu PMF, ze kterých také vyplývá, že palivo používané ve větší míře ve Zbečně se pravděpodobně vyznačuje současně i vysokým obsahem síry.

Koncentrace černého, elementárního a organického uhlíku

V průběhu zimní odběrové kampaně bylo souběžně s odběry vzorků na filtry a měřením plynných látek prováděno experimentální měření černého uhlíku aethalometrem v sedmi spektrálních pásmech. Měření se ukázalo jako provozně spolehlivé a zpracovaná data odpovídají očekávanému průběhu koncentrací měřených jednotlivými kanály. Bylo prakticky ověřeno, že rozdíl koncentrace mezi těmito kanály (tzv. delta C) způsobený vyšší absorpcí záření v ultrafialovém pásmu vlivem přítomnosti uhlovodíků (tvoří tzv. „brown carbon“) oproti absorpci čistě černého uhlíku, která je stejná ve všech pásmech, je zřetelný a potenciálně využitelný pro identifikaci zdrojů. Nejistota měření se v souladu s parametry udávanými výrobcem jeví jako poměrně malá, s potenciálem snadné kalibrace. Jedná se o předběžné výsledky, analyzátor je nutno dále testovat v různých podmínkách, což bude provedeno v rámci identifikace zdrojů v oblasti 3. Další informace o tomto druhu měření byly uvedeny v předběžné zprávě za 9. kvartál projektu (červen 2020). Přehled agregovaných hodnot za období zimní měřicí kampaně je obsahem následující tabulky (Tabulka 4).

Tabulka 4 Průměrné koncentrace BC naměřené při zimní kampani v lokalitě Švermov [ng.m⁻³]

Spektrální kanál	Vlnová délka [nm]	BC [ng.m ⁻³]	
		Den (6:00–18:00)	Noc (18:00–6:00)
BC1	370	6240	6290
BC2	470	5230	4842
BC3	520	4737	4245
BC4	590	4477	3936
BC5	660	4092	3548
BC6	880	3710	3135
BC7	950	3675	3083
ΔC (BC1 – BC7)	-	2565	3207

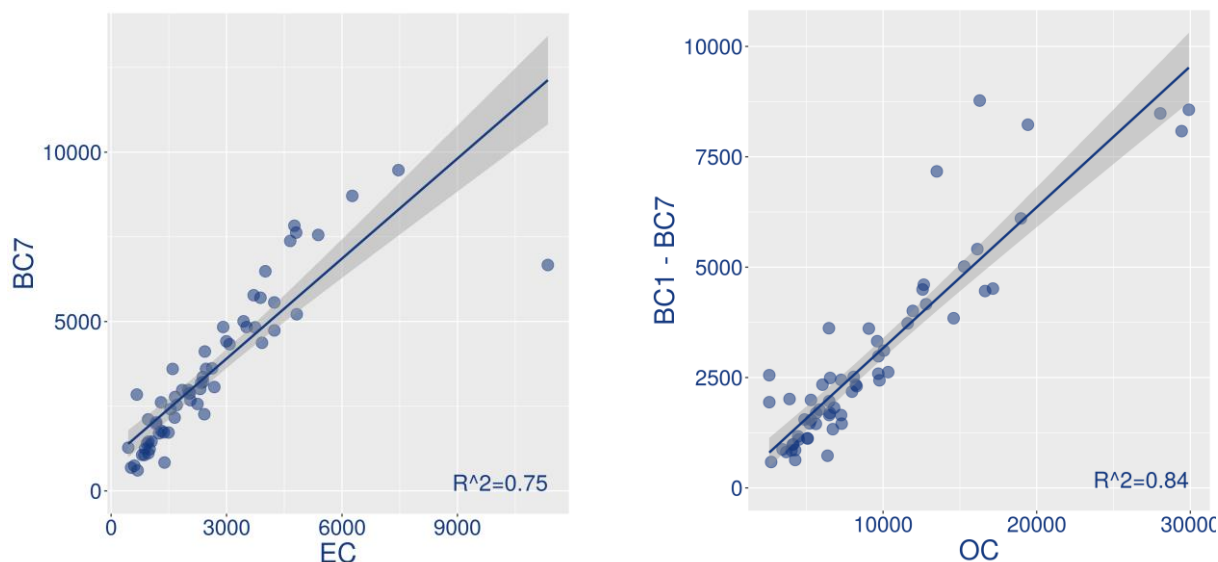
Z tabulky je zřejmé, že měření v dlouhovlnné části spektra ukazuje nižší hodnoty v noci, zatímco rozdíl měření na nejdelší a nejkratší vlnové délce naopak. Tato skutečnost indikuje vyšší koncentrace elementárního uhlíku v denní době a naopak nárůst koncentrace organického uhlíku v noci.

Podobná závislost byla ve Švermově a Libušíně zjištěna stanovením EC/OC z filtrů (Tabulka 5), což dokládá použitelnost informací z jednotlivých spektrálních kanálů aethalometru a soulad s laboratorním stanovením těchto forem uhlíku. Ve Zbečně byly v noci oproti denní době vyšší i koncentrace EC. Uvedená zjištění indikují vyšší vliv silniční dopravy ve Švermově a Libušíně, která se vyznačuje emisemi s vyšším poměrem EC/OC než vytápění domácností pevnými palivy, které bylo dominantním zdrojem uhlíku ve Zbečně.

Tabulka 5 Průměrné koncentrace EC/OC naměřené při zimní kampani [ng.m⁻³]

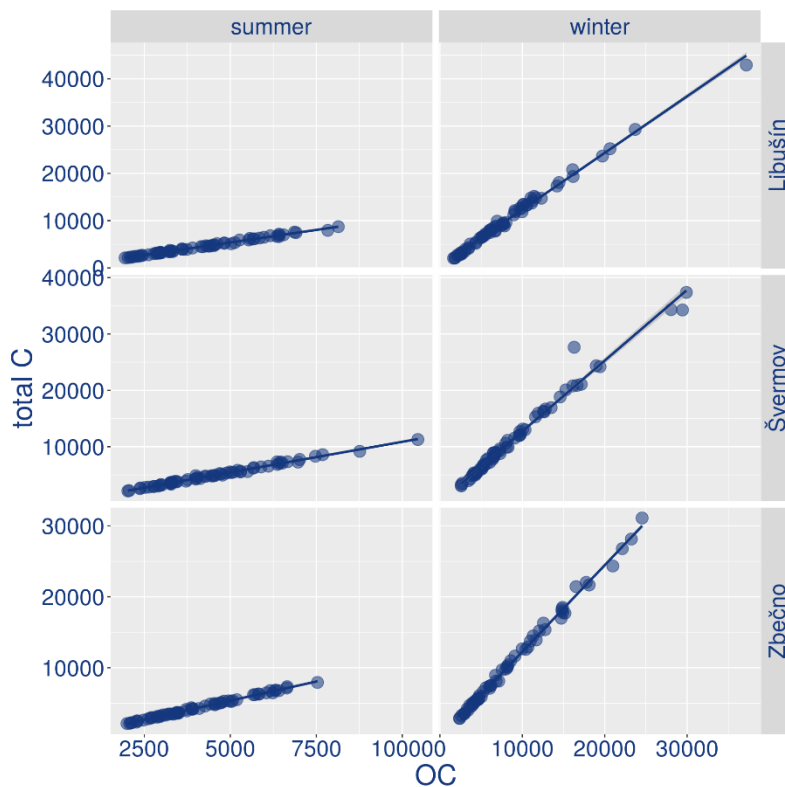
Lokalita	OC [ng.m ⁻³]		EC [ng.m ⁻³]	
	Den (6:00–18:00)	Noc (18:00–6:00)	Den (6:00–18:00)	Noc (18:00–6:00)
Libušín	7672	8824	2125	1904
Švermov	8712	9835	2578	2500
Zbečno	7416	9944	1794	2130

Aethalometrické měření se ukazuje jako použitelná metoda k identifikaci zdrojů znečišťování ovzduší, která může být méně přesnou, ale levnější variantou ke konvenčnímu laboratornímu stanovení EC/OC. Vzhledem k vysokému podílu EC/OC v suspendovaných částicích PM_{2.5} by ale v případě jejího využití ke kvantifikaci podílů zdrojů na celkovém znečištění byla nezbytná kalibrace aethalometrických údajů k laboratorním koncentracím EC/OC. Použitelnost této metody bude dále testována v následujících fázích projektu.

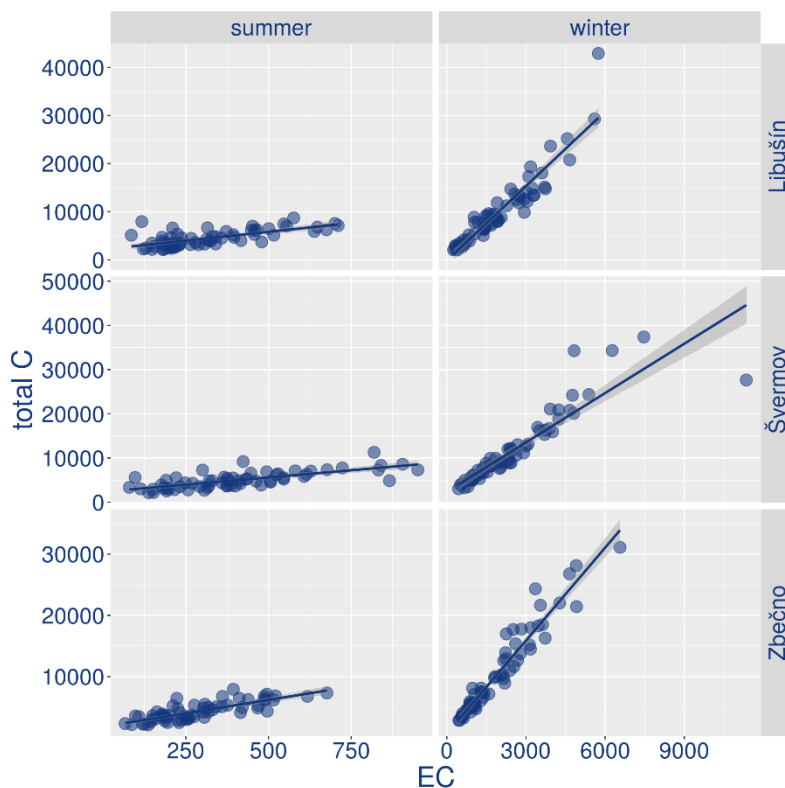


Obrázek 11 Korelace výsledků laboratorního a aethalometrického stanovení forem uhlíku [ng.m⁻³]

Z laboratorně stanovených koncentrací jednoznačně vyplývá, že na celkovém množství uhlíkatých částic měl za dobu měřicích kampaní na všech hodnocených lokalitách rozhodující podíl organický uhlík. Koncentrace elementárního uhlíku byly několikanásobně nižší a s nižší korelací s koncentrací celkového uhlíku (viz Obrázek 12 a Obrázek 13). Je také jasně patrný původ hlavní části uhlíkatých částic v chladné části roku, bez zřetelných odlišností mezi lokalitami. To ukazuje na hlavní zdroj uhlíku ve zdrojích sloužících k individuálnímu vytápění domácností. Vliv automobilové dopravy, jakožto dalšího potenciálně významného zdroje uhlíku, byl ve srovnání s vytápěním nevýznamný (nezřetelný rozdíl mezi Švermovem a Zbečnem, které je dopravou podstatně méně zatíženo, se projevil pouze v případě elementárního uhlíku a pouze v letním období).

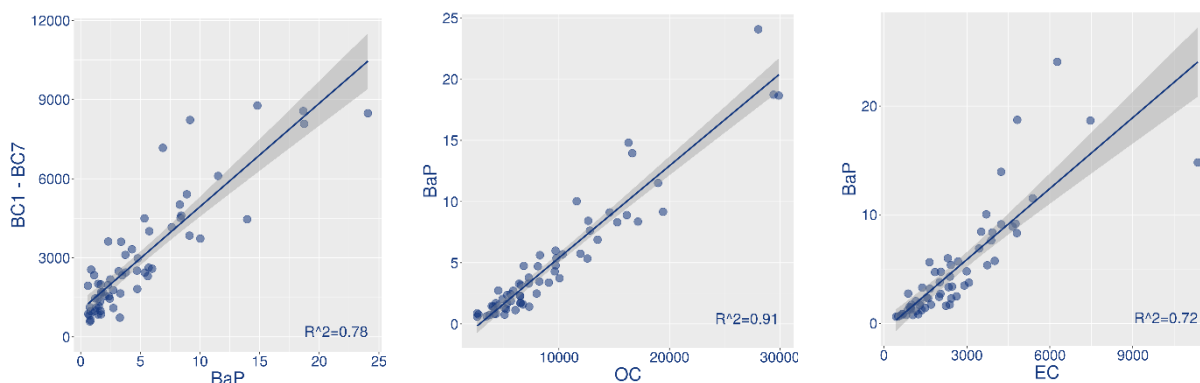


Obrázek 12 Korelace koncentrace organického a celkového uhlíku [ng.m^{-3}]



Obrázek 13 Korelace koncentrace elementárního a celkového uhlíku [ng.m^{-3}]

Dominantní vazbu uhlikatých částic, zejména organického uhlíku, na vytápění domácností lze doložit také silnou korelací s koncentracemi PAH, které v hodnocené oblasti pocházejí téměř výhradně z vytápění (Obrázek 14).

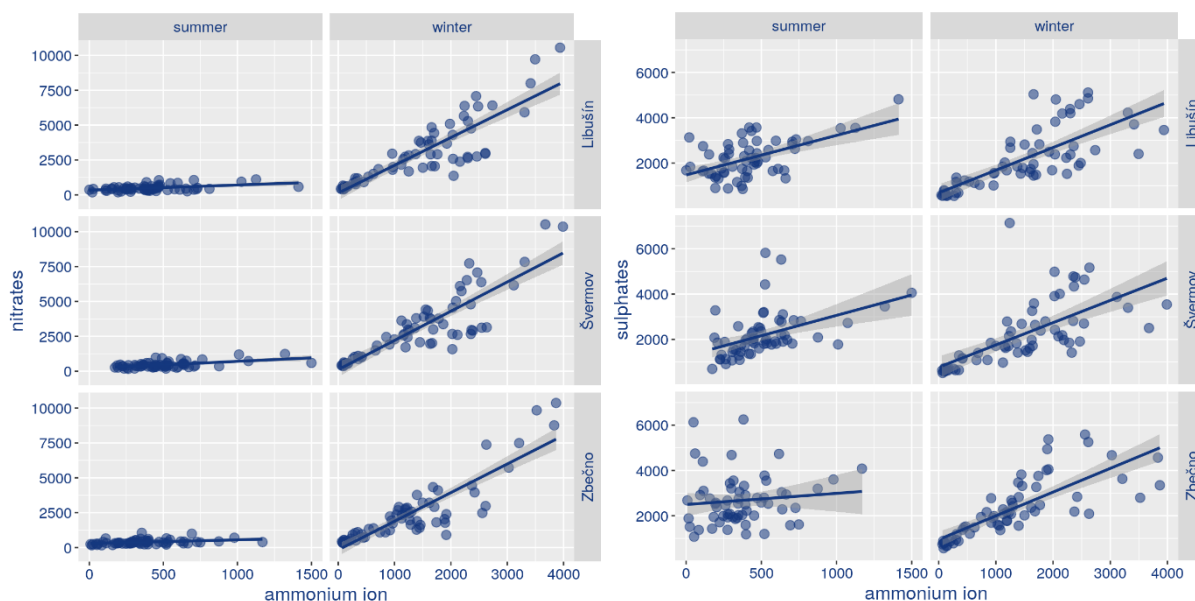


Obrázek 14 Korelace koncentrace uhlikatých částic a B[a]P v chladné části roku [$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$]

Vzhledem k velmi významné vzájemné korelaci všech sledovaných zástupců PAH byly korelační analýzy provedeny pouze pro B[a]P. U ostatních kongenerů lze očekávat obdobné vztahy.

Korelace hmotnostně významných iontů

Protože ionty tvoří významnou část hmoty částic frakce $\text{PM}_{2,5}$, byla pozornost zaměřena také na vzájemné vazby těchto analytů. Prezentovány jsou zde pouze ionty, u nichž byly zjištěny zřetelné vzájemné lineární závislosti. Příkladem jsou oba hmotnostně nejvýznamnější anionty tvořící obvykle sekundární anorganický aerosol, tj. dusičnany a sírany. Přímá úměra jejich koncentrace ke koncentraci amonného iontu dokládá jejich významný výskyt ve formě dusičnanu a síranu amonného (Obrázek 15).

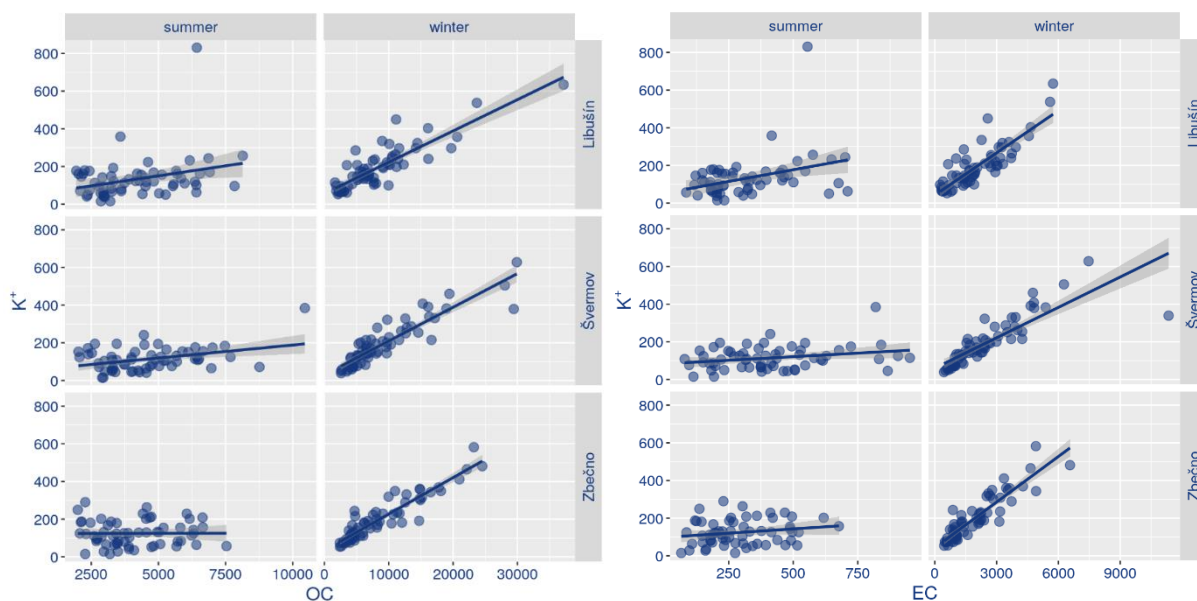


Obrázek 15 Korelace koncentrace dusičnanů, síranů a amonných iontů [$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$]

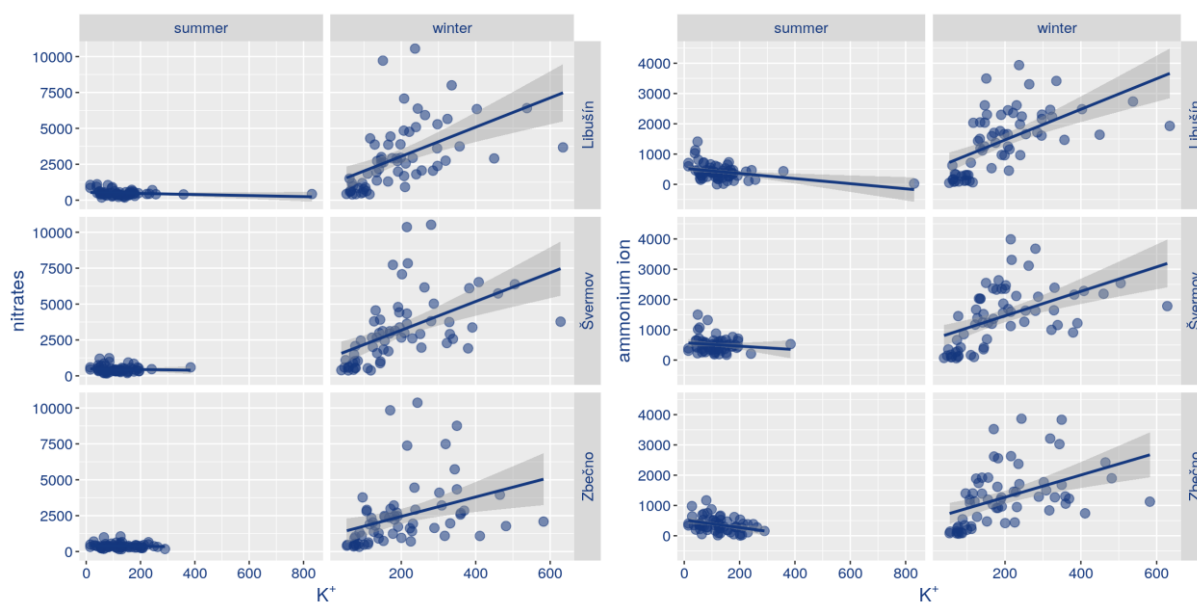
Z uvedených grafů je zřetelně viditelná několikanásobně až o řád vyšší koncentrace dusičnanů v průběhu zimní odběrové kampaně, pravděpodobně vlivem nižších teplot, které podporují vznik dusičnanu amonného, a vyšších emisí. Je zřejmá také výrazně vyšší směrnice regresní přímky amonných iontů a dusičnanů v zimě. To indikuje, že v zimním období se vyskytovala většina dusičnanů právě ve formě dusičnanu amonného, zatímco v létě bylo vyšší poměrné zastoupení jiných dusičnanů.

Koncentrace síranů naproti tomu vykazovaly v teplé i chladné části roku podobnou úroveň a pouze mírně strmější závislost na koncentraci amonných iontů. Letní korelace sulfátů a amonných iontů je oproti ostatním dvěma lokalitám nejslabší ve Zbečně, což nasvědčuje hypotéze, že formaci sekundárního síranu amonného v létě podporovala automobilová doprava, zatímco v zimě, kdy byly zjištěny podobně strmé závislosti na všech lokalitách, mají na vznik této sloučeniny hlavní vliv jiné zdroje, pravděpodobně včetně vytápění domácností.

Z dalších iontů byly zjištěny významné lineární závislosti pouze v případě draslíku v zimním období, což souvisí nejspíše s jeho dominantním původem v zimě ve vytápění domácností. Je zřetelná přímá úměra mezi koncentrací K^+ iontů s EC/OC (Obrázek 16), a také s amonnými ionty a dusičnany (Obrázek 17), tedy s látkami s výrazně vyššími zimními koncentracemi, které v této části roku pocházejí většinou pravděpodobně z individuálního vytápění pevnými palivy.



Obrázek 16 Korelace koncentrace K^+ a EC/OC [$ng.m^{-3}$]



Obrázek 17 Korelace koncentrace K^+ , dusičnanů a amonných iontů [$ng \cdot m^{-3}$]

Lineární korelace ostatních iontů s dalšími analyty nebyly statisticky významné, což ukazuje na jejich komplexní původ a jejich odlišné chování při různých meteorologických podmínkách.

Výsledky modelu PMF

Příprava dat pro model PMF (zpracování hodnot pod mezí detekce a určení nejistot) byla provedena striktně podle postupů uvedených v manuálu U. S. EPA EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0, Fundamentals and User Guide (04/2014).

Analýzou dat po sloučení letní a zimní části kampaně byly zjištěny nepravděpodobné letní koncentrace kationtů, zejména Ca^{2+} a Mg^{2+} . Tato data ze všech hodnocených lokalit ukazují na pravděpodobnou systematickou chybu při laboratorních analýzách. Podrobněji je tato záležitost diskutována v kapitole „Nedostatky a neurčitosti hodnocení“.

Pomocí modelu PMF bylo možno v jednotlivých sezónách i při souhrnném modelování obou odběrových kampaní identifikovat 6 až 9 stabilních faktorů, které byly reálně interpretovatelné. Na základě matematických testů stability řešení doporučených výše uvedeným manuálem a s přihlédnutím k jednoznačnosti, a tedy spolehlivosti interpretace chemických profilů bylo nakonec finální řešení odladěno s 8 identifikovanými faktory.

Vypracována byla tato samostatná modelová řešení:

- Model lokalit Švermov, Libušín a Zbečno s kompletním analytickým rozsahem s prvkovou analýzou pomocí ED XRF (souhrnný model za letní i zimní kampaň).
- Model lokalit Švermov, Libušín a Zbečno s kompletním analytickým rozsahem s prvkovou analýzou pomocí ICP-MS (souhrnný model za letní i zimní kampaň).
- Přibližný model lokality Švermov (model za zimní kampaň s omezeným analytickým rozsahem - prvková analýza pomocí ED XRF, ionty a BC z aethalometrického měření).

Kromě údajů o koncentraci prašného aerosolu zachyceného odběrem na filtry byly v PMF modelu využity také naměřené koncentrace plynných látek, které se osvědčily pro rozlišení některých typů zdrojů. Poměr NO a NO₂ se ukázal jako vhodný indikátor automobilové dopravy, která je jinak často obtížně identifikovatelná, protože sekvence typických dopravních diagnostických prvků v identifikovaných chemických profilech lze v některých případech zaměnit s individuálním vytápěním domácností pevnými palivy (Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Cr, Pb) nebo s resuspenzí částic vlivem větru (Ba, Ti, Fe, Mn, Sr, Ca, K). Obdobně SO₂ bylo možno využít jako podpurný faktor pro posouzení vlivu pevného paliva pro vytápění domácností (vysoko sirnaté uhlí versus biomasa nebo jiné, z hlediska koncentrace těžkých kovů a síry kvalitnější palivo) a u letních vzorků jako indikátor průmyslového spalování uhlí. Protože ve skutečnosti plynné polutanty k hmotě PM nepřispívají, jejich vysoké koncentrace ve faktorovém profilu zkreslují modelově vypočtený hmotnostní podíl faktoru na celkové koncentraci PM_{2,5}. Po ověření, že konkrétní modelový fingerprint obsahuje relativně vysoký faktorový podíl příslušné plynné látky, a že předpokládaná interpretace je tedy správná, byly použity dva způsoby, jakými byla tato chyba potlačena:

- plynné polutanty byly z datové sady vyloučeny a finální modelové řešení bylo odladěno bez nich,
- koncentrace plynných polutantů byly tisíckrát sníženy a byly ponechány v modelovém datasetu, čímž byl na zanedbatelnou úroveň snížen jejich vliv na hmotnostní podíly jednotlivých faktorů, ale přitom mohly být s výhodou využity při interpretaci PMF faktorů.

Druhý popisovaný způsob se ukázal jako interpretačně výhodnější.

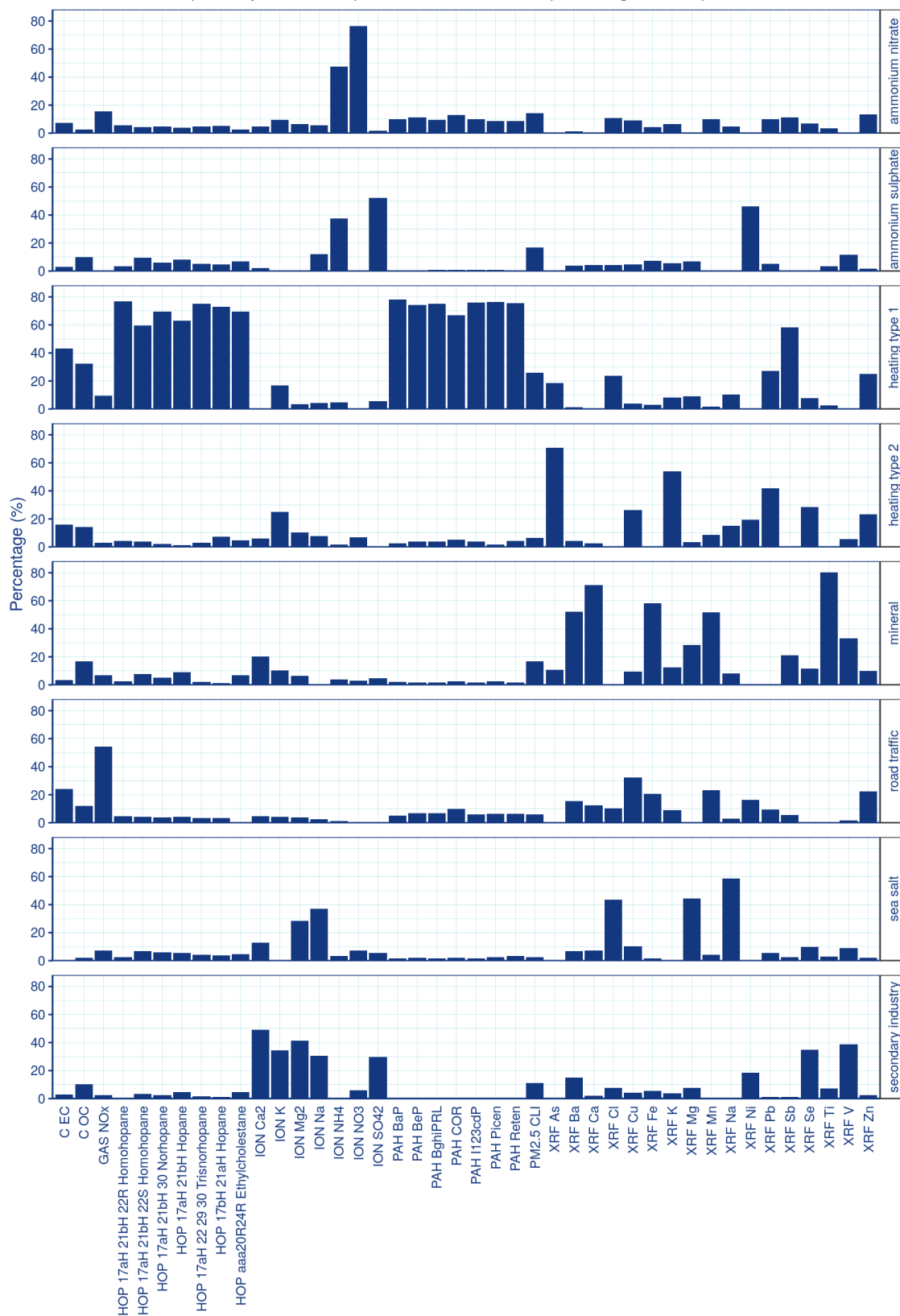
Model s prvkovou analýzou ED XRF

Identifikováno bylo 8 faktorů:

- Ammonium nitrate: Sekundární anorganický aerosol tvořený převážně dusičnanem amonným
- Ammonium sulphate: Sekundární anorganický aerosol tvořený převážně síranem amonným
- Heating type 1
- Heating type 2
- Mineral: Částice minerálního původu
- Road traffic: Primární částice z automobilové dopravy
- Sea salt: Převážně mořská sůl se stopami emisí kumulovaných v průběhu dálkového transportu znečištění
- Secondary industry: Sekundární aerosol vyvolaný průmyslovým spalováním uhlí

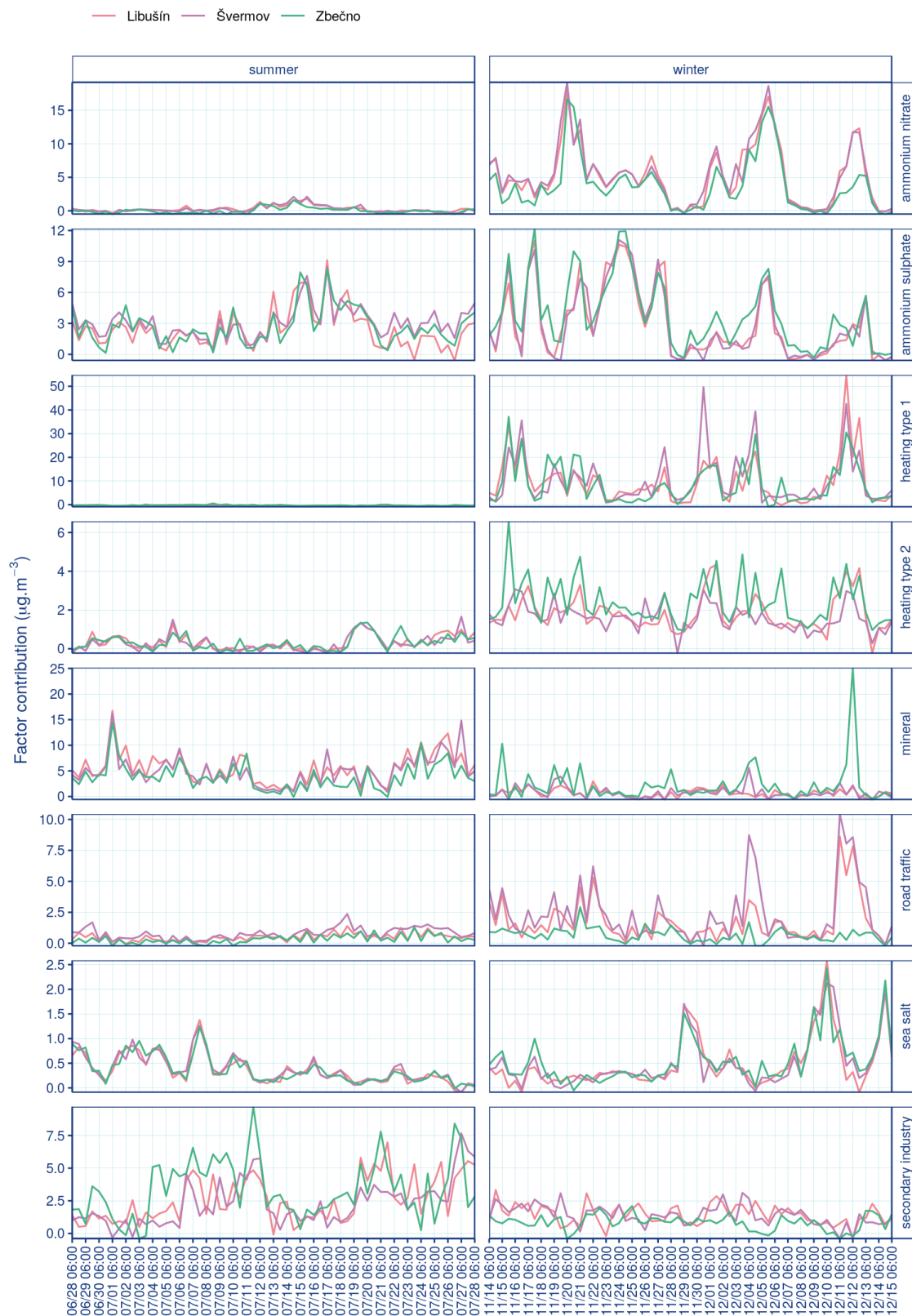
Popis identifikovaných faktorů je uveden níže v kapitole „Charakteristika identifikovaných faktorů kvality ovzduší“. Chemické profily a časové řady identifikovaných faktorů dokumentuje Obrázek 18 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a Obrázek 19. Absolutní podíly uvedených faktorů na průměrné koncentraci suspendovaných částic PM_{2,5} za dobu letní a zimní měřicí kampaně znázorňuje Obrázek 20 a Obrázek 21.

Factor Profiles (% of species sum) from Base Run #17 (Convergent Run)

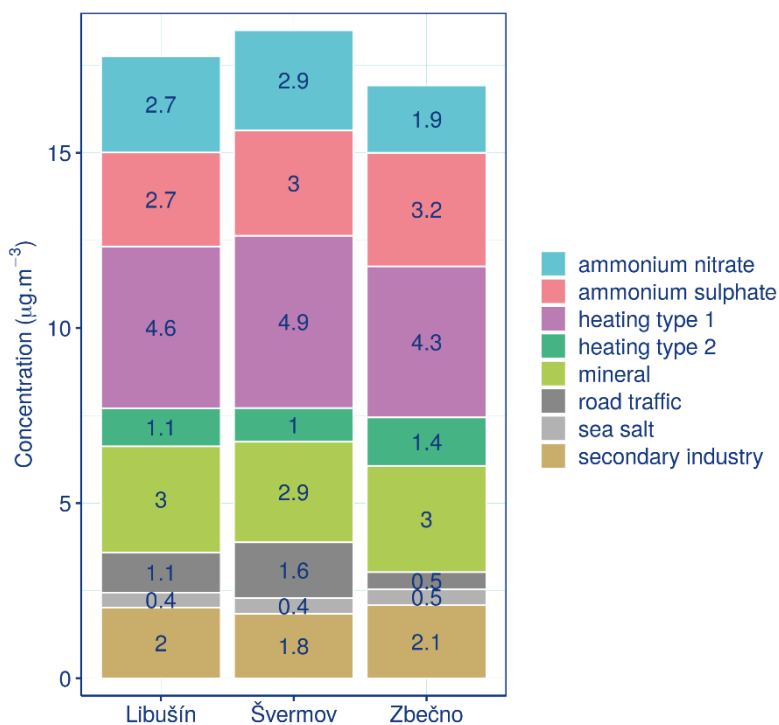


Obrázek 18 Chemické profily faktorů identifikovaných s datovou sadou ED XRF

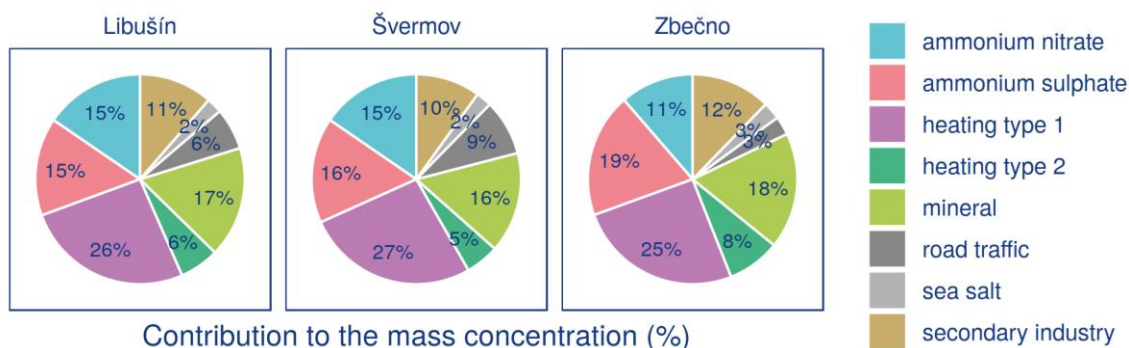
(Total Variable = PM2.5_CLI)



Obrázek 19 Časové řady faktorů identifikovaných s datovou sadou ED XRF



Obrázek 20 Absolutní podíly faktorů identifikovaných s datovou sadou ED XRF na celkové koncentraci PM_{2,5}

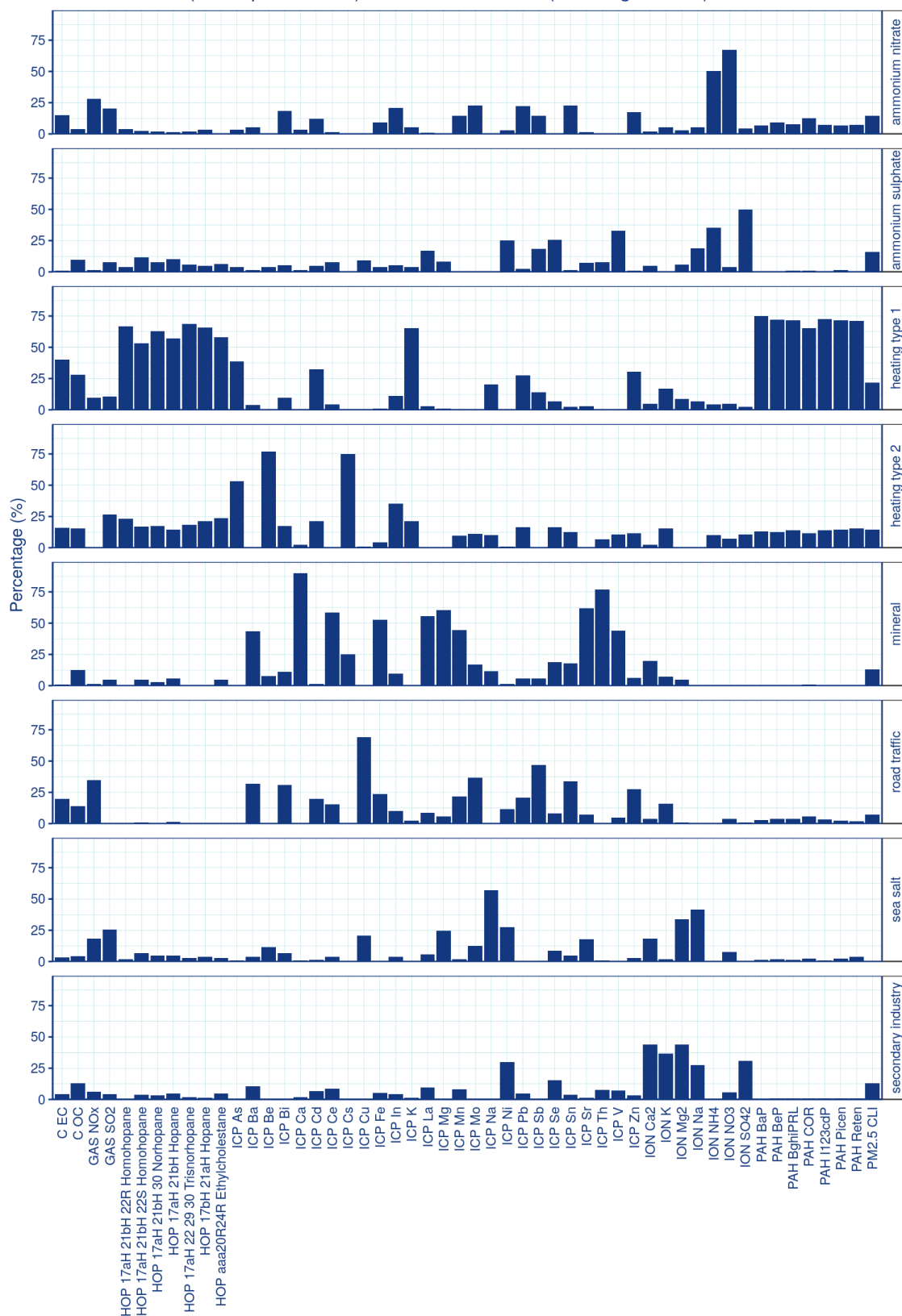


Obrázek 21 Relativní podíly faktorů identifikovaných s datovou sadou ED XRF na celkové koncentraci PM_{2,5}

Model s prvkovou analýzou ICP-MS

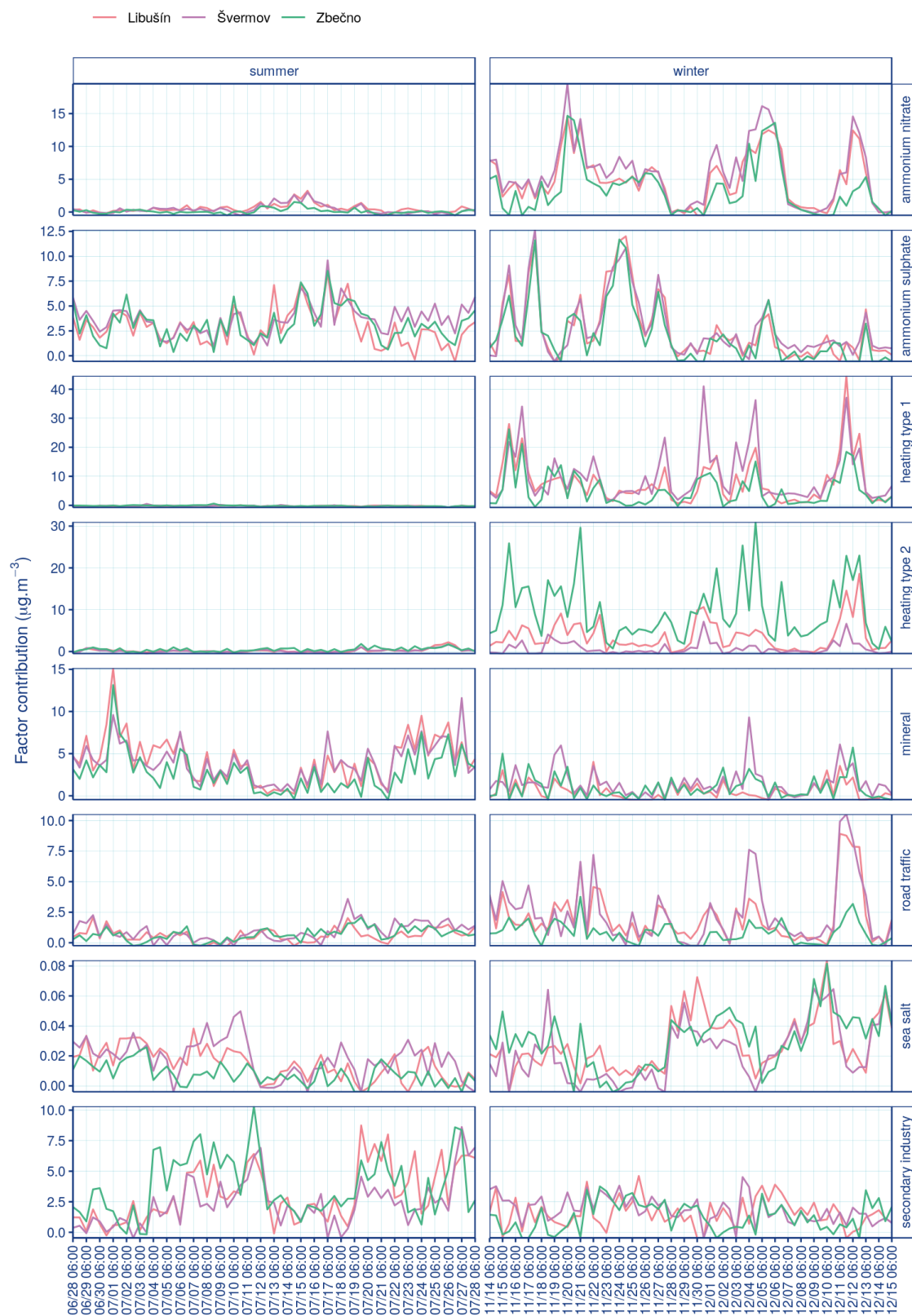
Identifikováno bylo shodných 8 faktorů jako v případě sady z ED XRF (viz výše). Popis identifikovaných faktorů je uveden níže v kapitole „Charakteristika identifikovaných faktorů kvality ovzduší“. Chemické profily a časové řady identifikovaných faktorů dokumentuje Obrázek 22 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a Obrázek 23. Absolutní podíly uvedených faktorů na průměrné koncentraci suspendovaných částic PM_{2,5} za dobu letní a zimní měřicí kampaně znázorňuje Obrázek 24 a Obrázek 25.

Factor Profiles (% of species sum) from Base Run #13 (Convergent Run)

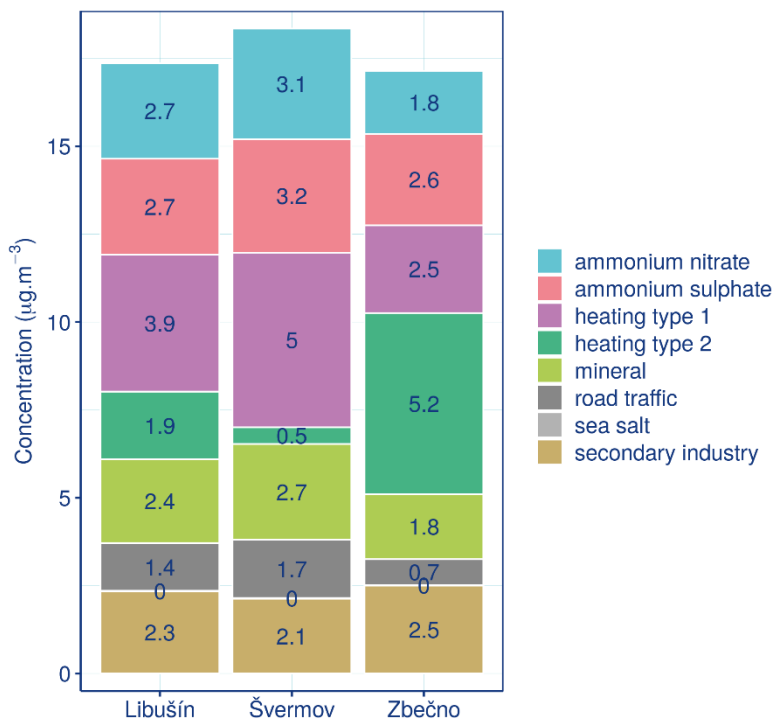


Obrázek 22 Chemické profily faktorů identifikovaných s datovou sadou ICP-MS

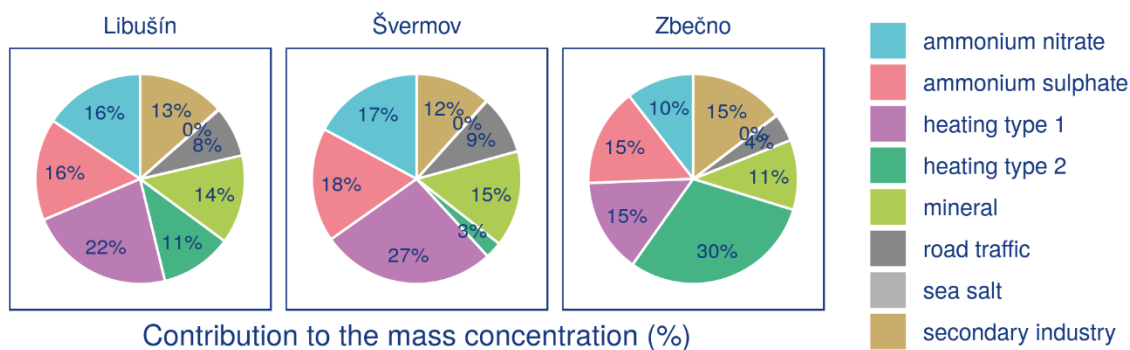
(Total Variable = PM2.5_CLI)



Obrázek 23 Časové řady faktorů identifikovaných s datovou sadou ICP-MS



Obrázek 24 Absolutní podíly faktorů identifikovaných s datovou sadou ICP-MS na celkové koncentraci PM_{2,5}



Obrázek 25 Relativní podíly faktorů identifikovaných s datovou sadou ICP-MS na celkové koncentraci PM_{2,5}

Přibližný model lokality Švermov na základě omezeného analytického rozsahu

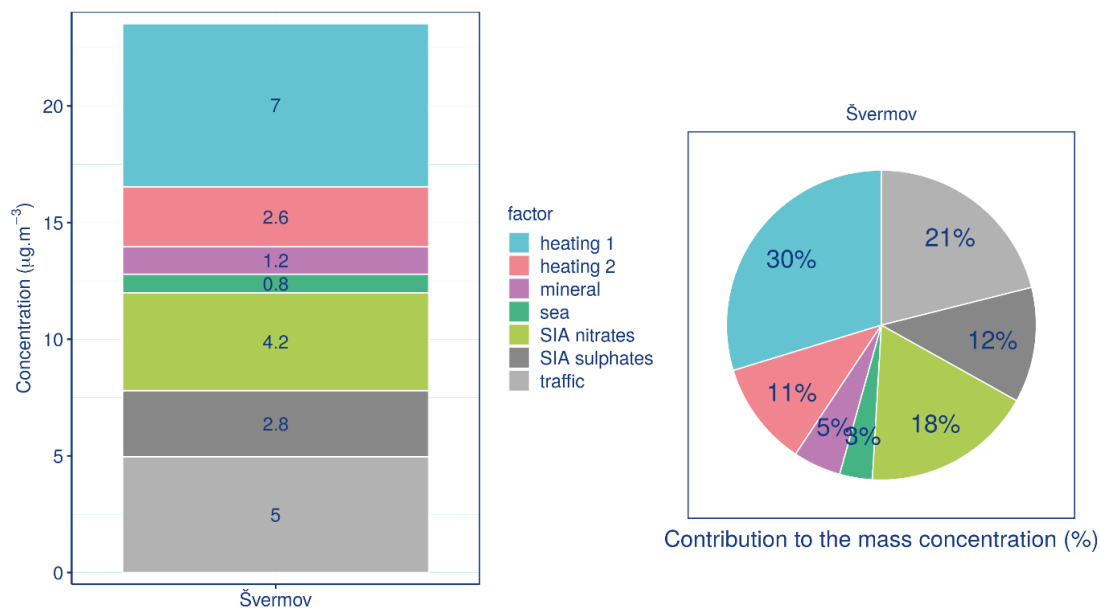
V rámci posouzení možností optimalizace nákladů na identifikaci zdrojů znečištění ovzduší bylo na základě dat ze zimní kampaně testováno, jakých výsledků lze dosáhnout při zkrácení rozsahu analýz, které jsou pro finanční náročnost rozhodující (jak se liší od výsledků při použití obvyklého rozsahu). Redukce počtu sledovaných parametrů pro tento test vycházela především z vyhodnocené hmotnostní skladby aerosolu v projektových oblastech 1 a 2, ze které vyplývá, že většinu hmoty aerosolu tvoří uhlíkaté částice a ionty. U těchto látek musí být pro přijatelnou přesnost kvantifikace podílů použity co nejpřesnější metody, aby výsledek nebyl významně zkreslen. Vzhledem k silné korelaci mezi EC, OC, BC a PAH je jejich variabilita ve vzorcích podobná a lze je v určitých případech zredukovat. Tento předběžný závěr platí prozatím pouze pro zimní období. V rámci projektových prací bylo testováno využití aethalometru namísto laboratorně stanovených analýz PAH a EC/OC. Hodnocení bylo proto možné zpracovat pouze pro lokalitu Švermov (jinde nebyl aethalometr použit).

Stabilní modelové řešení zimního období obsahovalo 7 identifikovaných faktorů:

- Heating 1: Vytápění domácností pevnými palivy
- Heating 2: Vytápění domácností pevnými palivy s jiným podílem kovů
- Mineral: Částice minerálního původu
- Sea: Převážně mořská sůl se stopami dálkového transportu
- SIA nitrates: Převážně dusičnan amonný
- SIA sulphates: Převážně síran amonný
- Traffic: Primární částice z automobilové dopravy

Podrobněji byly metodika a výsledky popsány v předběžném hodnocení zimní kampaně za 9. kvartál projektu (červen 2020).

Absolutní podíly identifikovaných faktorů na koncentraci PM_{2,5} dokumentuje Obrázek 26.



Obrázek 26 Absolutní a relativní podíly faktorů identifikovaných s limitovanou datovou sadou na celkové koncentraci PM_{2,5}

Charakteristika identifikovaných faktorů kvality ovzduší

Ammonium nitrate

Jedná se o sekundární anorganický aerosol tvořený převážně dusičnanem amonným. Z časových řad faktorů i z vyhodnocení naměřených koncentrací (viz podkapitola „Korelace hmotnostně významných iontů“) vyplývá podstatně vyšší podíl tohoto faktoru na koncentraci $PM_{2.5}$ v zimním období, což pravděpodobně souvisí jednak se snazším vznikem dusičnanů a jednak s vyššími emisemi oxidů dusíku v chladném období. Původ této části znečištění je komplexní, podílejí se na něm i přírodní, ale zejména antropogenní zdroje. Vzniká převážně mimo posuzovanou oblast Kladenska. Mírně zvýšené zastoupení NO_x , koronenu a některých kovů (Zn a Sb v případě dat ED XRF, resp. také Sn, Mo a Pb v případě dat ICP-MS) v chemickém profilu tohoto faktoru indikuje, že na jeho vzniku se významně podílejí emise z automobilové dopravy.

Ammonium sulphate

Sekundární anorganický aerosol tvořený převážně síranem amonným. Vyšších příspěvků dosahoval v chladné části roku, pravděpodobně vlivem vyšších emisí oxidu siřičitého v tomto období (jak je uvedeno v předchozích kapitolách, meteorologické podmínky byly z hlediska rozptylu v zimě příznivější). Komplexní původ neumožňuje identifikaci konkrétního původce, časový profil ale nasvědčuje regionálnímu až nadregionálnímu původu (mimo posuzovanou oblast). Relativně zvýšené zastoupení Ni a V ukazuje na významný vliv spalování fosilních paliv, pravděpodobně ropných (rafinerie, lodní doprava).

Heating type 1

Faktor reprezentuje individuální vytápění domácností pevnými palivy. V rámci identifikovaných faktorů zde mají zcela dominantní zastoupení PAH a hopany a nejvyšší procentuální podíl má tento faktor také na koncentraci elementárního a organického uhlíku. Tyto hlavní analyty jsou doprovázeny draslíkem a ionty K^+ (vliv spalování biomasy) a některými kovy (As, Zn, Pb, Cd). Časový průběh faktorového příspěvku ke koncentraci $PM_{2.5}$ ukazuje na lokální původ tohoto znečištění, výhradně v chladné části roku. Podílu tohoto faktoru na průměrné koncentraci $PM_{2.5}$ je na všech hodnocených lokalitách podobný s mírně vyššími příspěvky ve Švermově.

Heating type 2

Jedná se o faktor reprezentující vytápění domácností pevnými palivy s mírně odlišným složením oproti předchozímu faktoru. Chemický profil stanovený na základě výsledků metody ICP-MS se vyznačuje velmi vysokými podíly As, Cs, Be, zvýšené relativní zastoupení mají v sadě ICP i sadě XRF také K, Se, Zn. Faktor se po faktoru „Heating type 1“ vyznačuje také druhými nejvyššími podíly PAH a hopanů. Dle časového průběhu jde o lokálně působící faktor vázaný téměř výhradně na zimní období, přičemž modelové řešení ukazuje na jeho výrazně vyšší imisní příspěvek ve Zbečně oproti Švermovu i Libušínu, a to zejména v případě sady ICP-MS. Dosažené výsledky ukazují na specifický vliv různých paliv v různých lokalitách. Zbečno je zatíženo více spalováním paliv, které jsou z hlediska obsahu těžkých kovů méně kvalitní a je

zde zřetelný také vyšší vliv spalování dřeva (vyšší koncentrace K a K⁺) oproti ostatním dvěma lokalitám. Málo významné modelové imisní příspěvky tohoto faktoru v létě jsou pravděpodobně spojeny se spalováním biomasy v domácnostech nebo venkovních otevřených ohništích.

Mineral

Tento faktor obsahuje částice minerálního původu převážně přírodní povahy, které se dostávají do ovzduší ze zemského povrchu vlivem působení větru. Diagnostickými skupinami analytů jsou typické prvky zemské kůry Ba, Ca, Mg, Fe, Mn, Ti a v případě analýz ICP-MS také Ce, La, Sr, Th. Zvýšený podíl organického uhlíku v chemickém profilu může souviset s obsahem biogenního detritu nebo se jedná o falešný příspěvek spojený s chybou laboratorního stanovení (viz popis nejistot v kapitole „Nedostatky a neurčitosti hodnocení“). Časová řada faktorového imisního příspěvku dokumentuje vyšší hodnoty v letním období a silnou kolísavost den/noc a indikuje lokální původ této části znečištění.

Road traffic

Jedná se o primární částice z automobilové dopravy. V chemickém profilu jsou silně zastoupeny NO_x, přičemž bližší analýza ukazuje vysoký podíl NO/NO₂. Diagnostickými prvky jsou Cu, Zn, Fe, Mn, Ba, Ca a v případě sady ICP-MS také Mo, Sb a Sn, pocházející z resuspenze z povrchu vozovky a ořetů brzdového obložení. Chemický profil doplňuje vysoký procentuální podíl elementárního uhlíku (spolu s vytápěním domácností nejvyšší) a relativně zvýšené PAH, z nichž nejvíce koronen. Časový profil dokládá lokální působení a překvapivě vysoký nárůst v chladné části roku, což může souviset s větrnějším počasím, a tedy intenzivnější resuspenzí, s vyšší intenzitou dopravy oproti prázdninovému období a méně významně také s vyššími emisemi z důvodu studených startů vozidel a provozu s chladným motorem. Protože zimní úroveň příspěvku tohoto faktoru je vázána hlavně na koncentrační špičky, pravděpodobně je hlavní příčinou zvýšená resuspenze při specifických meteorologických podmínkách.

Sea salt

Faktor reprezentuje převážně mořskou sůl (Na, Mg, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) se stopami emisí z průmyslové energetiky (Se, V, v případě sady ICP-MS také Ni) kumulovaných v průběhu dálkového transportu znečištění z přímořských oblastí. Časový průběh velikosti imisního příspěvku je na všech lokalitách prakticky shodný. Celkově vyšší imisní příspěvek i jeho špičky se vyskytly v zimní části měření.

Secondary industry

Sekundární anorganický aerosol vyvolaný pravděpodobně emisemi z průmyslového spalování uhlí. Chemický podpis je tvořen ionty Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ a K⁺, sírany a prvky typickými pro spalování uhlí, popř. ropných paliv ve velkých průmyslových zdrojích (v případě sady ED XRF se jedná o Se a V, v případě datové sady ICP-MS také o Ni). Méně významné zastoupení organického uhlíku v chemickém profilu může být důsledkem nejistoty odběru a analýzy OC, která je diskutována níže v kapitole „Nedostatky a neurčitosti hodnocení“ (může se jednat o chybné modelové přiřazení neexistujícího množství OC, skutečný podíl OC v podpisu může

být podstatně nižší). Pravděpodobně se jedná o sekundární anorganický aerosol vznikající regionálním transportem průmyslových emisí z velkých spalovacích zdrojů (desítky až první stovky km), čemuž kromě chemického složení nasvědčuje také analýza zpětných trajektorií. Zpětnými trajektoriemi jsou indikovány 3 hlavní směry, odkud tento faktor působí: východ až jihovýchod (pravděpodobná kumulace emisí ze středočeské a východočeské energetiky – teplárny Kolín, elektrárny Chvaletice a Opatovice, Synthesia, a.s.), jihozápad (pravděpodobně vliv Plzeňské energetiky a.s. a Plzeňské teplárenské, a.s.) a severozápad až sever (přenos z Podkrušnohorské pánve – emisí z velkých spalovacích zdrojů Počerady, Prunéřov, Tušimice, Komořany, Trmice). Časový průběh faktoru ukazuje na regionální až nadregionální původ znečištění (malé kolísání příspěvku mezi dnem a nocí). Vyšší hodnoty příspěvku byly zjištěny v létě, což může být způsobeno horšími rozptylovými podmínkami nebo také jinými mechanismy vzniku sekundárních částic v chladném a teplém období (viz také rozbor v kapitole „Diskuse a porovnání výsledků PMF“.

Diskuse výsledků

Dosažené výsledky identifikace zdrojů znečišťování ovzduší ukazují na dobrou shodu PMF modelu při využití prvkové analýzy ICP-MS a ED XRF. Počet identifikovaných faktorů byl shodný, a to jako při samostatném hodnocení letní a zimní kampaně, tak i při souhrnné hodnocení obou částí měření. Z hlediska kvalitativního hodnocení faktorů a jejich složení jsou tedy obě metody prvkové analýzy při využití v modelu PMF stejně dobře využitelné a poskytují v tomto ohledu stejné výsledky.

Správnost interpretace výstupů PMF byla posouzena na základě časových průběhů identifikovaných faktorů a zpracování meteorologických dat. Za tímto účelem byly pro vybrané dny zpracovány zpětné trajektorie směrů větru pomocí webové aplikace READY HYSPLIT. Metoda je obtížně použitelná pro hodnocení vlivu lokálních zdrojů, ale vyhovující pro posouzení dálkových přenosů znečištění. Meteorologické ověření správnosti identifikace lokálních zdrojů, které se osvědčilo v předchozí projektové oblasti (Třinecko), nebylo na Kladensku proveditelné z důvodu zastavenosti území, které omezovalo vypovídací hodnotu měření směru větru (viz kapitola „Nedostatky a neurčitosti hodnocení“). Nejedná se o významnou závadu hodnocení, protože je zřejmé, že původci lokálního znečištění se nacházejí na území příslušné malé obce (cílem projektu jsou regionálně strategické závěry pro ochranu ovzduší a pro ně je směrovost působení lokálních zdrojů nepodstatná).

Procentuální a absolutní podíly identifikovaných faktorů na koncentraci PM_{2,5} byly velmi podobné, s odchylkami, které nehrají roli z hlediska nasměrování případných strategických kroků v ochraně ovzduší. Všechna 3 modelová řešení identifikovala jako **hlavní lokální zdroj znečištění PM_{2,5} individuální vytápění domácností**, které se dle různých datových sad a jednotlivých typů paliva v součtu podílelo v průměru obou kampaní na koncentraci PM_{2,5} cca 30 až 45%. Použití dat prvkové analýzy ICP-MS vykazuje oproti datům ED XRF vyšší variabilitu vyhodnoceného podílu vytápění mezi jednotlivými lokalitami. Ve Zbečně přisuzuje vytápění o 11 až 15 % vyšší podíl než v Libušině a Švermově. Při využití dat ED XRF byl ve všech třech lokalitách vyhodnocen prakticky stejný podíl vytápění (32 až 34 %).

Významným lokálním faktorem byly také **částice minerální povahy**, majoritně přírodního původu (11 až 18%). **Primární částice z dopravy** se v hodnocených lokalitách podílely na celkové koncentraci PM_{2,5} cca 3 až 9 %, přičemž dopravně silněji zatížený Švermov a Libušín vykazovaly zhruba dvojnásobný procentuální podíl oproti Zbečnu.

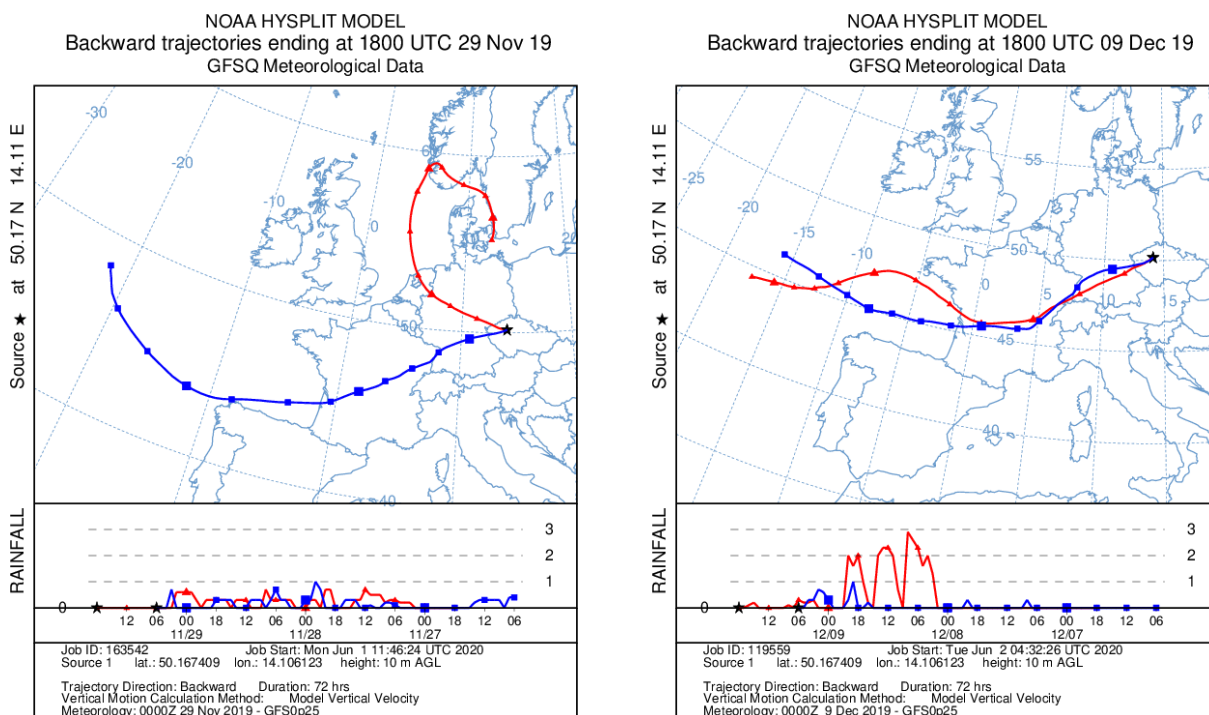
Regionální a nadregionální faktory (dálkový přenos znečištění a regionálně vznikající sekundární aerosol) se podílely na celkové koncentraci v průměru téměř polovinou (40 až 46 %), přičemž v teplé polovině roku tvoří z důvodu absence vlivu vytápění domácností výraznou většinu znečištění.

Hlavní část znečištění regionálního a nadregionálního původu bylo s ohledem na dobu setrvání v atmosféře tvořeno sekundárním aerosolem. S výjimkou mořské soli, která byla identifikována jako samostatný faktor z málo významným imisním příspěvkem (v průměru první jednotky %), bylo malé množství primárních částic účastnicích se dálkového a regionálního přenosu znečištění zahrnuto ve faktorech „ammonium nitrate“, „ammonium sulphate“ a „secondary industry“. Hmotnostně dominantní část těchto faktorů ale připadá na sekundární anorganický aerosol.

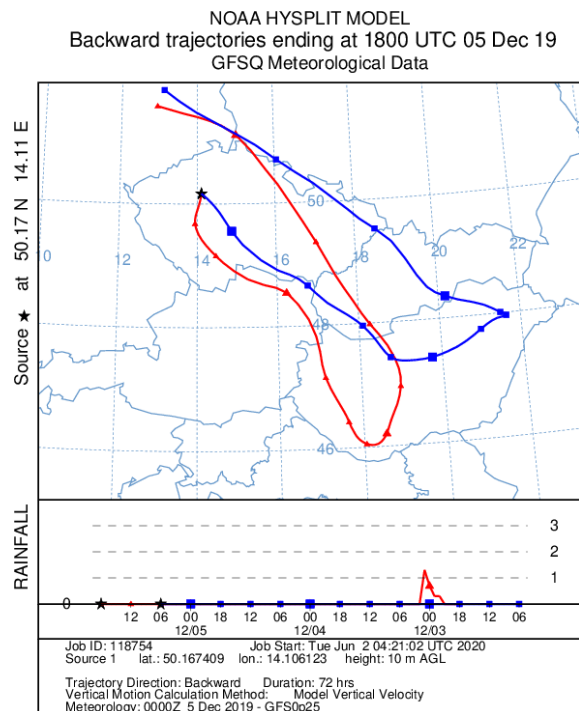
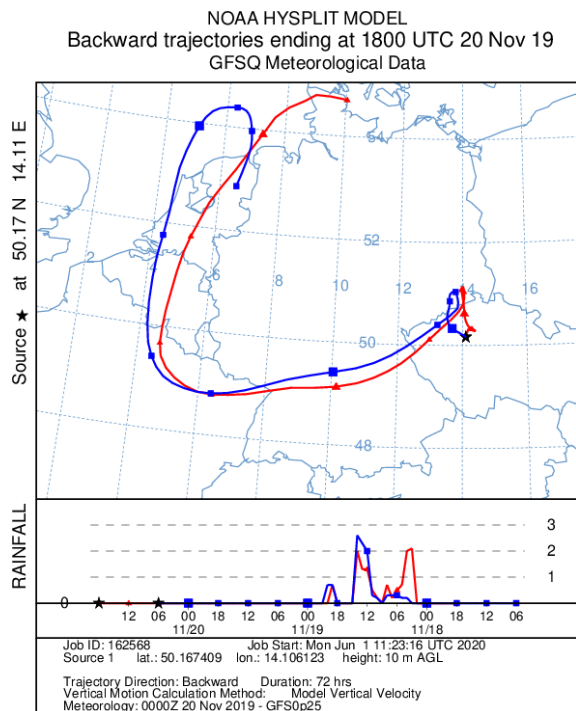
Sekundární organické částice nebyly identifikovány jako samostatný faktor. Důvodem je pravděpodobně skutečnost, že do imisního měření nebyly zahrnuty markery tohoto typu

znečištění, např., glutarová a pinonová kyselina, terpeny, karboxylové kyseliny, organosulfáty. Jediným sledovaným analytem, který zahrnoval sekundární organický aerosol (SOA), byl organický uhlík, který je sám o sobě nedostatečný pro vyčlenění samostatného faktoru. Stanovení OC navíc trpí nejistotami zmíněnými v kapitole „Nedostatky a neurčitosti hodnocení“, zejména v letním období, což jeho využitelnost k detekci SOA pravděpodobně omezuje. Na základě rešerší dostupných odborných prací lze ale očekávat, že podíl SOA bude výrazně nižší, než podíl sekundárního anorganického aerosolu, který byl detekován spolehlivě. Nelze očekávat, že by nekvantifikovaný podíl SOA mohl ovlivnit vyhodnocení hlavních priorit ochrany ovzduší.

Dusičnan amonný v zimě působil v průměru nejvyšší imisní příspěvkem ze všech identifikovaných druhů sekundárního aerosolu, v létě byl ale jeho podíl na celkové koncentraci PM_{2.5} naopak velmi nízký. V průměru se na hmotě PM_{2.5} podílel 10 až 17 %. V zimním období měl jeho příspěvek velmi kolísavý časový průběh. Příkladem meteorologické situace s nízkými příspěvky dusičnanu amonného jsou 29. 11. 2019 a 9. 12. 2019 (Obrázek 27). Naopak špičkové imisní příspěvky tohoto faktoru byly zjištěny 20. 11. 2020 6:00, 5. 12. 2019 18:00 (Obrázek 28) a po celý den 12. 12. 2019.



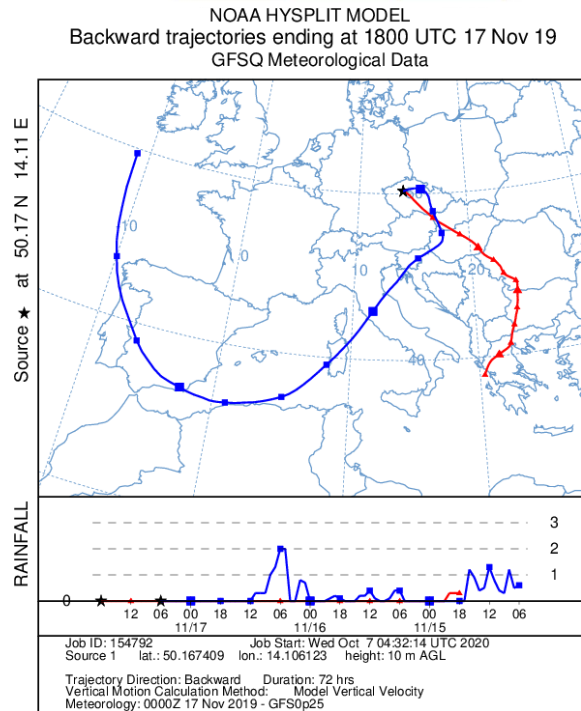
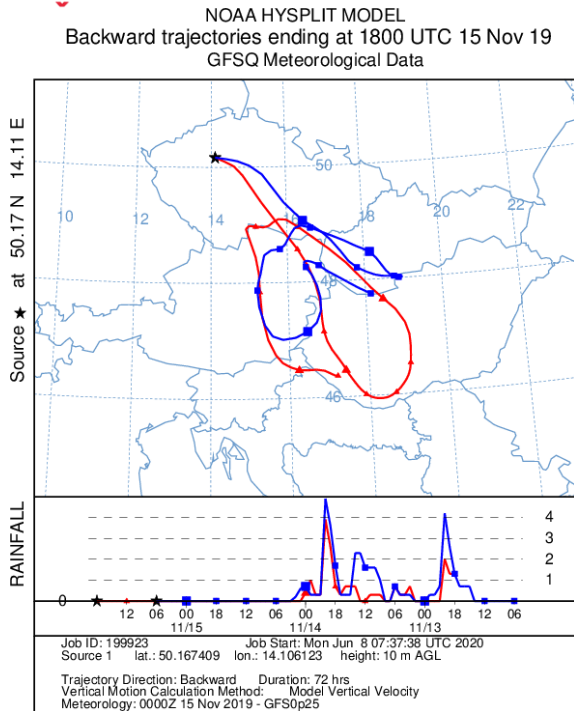
Obrázek 27 Zpětné trajektorie pro 29. 11. 2019 a 9. 12. 2019



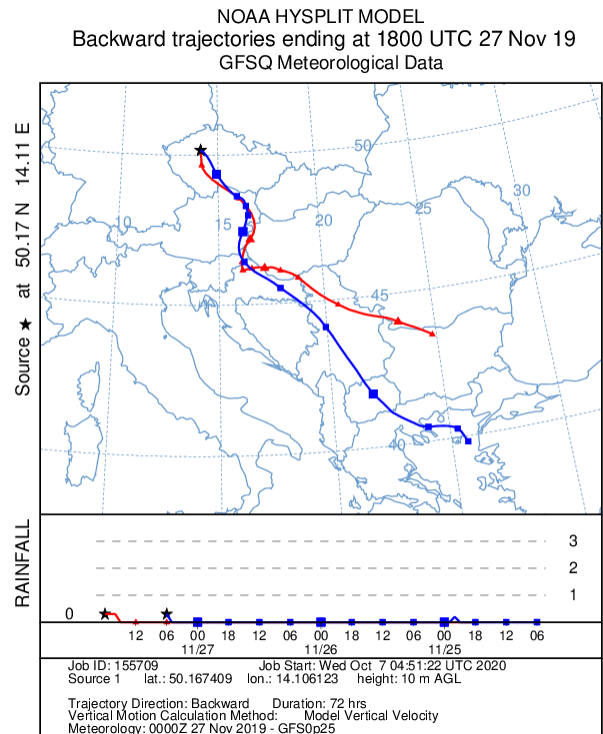
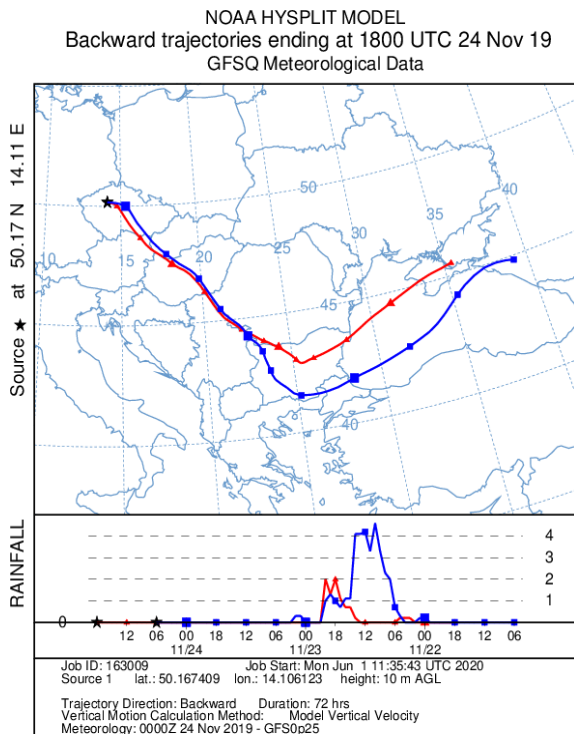
Obrázek 28 Zpětné trajektorie pro 20. 11. 2019 a 5. 12. 2019

Z provedené analýzy vyplývá, že maxima imisního příspěvku dusičnanu amonného se vyskytovala v meteorologických situacích s proměnlivým směrem a nízkou rychlostí větru, které poskytovaly v prostoru střední Evropy dostatek času ke vzniku této látky. Naopak dny s ustáleným směrem a vyšší rychlostí proudění z jihozápadních až severozápadních směrů se vyznačovaly nízkým imisním příspěvkem této látky. Výsledky tak naznačují, že většina dusičnanu amonného ve sledovaném období měla regionální původ, což indikuje, že případným snížením emisí jeho prekurzorů (oxidů dusíku) na území ČR a v příhraničí lze regionálně dosáhnout významného snížení imisních koncentrací $PM_{2,5}$.

Hmotnostně významnou složku suspendovaných částic $PM_{2,5}$ a celoročně nejvýznamnější část sekundárního aerosolu tvořil **síran amonný** (15 až 19 % koncentrace $PM_{2,5}$). Výrazná převaha síranu amonného nad dusičnanem amonným byla zjištěna v létě, zatímco v zimě tomu bylo naopak. Na vznik této části znečištění má vliv řada nejasných faktorů. Pouze některé epizody zvýšených imisních příspěvků síranu amonného se časově shodují s obdobím zvýšených imisních příspěvků dusičnanu amonného. To svědčí o částečně jiných zdrojích prekurzorů těchto částic. Analýza výsledků PMF naznačuje, že v zimním období se na tvorbě síranu amonného významně podílí průmyslová energetika (souvislost faktoru „ammonium sulphate“ s faktorem „secondary industry“ je diskutována níže). Kolísavost letních koncentrací tohoto faktoru je malá (nevyskytují se významné špičky ani propady koncentrací). Rozbor příčin znečištění zpětnými trajektoriemi a s ohledem na malé množství dat (60 hodnot na lokalitu) ani statistickými metodami neposkytl pro teplou polovinu roku průkazné výsledky. V chladné polovině roku byly všechny epizody vysokých koncentrací síranu amonného spojeny s prouděním od východu až jihovýchodu, přičemž nejvyšších hodnot nabýval příspěvek tohoto identifikovaného faktoru při východním směru (Obrázek 29 a Obrázek 30).



Obrázek 29 Zpětné trajektorie pro 15. 11. 2019 a 17. 11. 2019



Obrázek 30 Zpětné trajektorie pro 24. 11. 2019 a 27. 11. 2019

Samostatnou diskuzi zasluhuje faktor reprezentující **průmyslovou energetiku** („secondary industry“). Protože jeho chemický profil obsahuje významné procentuální zastoupení iontů vápníku a hořčíku (nejvyšší ze všech identifikovaných faktorů), je kvantifikace podílu tohoto

faktoru oproti ostatním fingerprintům významněji zatížena pravděpodobnou chybou při laboratorním stanovení kationtů v rámci letní odběrové kampaně (viz kapitola „Nedostatky a neurčitosti hodnocení“). Vzhledem k tomu, že se tento faktor ale v modelovém řešení odděloval spolehlivě již od počtu 5 faktorů, má vazbu na meteorologické podmínky a odpovídá očekávanému průběhu zpětných trajektorií při jeho koncentračních špičkách, je zřejmé, že má nezanedbatelný podíl na imisní situaci. Případná chyba laboratorního stanovení se může projevit v řádu jednotek %, takže zásadně vyhodnocený podíl neovlivní. Dle lokality a datové sady byl modelově stanoven imisní příspěvek tohoto faktoru mezi 10 a 15 %. S přihlédnutím ke zvýšené nejistotě vlivem pravděpodobné laboratorní chyby je nutné počítat s celkovým podílem tohoto faktoru v poměrně širokém rozmezí mezi 5 a 20 %.

Časový průběh faktoru „secondary industry“ na první pohled neodpovídá očekávanému imisnímu projevu průmyslových zdrojů, jejichž velikost emisí se v průběhu roku výrazně nemění. V rámci verifikace výsledků modelu bylo hledáno vysvětlení pro výrazně nižší imisní příspěvek tohoto faktoru v zimním období. Na základě analýzy chemického složení identifikovaných faktorů a jejich časových průběhů může být tato skutečnost hypoteticky vysvětlena tím, že zatímco v létě primární emise SO_2 reagovaly s kationty za vzniku síranů, v zimě s vyšší dostupností dusíku docházelo k snadnější tvorbě síranu amonného, takže většina hmoty tohoto faktoru představovaná síranovým iontem se projevila ve faktoru „ammonium sulphate“, jehož koncentrace oproti létu naopak vzrostly. To koresponduje se skutečností, že nejvyšší zimní špičky faktoru „ammonium sulphate“ nastaly podle zpětných trajektorií ze dnů 15. 11. 18:00, 17. 11. 18:00 (Obrázek 29), po celý den 24. 11. a 27. 11. 2019 6:00 (Obrázek 30) při východním směru větru, při kterém byly zjištěny nejvyšší letní příspěvky faktoru „secondary industry“. Je pravděpodobné, že regionální vliv tuzemské energetiky v chladné části roku významně na Kladensku přispíval k imisnímu příspěvku sekundárního síranu amonného, zatímco v letních měsících ke koncentraci jiných síranů, především vápníku a hořčíku.

S výjimkou velkých spalovacích zařízení nebyl provedenými pracemi na Kladensku identifikován významný vliv průmyslových zdrojů na kvalitu ovzduší. Vliv provozu nedalekého kamenolomu Sýkořice ve Zbečně se v hodnoceném období na kvalitě ovzduší významně neprojevil. Přirozená resuspenze minerálních částic ve Švermově a Libušíně měla na kvalitu ovzduší vyšší vliv, než provoz zmíněného kamenolomu ve Zbečně.

Od výsledků PMF získaných z kompletních datových sad se odchyluje model vypracovaný s limitovanou vstupní datovou sadou (bez PAH, EC a OC) tím, že přisuzuje vyšší podíl automobilové dopravě (až přibližně dvojnásobný), v jiných aspektech byla shoda procentuálních podílů faktorů do 5%. Je ale potřeba zmínit, že významná část odchylky modelu na základě odlehčeného datasetu může být způsobena tím, že na rozdíl od ostatních modelových řešení byla hodnocena pouze lokalita Švermov a do modelu tak vstupovala pouze třetina údajů. Spolehlivost odlehčené varianty identifikace zdrojů je nutno dále podrobně testovat v jiných ročních obdobích a jiných lokalitách.

Nedostatky a neurčitosti hodnocení

Nejistoty spojené meteorologickými podmínkami

S ohledem na umístění měřicích míst dané technickými možnostmi v jednotlivých lokalitách je pravděpodobné významné ovlivnění měření směru a rychlosti větru okolní zástavbou a stromy, zejména ve Zbečně, méně významně také v Libušíně. Ve Zbečně jsou ale převládající směry proudění přirozeně ovlivněny orientací hlubokého údolí, která je přibližně shodná s převládajícími směry dle větrných růžic zkonstruovaných na základě hodnot naměřených v průběhu měřicích kampaní, takže pro interpretaci výsledků modelu zde pravděpodobně není zkreslení způsobené budovami a stromy zásadní. Přesto mohlo být hodnocení směrů přenosu znečištění z lokálních zdrojů ve Zbečně a Libušíně významně zkreslené. Při interpretaci výsledků PMF bylo proto vhodnější hodnotit směry přenosu znečištění v případě regionálně a nadregionálně působících zdrojů na základě zpětných trajektorií směru větru, které není zatíženo těmito lokálními nedostatky měření. V případě lokálních zdrojů znečišťování je zřejmé, že emise pocházejí z území příslušné obce (jiné zdroje se v blízkosti nenacházejí a vzdálenost měřicích lokalit vylučuje jejich imisní ovlivnění), takže bližší specifikace konkrétního původce nemá strategický význam. Uvedené nepřesnosti proto nepředstavují překážku využití výsledků provedeného výzkumu a nebrání dosažení projektových cílů.

Nejistoty laboratorních analýz

Vyhodnocení datových sad pomocí PMF pro oblast Kladenska bylo prováděno stejnou metodikou jako v případě předcházející projektové oblasti č. 1 (Trinecko), bylo však významně ovlivněno kombinací těchto nepříznivých skutečností:

- celkově relativně nízká úroveň znečištění v letním období způsobila při použitých 12hodinových odběrech malé navážky vzorků, což vedlo u řady analytů ke zvýšené nejistotě měření a v případě PAH a organických markerů také k velkému počtu hodnot pod mezí stanovitelnosti analytických metod,
- časové řady neobvykle vysokého počtu analytů, především kovů, vykazovaly zejména v létě odlehle hodnoty, přičemž ve většině případů nebylo možné spolehlivě rozhodnout, zda se jedná o chybu měření nebo skutečné špičkové koncentrace,
- vysoké naměřené koncentrace kationtů, zejména Ca^{2+} a Mg^{2+} v letním období (řádově vyšší oproti měření v chladné části roku).

Nízké letní koncentrace měly dopad na stanovitelnost pouze u těch látek, které v tomto období nejsou podstatné z hlediska identifikace zdrojů a zejména jejich hmotnostních podílů na koncentraci $\text{PM}_{2,5}$. PAH a hopany nemají v celkové koncentraci $\text{PM}_{2,5}$ významný hmotnostní podíl a nejedná se o stěžejní markery určitých typů znečištění v teplé části roku. Zvýšená analytická nejistota těchto látek proto výsledek provedené identifikace zdrojů významně nezatěžuje. Lze odhadovat, že chyba modelu tím mohla vzrůst nanejvýš o první jednotky %, což je vzhledem k celkové nejistotě modelování zanedbatelné.

Velký počet zjištěných odlehlejších hodnot v letním období nebylo možno z modelového řešení vyloučit (až 10 % vzorků), protože zkrácení rozsahu statistického souboru by mělo negativní dopad na počet rozlišitelných faktorů. Jejich ponechání v datové sadě ale vedlo k nepříznivému

poměru signál/šum u některých analytů, což ztížilo hledání matematicky stabilního modelového řešení. Vzhledem k tomu, že se jedná o prvky, jejichž hmotnostní podíl ve hmotě PM_{2,5} je nevýznamný (hluboko pod 1%), nemá tato nejistota významný dopad na identifikované podíly zdrojů znečištění ovzduší.

Letní data ze všech hodnocených lokalit ukazují na pravděpodobnou systematickou chybu při laboratorních analýzách kationtů, zejména Ca²⁺ a Mg²⁺. Laboratorně stanovené 12hodinové koncentrace samotného iontu Ca²⁺ tvoří v krajních případech přibližně polovinu, v krajním případě i přes 80 % koncentrace PM_{2,5}, což je nereálné. Postiženy jsou takto všechny 3 lokality, nejvíce Zbečno a Libušín. V případě, že by byly hodnoty ponechány beze změny, došlo by k zásadní chybě kvantifikace hmotnostních podílů zdrojů na celkové koncentraci PM_{2,5}. Zvažovány byly proto tyto možnosti, jak potlačit vliv těchto nejistot na modelový výsledek:

- Vyloučit celou letní datovou sadu Ca²⁺ a Mg²⁺ (ostatní kationty nevykazují podezřelé hodnoty),
- Zvýšit pro účely PMF modelu nejistotu stanovení těchto iontů,
- Přibližně korigovat naměřené hodnoty.

Vzhledem k tomu, že se jedná o důležité analyty pro identifikaci původu znečištění (markery sekundárního aerosolu a dálkového transportu znečištění), vyloučení z datasetu mělo negativní dopad na rozlišovací schopnost PMF – menší počet letních PMF faktorů a nejasná interpretace výsledků.

Zvýšení nejistoty a ponechání v datasetu vedlo v PMF k izolaci falešného faktoru složeného pouze z těchto dvou iontů, což neodpovídá žádnému typu reálného znečištění a podporuje to hypotézu o chybě ve vstupních datech.

Použití korekce je v tomto případě velmi diskutabilní, protože není známa příčina chyby, a tedy nelze odhadnout správný posun hodnot. Cílem korekce není v tomto případě nalézt správné hodnoty, ale pouze zajistit, aby dopad analytické chyby na hmotnostní podíly zdrojů neovlivnily hlavní závěry, a aby Ca²⁺ a Mg²⁺ mohly sehrát svou obvyklou úlohu v identifikaci a interpretaci faktorů, tzn. snížit jejich koncentrace na řádově obvyklé hodnoty a zachovat jejich relativní variaci vůči ostatním analytům v modelovém datasetu. Pro snížení byla analyzována datová sada z Třinecka, kde byla provedena identifikace zdrojů v podstatě stejnou metodikou. Letní a zimní úroveň koncentrace Ca a Mg iontů se zde výrazně nelišily. Pro model PMF byly proto nakonec letní koncentrace Ca²⁺ a Mg²⁺ na všech lokalitách normovány na průměrnou úroveň koncentrace těchto iontů na příslušných lokalitách zjištěnou v zimní části kampaně. Tím sice stále přetrvává nejistota stanovení koncentrací Ca²⁺ a Mg²⁺ v řádu desítek %, ale s přihlédnutím k jejich celkové koncentraci v hmotě PM_{2,5} (<0,5 %) tato nejistota nemůže ovlivnit hlavní závěry posouzení.

Celkově lze s ohledem na uvedené nedostatky a nejistoty konstatovat, že faktory působící v letním období jsou pravděpodobně kvantifikovány méně přesně než faktory, které se projevovaly zejména v chladné části roku. Specifickým zdrojem chyby modelování oproti obvyklé praxi je analytická nejistota stanovení kationtů Ca²⁺ a Mg²⁺, která sama o sobě přispívá k nejistotě provedené kvantifikace podílů zdrojů na celkové koncentraci PM_{2,5} prvními jednotkami %. Nemůže ovlivnit hlavní závěry hodnocení, ale může výrazně zkreslovat vzájemný podíl faktorů s vypočtenými nízkými imisními příspěvky PM_{2,5}, tzn. zejména dopravy a mořského aerosolu.

V návaznosti na použití nových standardů pro kalibraci ED XRF bylo provedeno posouzení vlivu této změny na analytické výsledky, které bylo podrobně vyhodnoceno v předběžném hodnocení za 9. kvartál projektu (červen 2020). Provedenou analýzou nebyl zjištěn u žádného

prvku podstatný rozdíl mezi výsledky získanými s využitím původní dvoubodové (standardy NIST) a nové třibodové (standardy NIST+MicroMatter) kalibrační křivky. Ve srovnání s jinými zdroji nejistot se jedná o nevýznamné rozdíly.

Přetrvávajícím problémem analýz XRF byly významné odchylky směrnice kalibrační křivky mnoha prvků v různých obdobích oproti výsledkům ICP-MS. Zjištění příčiny a odstranění tohoto problému bude věnováno úsilí v následujících projektových fázích. Protože pro všechny lokality byla k dispozici paralelní měření ED XRF a ICP-MS, byla na základě výsledků ICP provedena korekce kalibrační křivky ED XRF a do modelu PMF byla použita takto korigovaná data. Nejistota spojená s touto chybou metody ED XRF se proto do výsledků PMF nepromítá.

Z pohledu analytických nejistot může mít na vyhodnocené podíly zdrojů znečištění ovzduší největší dopad pravděpodobná sorpce těkavých organických látek (VOC) na materiál křemenných filtrů použitých ke stanovení organického uhlíku. Organický uhlík tvoří významnou, v letním období až většinovou část hmoty PM_{2.5} (Obrázek 10). Chyba ve stanovení OC proto může mít významný vliv na hmotnostní podíly zdrojů vypočtené modelem PMF. Za účelem posouzení vlivu této nejistoty byl v letním období 2020 proveden paralelní odběr a stanovení EC/OC s jedním filtrem a s dvojicí sériově řazených filtrů. Použití dvojice filtrů umožňuje odečíst sorbované množství EC/OC, protože k ní dochází na obou sériově řazených filtrech, zatímco prašný aerosol se zachytí pouze na prvním filtru z této série. Podle předběžných výsledků může v letním období tato odchylka způsobená sorpcí na materiál filtru dosahovat v průměru prvních desítek % stanovené hmotnostní koncentrace OC. Orientačně lze odhadovat, že uvedená nejistota stanovení OC může v krajním případě zkreslit vyhodnocené podíly zdrojů v létě až o 10 %, přičemž v průměru letního období pravděpodobně o méně než 5 % a v ročním průměru o jednotky %. Na základě chemických profilů generovaných PMF modelem je pravděpodobné, že touto nepřesností jsou v létě nadhodnocovány zejména faktory spojené s přírodní minerální prašností vlivem resuspenze (dochází k ní při suchém teplém počasí, kdy bývají vysoké koncentrace VOC) a dopravou (vliv resuspenze z vozovek, stejná shoda s obdobím vysokých koncentrací VOC), ke zkreslení ale může docházet i u dalších faktorů, ke kterým model PMF neexistující hmotu OC nesprávně přiřadí. V následujícím projektovém období bude z výše uvedených důvodů realizován odběr pro EC/OC na dvojici sériově řazených filtrů, což umožní uvedené nejistoty významně redukovat.

Předběžné vyhodnocení opatření PZKO s ohledem na získané výsledky

Pro posuzovanou oblast je relevantním dokumentem Program zlepšování kvality ovzduší zóny CZ02 Střední Čechy. V současnosti probíhá aktualizace programů zlepšování kvality ovzduší 2020+. V následujícím textu jsou komentovány výsledky provedené identifikace zdrojů v kontextu stávající celorepublikové Analýzy příčin znečišťování ovzduší a Analytické části PZKO 2020+ zóny CZ02 Střední Čechy.

Z Analýzy příčin znečišťování ovzduší vyplývá, že sekundární aerosol tvoří v průměru na území ČR podle výsledků transportního modelu CAMx zhruba 2/3 koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5}, cca 1/3 připadá na primární částice. Je zde také uvedeno, že Kladensko patří mezi oblasti ČR, ve kterých model CAMx nejvýrazněji podhodnocuje koncentrace PM₁₀. To může na Kladensku indikovat podhodnocené emise z blíže nespecifikovaných zdrojů. Ač to není v analýze uvedeno, hypoteticky lze předpokládat, že určité podhodnocení lze očekávat i v případě frakce PM_{2,5}, která je sledována v rámci tohoto projektu. V Analýze příčin znečišťování ovzduší je také upozorněno, že spočtené příspěvky českých a/nebo zahraničních zdrojů ke koncentraci dusičnanů a amonných iontů jsou o několik desítek % nadhodnocené, zatímco koncentrace síranů mohou být v předmětné oblasti Kladenska o první desítky % nižší, než vypočtené modelem CAMx. Relativní podíl síranů z českých prekurzorů je podle Analýzy příčin znečišťování ovzduší nejvýznamnější v okolí uhelných elektráren v zóně Severozápad, dusičnany mají největší relativní podíl v severní a východní části Čech a amonné ionty zejména v západní části Ústeckého kraje.

Podle grafických výstupů modelu CAMx se podíl hlavních iontů tvořících sekundární aerosol na průměrné koncentraci PM_{2,5} na Kladensku (síraný, dusičnany, amonné ionty) z českých zdrojů pohybuje v pásmu 30 až 40 %.

Analýza dále uvádí v lokalitě Kladno-Švermov tyto vypočtené podíly na průměrné roční koncentraci suspendovaných částic PM_{2,5}:

- Individuální vytápění domácností: 32 %
- Sekundární částice: 59 %
- Silniční doprava: 4 %
- Primární částice ze zahraničí: 5 %

Výsledek modelování pro stejnou lokalitu získaný pomocí modelu PMF v rámci projektu TAČR TITSMZP704, části V1, agregovaný do těchto skupin zdrojů je následující:

- Individuální vytápění domácností: 30 – 32 %
- Sekundární částice: 41 – 47 %
- Silniční doprava: 9 %
- Primární částice ze zahraničí: 0 – 2 %

Kromě uvedených skupin byla pomocí PMF identifikována také lokální minerální prašnost s vypočteným podílem 15 – 16%.

Z porovnání výsledků uvedeného transportního a receptorového modelu je zřejmá vysoká míra shody, pokud jde o podíl individuálního vytápění, nejvýznamnějšího tuzemského zdroje primárních částic. Významná odchylka uvedených dvou modelů (až téměř 20 %) byla zjištěna v případě podílu sekundárního aerosolu. Kvantifikace podílů pomocí CAMx neumožňuje

zahrnout do celostátního modelu lokální specifika. Lze proto u něj očekávat významné nejistoty spojené s vlivem resuspenze částic ze zemského povrchu, která se podle receptorového modelu PMF podílí na koncentraci PM_{2,5} významně - přibližně 15 %. Ze stejného důvodu se může výrazně lišit podíl silniční dopravy (včetně resuspenze), která může být místní. Zejména složka resuspenze z vozovek je emisně jen nepřesně kvantifikovatelná. Na druhou stranu v případě PMF je s výjimkou mořské soli je velmi obtížné oddělit od sebe antropogenní primární zahraniční částice a sekundární aerosol, protože oba tyto druhy částic se vyskytují při regionálním a dálkovém transportu znečištění vždy společně. To může vysvětlit nižší podíl primárních zahraničních částic ve výsledcích PMF. Obtížná separace primárních částic ze zahraničních zdrojů v případě PMF nepředstavuje významný problém pro interpretaci a strategická doporučení, protože i podle dokumentu „Program zlepšování kvality ovzduší zóna Střední Čechy – CZ02 (analytické podklady) je podíl těchto částic „na ročním průměru PM₁₀ i PM_{2,5} v zóně Střední Čechy zanedbatelný a pohybuje se pod úrovní 10%“.

I přes odlišné přístupy obou modelů jsou hlavní faktory kvality ovzduší kvantifikovány do té míry podobně, že vedou ke stejným hlavním prioritám ochrany ovzduší. V souladu se závěry v analytických podkladech pro PZKO 2020+ vyplývají z vypracovaného receptorového modelu PMF **shodné prioritní skupiny zdrojů, na které je nutné cílit budoucí opatření, tj. individuální vytápění domácností pevnými palivy a zdroje prekurzorů sekundárních částic.** Předkládané vyhodnocení indikuje, že vznik sekundárních částic na Kladensku je významnou měrou spojen s provozem převážně tuzemských velkých uhelných energetických zdrojů (odhadem třetina až polovina sekundárního aerosolu). Je ale velmi pravděpodobné, i když na základě provedených analýz méně průkazné, že na jeho vzniku se podílí významně také automobilová doprava v aglomeraci Praha a emise z individuálního vytápění domácností.

Se zřetelem na shodu výsledků porovnávaného transportního i receptorového modelu v poměrně malém podílu primárních částic z dopravy nelze za prioritu ochrany ovzduší v menších sídlech na Kladensku považovat lokální infrastrukturní opatření v dopravě. S ohledem na regionálně vysoké koncentrace dusičnanů v chladné části roku lze ale doporučit regionálně zaměřená opatření ke snížení dopravních emisí, zejména v aglomeraci Praha a dopravně exponovaných koridorech Středočeského kraje.

Opatření zaměřená na další faktory kvality ovzduší na Kladensku mohou být účelná pouze na lokální úrovni, ale nejsou regionální prioritou. Je u nich vhodné podrobné posouzení konkrétního opatření.

Závěry a doporučení

V rámci projektu TAČR TITSMZP704, výsledku V1, byla v roce 2019 na Kladensku provedena letní a zimní měřicí kampaň pro identifikaci zdrojů znečišťování ovzduší. Hodnocenými lokalitami bylo Kladno-Švermov, Libušín a Zbečno. V roce 2020 byly získané výsledky souhrnně zpracovány matematickým modelem PMF.

Koncepce vzorkování a laboratorních analýz se oproti předchozímu projektovému období nezměnila. Pokračovalo testování metody ED XRF s využitím nově pořízených standardů. Podobně jako v předchozí projektové oblasti (Třinecko) se potvrdila dobrá použitelnost této metody prvkové analýzy pro identifikaci zdrojů. Na lokalitě Kladno-Švermov bylo v chladné části roku otestováno měření černého uhlíku pomocí aethalometru. Předběžné výsledky jsou slibné z hlediska využití tohoto měření pro identifikaci zdrojů, jakožto technicky a finančně méně náročné alternativy k laboratornímu stanovení EC/OC, popř. PAH. Obtížnější interpretace výsledků aethalometrického měření je kompenzována vysokým časovým rozlišením. Testování metody bude pokračovat v projektové oblasti 3.

Provedeným měřením byly zjištěny poměrně malé rozdíly mezi jednotlivými lokalitami (Kladno-Švermov, Libušín a Zbečno), pokud jde o koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5}. V chladné části roku byly na všech hodnocených lokalitách ověřeny přibližně dvojnásobné koncentrace této znečišťující látky oproti letnímu období. Celková úroveň koncentrace za obě měřicí kampaně je o cca 15 až 20 % nižší než hodnota 20 µg.m⁻³, která odpovídá imisnímu limitu stanovenému pro průměrnou roční koncentraci. Odstup od hodnoty limitu je natolik malý, že v rozptylově nepříznivých letech může docházet k jeho překročení.

Kladensko je nadprůměrně zatíženo arsenem a benzo[a]pyrenem, což potvrdilo i projektové měření. V případě obou látek byl na všech lokalitách patrný řádový nárůst imisních koncentrací v zimě oproti letnímu období, což indikuje jejich vazbu na individuální vytápění domácností. V případě benzo[a]pyrenu se jednotlivé lokality v chladné polovině roku lišily o více než třetinu a v případě arсенu téměř o polovinu naměřené průměrné koncentrace. Nejvyšší koncentrace benzo[a]pyrenu byly naměřeny v lokalitě Švermov, naopak nejnižší ve Zbečně. Průměrná koncentrace benzo[a]pyrenu za dobu měření na všech lokalitách překročila hodnotu ročního imisního limitu (1 ng.m⁻³). Nejvyšší koncentrace arсенu byly zjištěny naopak ve Zbečně a nejnižší v lokalitě Švermov. Průměrná koncentrace arсенu za dobu měření ve Švermově a Libušíně mírně přesáhla polovinu hodnoty imisního limitu stanoveného pro průměrnou roční koncentraci (6 ng.m⁻³), ve Zbečně ale přesáhla 90% hodnoty limitu. Na všech třech hodnocených lokalitách téměř s jistotou dochází k překročení imisního limitu v případě benzo[a]pyrenu a v některých letech hrozí nadlimitní koncentrace také v případě suspendovaných částic PM_{2,5}. Naměřené koncentrace arсенu se v Libušíně a Švermově pohybovaly s významnou rezervou pod úrovní imisního limitu a k jeho překročení pravděpodobně nedochází. Odlišná situace je z hlediska arсенu ve Zbečně, kde s přihlédnutím k nejistotám hodnocení a příznivým rozptylovým podmínkám v roce projektového měření hrozí v jiných letech překračování příslušného imisního limitu. S ohledem na zjištěné velké lokální rozdíly v imisních koncentracích této látky je na Kladensku pravděpodobná existence i dalších místních anomálií s nadlimitní úrovní znečištění. Výsledky potvrzují emisně neuspokojivou situaci arсенu v oblasti vymezené trojúhelníkem Plzeň – Praha – Louny, která je indikována monitoringem realizovaným v rámci výsledku V3 projektu TAČR TITSMZP704 v Příšově a Hřivicích.

Rozdíly v zastoupení hmotnostně nejvýznamnějších typů částic na jednotlivých lokalitách byly poměrně malé. Většinu hmoty suspendovaných částic PM_{2,5} tvořil organický a elementární

uhlík. Druhou nejvíce zastoupenou skupinou látek byly dusičnany a sírany, převážně sekundárního původu, zejména dusičnan a síran amonný. V chladné části roku výrazně narostl absolutní podíl organického i elementárního uhlíku a absolutní i relativní podíl dusičnanů, zatímco podíl síranů zůstal v absolutní úrovni přibližně stejný jako v létě.

Odchytky výsledků hodnocení založeného na rozdílných metodách prvkové analýzy (ICP-MS a ED XRF) jsou z hlediska závěrů identifikace zdrojů nevýznamné, tzn., nehrají roli z hlediska nasměrování případných strategických kroků v ochraně ovzduší. Některé zjištěné nedostatky a nejistoty provedených prací ztěžovaly interpretaci výsledků, ale byly řešitelné zvýšením nejistoty kvantifikovaných podílů jednotlivých typů znečištění a neohrožují proto platnost následujících závěrů.

Pomocí modelu PMF bylo identifikováno následujících 8 faktorů, které se v posuzovaných třech lokalitách podílejí na celkové koncentraci suspendovaných částic PM_{2,5}:

- Lokální zdroje znečištění:
 - 2 typy individuálního vytápění domácností pevnými palivy, které tvořily hlavní lokální zdroj znečištění (v součtu cca 1/3 až téměř 1/2 koncentrace PM_{2,5}),
 - částice minerální povahy téměř výhradně přírodního původu (cca 10 % až 20 %),
 - primární částice z automobilové dopravy (max. 10 % v silně zatížených lokalitách a první jednotky % ve vesnických lokalitách).
- Regionální a nadregionální typy znečištění:
 - Dusičnan amonný (cca 10 až 20 %),
 - Síran amonný (cca 15 % až 20 %),
 - Průmyslová energetika (nejpravděpodobněji 10 až 15 %, s přihlédnutím k vyšším nejistotám hodnocení v krajním případě max. 20 %),
 - Mořská sůl (první jednotky %).

V rámci vytápění domácností pevnými palivy bylo možno vyčlenit samostatný faktor reprezentující spalování méně kvalitního uhlí z hlediska obsahu arsenu. Významně vyšší vliv tohoto faktoru oproti ostatním dvěma lokalitám byl identifikován ve Zbečně.

Hlavní část znečištění regionálního a nadregionálního původu byla tvořena sekundárním aerosolem (dusičnan amonný, síran amonný a průmyslová energetika). Podíl sekundárních částic tvořil v souhrnu teplé i chladné části roku téměř polovinu znečištění, přičemž v teplé polovině roku byl z důvodu absence vlivu vytápění domácností dominantní. Průmyslová energetika se v létě projevovala především zvýšením síranových iontů Ca a Mg, zatímco v chladném období významně zvyšovala koncentraci síranu amonného.

Ze zpracování údajů o směru a rychlosti proudění v době měřicích kampaní pomocí zpětných trajektorií vyplývá, že většina dusičnanu a síranu amonného, tedy hlavní části sekundárního znečištění, měla regionální původ. To indikuje, že případným snížením emisí prekurzorů (oxidů dusíku a oxidu siřičitého) na území ČR, popř. v blízkém příhraničí, lze dosáhnout významného snížení imisních koncentrací PM_{2,5}.

S výjimkou velkých spalovacích zařízení nebyl provedenými pracemi na Kladensku identifikován významný vliv průmyslových zdrojů na kvalitu ovzduší. Vliv provozu nedalekého kamenolomu Sýkořice ve Zbečně se v hodnoceném období na kvalitě ovzduší významně neprojevil. Přírozená resuspenze minerálních částic ve Švermově a Libušíně měla na kvalitu ovzduší vyšší vliv, než provoz zmíněného kamenolomu ve Zbečně.

Z porovnání výsledků transportního modelu CAMx použitého pro analytickou část PZKO 2020+ a receptorového modelu PMF je zřejmá vysoká míra shody, pokud jde o podíl

individuálního vytápění, nejvýznamnějšího tuzemského zdroje primárních částic. Významná odchylka uvedených dvou modelů byla zjištěna v případě podílu sekundárního aerosolu. I přes odlišné přístupy obou modelů jsou hlavní faktory kvality ovzduší kvantifikovány do té míry podobně, že vedou ke stejným hlavním prioritám ochrany ovzduší. V souladu se závěry v analytických podkladech pro PZKO 2020+ vyplývají z vypracovaného receptorového modelu PMF shodné **prioritní skupiny zdrojů, na které je nutné cílit budoucí opatření, tj. individuální vytápění domácností pevnými palivy a zdroje prekurzorů sekundárních částic.**

Hlavní prioritou ochrany ovzduší na Kladensku je snížit emise z vytápění domácností, ideálně náhradou za bezemisní zdroje nebo přechodem na plynná paliva, popř. automatické kotle na biomasu. Tím dojde nejen ke snížení koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5}, ale především nadlimitního benzo[a]pyrenu, a také koncentrace arsenu.

Vznik sekundárních částic na Kladensku je významnou měrou spojen s provozem převážně tuzemských velkých uhelných energetických zdrojů (odhadem třetina až polovina sekundárního aerosolu). Pro snížení koncentrace suspendovaných částic PM_{2,5} na Kladensku je proto i nadále **vhodné snižovat emise oxidů dusíku a oxidu siřičitého z velkých spalovacích zařízení ve Středočeském, Královéhradeckém, Pardubickém a Ústeckém kraji.** Je velmi pravděpodobné, i když na základě provedených analýz méně průkazné, že koncentraci sekundárního aerosolu na Kladensku, především dusičnanu amonného, významně zvyšuje také automobilová doprava v aglomeraci Praha a emise z individuálního vytápění domácností. S ohledem na regionálně vysoké koncentrace dusičnanů v chladné části roku lze doporučit **posílení regionálně zaměřených opatření ke snížení dopravních emisí NO_x,** a to zejména v aglomeraci Praha a dopravně exponovaných koridorech Středočeského kraje.

Opatření zaměřená na další faktory kvality ovzduší na Kladensku mohou být účelná pouze na lokální úrovni, ale nejsou regionální prioritou. Je u nich vhodné podrobné posouzení konkrétního opatření.