

**Samostatná příloha zprávy „KONCENTRACE SUSPENDOVANÝCH
ČÁSTIC PM₁₀ a PM_{2,5} NA STANICÍCH UHELNÁ A HORNÍ VÍTKOV,
Zpráva za období 1. 1. 2023 – 31. 12. 2023“**

Identifikace příčin znečištění ovzduší v Uhelné

Zpráva v rámci dílčího cíle 2.1 Zlepšení identifikace zdrojů
znečištění

Na základě odběru vzorků atmosférického aerosolu a měření směru a rychlosti větru v lokalitě Uhelná byly vyhodnoceny příčiny znečištění ovzduší suspendovanými částicemi v období 1. 1. až 31. 12. 2023. Součástí hodnocení je vyčíslení podílu významných zdrojů znečišťování ovzduší a typů znečištění na průměrné roční koncentraci PM₁₀ v této lokalitě, včetně vlivu povrchové těžby uhlí v lomu Turów.

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

Autoři: Radim Seibert, Markéta Schreiberová, Leona Vlasáková, Vladimíra Volná,
Daniel Hladký, Blanka Krejčí, Irina Nikolova

Datum: 4. 4. 2024

Obsah

1. Úvod	4
2. Měřicí lokalita a meteorologické podmínky	4
3. Rozsah a metodika prací	6
3.1. Metody měření a vzorkování	6
3.2. Metody laboratorních analýz.....	6
3.3. Metody vyhodnocení	6
4. Výsledky	9
4.1. Složení aerosolu PM ₁₀	9
4.2. Faktory kvality ovzduší	9
4.3. Velikostní složení částic	12
4.4. Zdrojové oblasti znečištění	13
4.5. Podíly zdrojů a typů znečištění na koncentraci PM ₁₀	16
5. Závěr	18
Literatura	19

Seznam obrázků:

<i>Obr. 1</i>	<i>Větrná růžice (vlevo) a četnost rozptylových podmínek (vpravo) v lokalitě Uhelná v roce 2023.</i>	<i>5</i>
<i>Obr. 2</i>	<i>Měsíční četnosti výskytu rozptylových podmínek v lokalitě Uhelná v roce 2023.</i>	<i>5</i>
<i>Obr. 3</i>	<i>Rozptylový diagram hmotnostní koncentrace PM stanovené optickou a gravimetrickou metodou ..</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 4</i>	<i>Hlavní složky aerosolu PM₁₀</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 5</i>	<i>Klastrová korelační matice faktorových příspěvků vůči frakcím PM (metoda Pearson).</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 6</i>	<i>Relativní koncentrační růžice faktorových příspěvků, normalizovaná podle sektorů směrů větru.</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 7</i>	<i>Vliv transportu znečištění z různých směrů na koncentraci PM₁₀.</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 8</i>	<i>Sezonní příspěvky identifikovaných faktorů ke koncentraci PM₁₀.</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 9</i>	<i>Podíl identifikovaných faktorů na průměrné roční koncentraci PM₁₀.</i>	<i>17</i>

Seznam tabulek:

<i>Tab. 1</i>	<i>Roční průměrná a 36. nejvyšší denní koncentrace PM₁₀ na stanici Uhelná, 2021–2023 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]... ..</i>	<i>4</i>
<i>Tab. 2</i>	<i>Metody měření a režim vzorkování.....</i>	<i>6</i>

Seznam příloh:

- Příloha 1: Chemické profily identifikovaných faktorů
Příloha 2: Časové řady identifikovaných faktorů
Příloha 3: Faktorové imisní příspěvky vzhledem k DTP

Seznam zkratk:

BaA	benzo[<i>a</i>]antracen
BaP	benzo[<i>a</i>]pyren
BeP	benzo[<i>e</i>]pyren
BbF	benzo[<i>b</i>]fluoranten
BghiPRL	benzo[<i>g,h,i</i>]perylene
BjF	benzo[<i>j</i>]fluoranten
BkF	benzo[<i>k</i>]fluoranten
COR	koronen
CRY	chrysen
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
DBahA	dibenzo[<i>a,h</i>]antracen
DTP	denní typ proudění
ICP-MS	hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
I123cdP	indeno[<i>1,2,3-cd</i>]pyren
PAH	polycyklické aromatické uhlovodíky
PIC	picen
PM	suspendované částice, atmosférický aerosol
PM ₁₀	suspendované částice PM ₁₀
PRL	perylene
RET	reten
UTC	světový čas (SEČ – 1hod)
XRF	Rentgenová fluorescence

1. Úvod

V rámci projektu ARAMIS¹, dílčího cíle 2.1, byla v období 1. 1. 2023 – 31. 12. 2023 provedena měřicí kampaň pro vyhodnocení příčin znečištění ovzduší v lokalitě Uhelná. Výsledky monitoringu byly následně využity k identifikaci hlavních typů a zdrojů znečištění pomocí receptorového modelování a vyčíslení jejich podílu na celkové imisní koncentraci PM₁₀, včetně vlivu přenosu znečištění z povrchového hnědouhelného dolu Turów.

Na uvedené projektové aktivitě se na straně ČHMÚ podíleli:

- Petr Goll, Jan Kufel: montáž, obsluha a údržba přístrojové techniky,
- Radim Seibert, Markéta Schreiberová, Leona Vlasáková, Vladimíra Volná, Daniel Hladký, Blanka Krejčí: vyhodnocení a odborná zpráva,
- Irina Nikolova: konzultace ke koncentracím PAH a hopanů.

2. Měřicí lokalita a meteorologické podmínky

Lokalita Uhelná (LUHL) se nachází v Libereckém kraji, na východním okraji obce Uhelná, GPS: 50.866230, 14.902450. Stanice je umístěna na zatravněném pozemku. Jedná se o dobře provětrávanou lokalitu na nevýrazné vyvýšenině v nadmořské výšce cca 330 m n. m. Okolní krajina je částečně zastavěná. Stanice je klasifikována jako venkovská pozad'ová (B/R/NA-NCI), s reprezentativností v oblastním měřítku 4 až 50 km².

Významný emisní zdroj lom Turów je od stanice vzdálen cca 2 km severním směrem (Obr. 1). Z regionálně významných zdrojů mají potenciální vliv na imisní koncentrace PM₁₀ v okolí stanice elektrárna Turów (cca 14 km severně) a EFTEC (Czech Republic) a.s. - provozovna Hrádek nad Nisou (cca 6 km jihozápadně). Mezi lokální emisní zdroje lze řadit zemědělskou činnost, pískovnu rozkládající se cca 600 m (střed), resp. cca 300 m (nejbližší hrana areálu) v jižním až jihozápadním směru od stanice Uhelná, vytápění domácností a zahradní aktivity v blízkých obcích (domy jsou osídleny částečně trvale, částečně využívány k rekreaci).

Kvalita ovzduší v lokalitě je z hlediska suspendovaných částic v kontextu ČR velmi dobrá. V uplynulých třech letech překročila dolní mez pro posuzování podle zákona č. 201/2012 Sb., v platném znění, pouze jednou, a to v případě 36. nejvyšší 24hodinové koncentrace (viz Tab. 1).

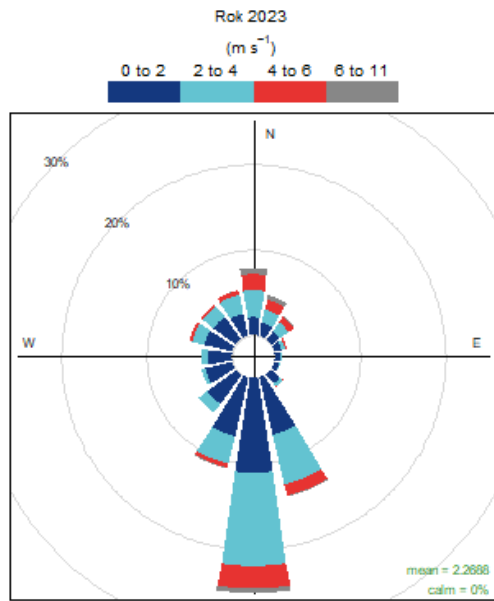
Tab. 1 Roční průměrná a 36. nejvyšší denní koncentrace PM₁₀ na stanici Uhelná, 2021–2023 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

	2021	2022	2023
PM ₁₀ max36	25	29	24
PM ₁₀ roční průměr	15,8	16,9	14,2

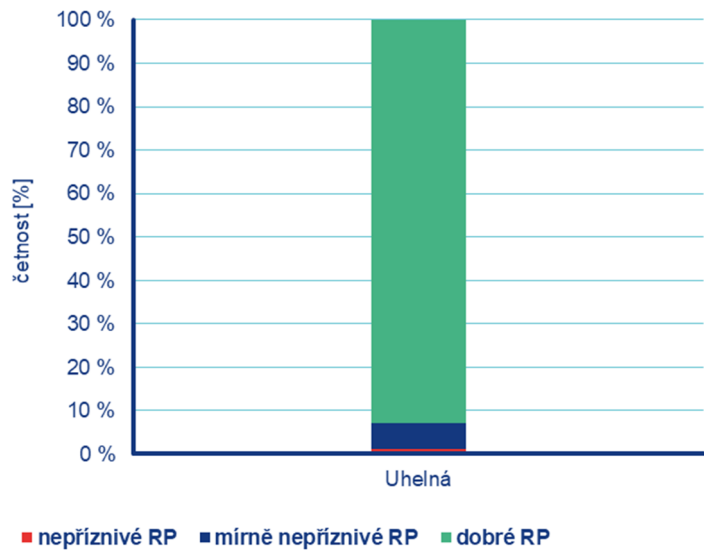
Dobré rozptylové podmínky v lokalitě Uhelná v měřeném roce 2023 lze doložit větrnou růžicí (Obr. 1) a četností výskytu rozptylových podmínek, které jsou založeny na výpočtu ventilačního indexu (Obr. 3). Průměrná rychlost větru dosáhla cca 2,3 m.s⁻¹, mírně nepříznivé rozptylové podmínky trvaly po dobu cca 7 % roční doby a nepříznivé po dobu cca 1 %.

¹ www.projekt-aramis.cz/

² http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/loc_UCHM_CZhtml



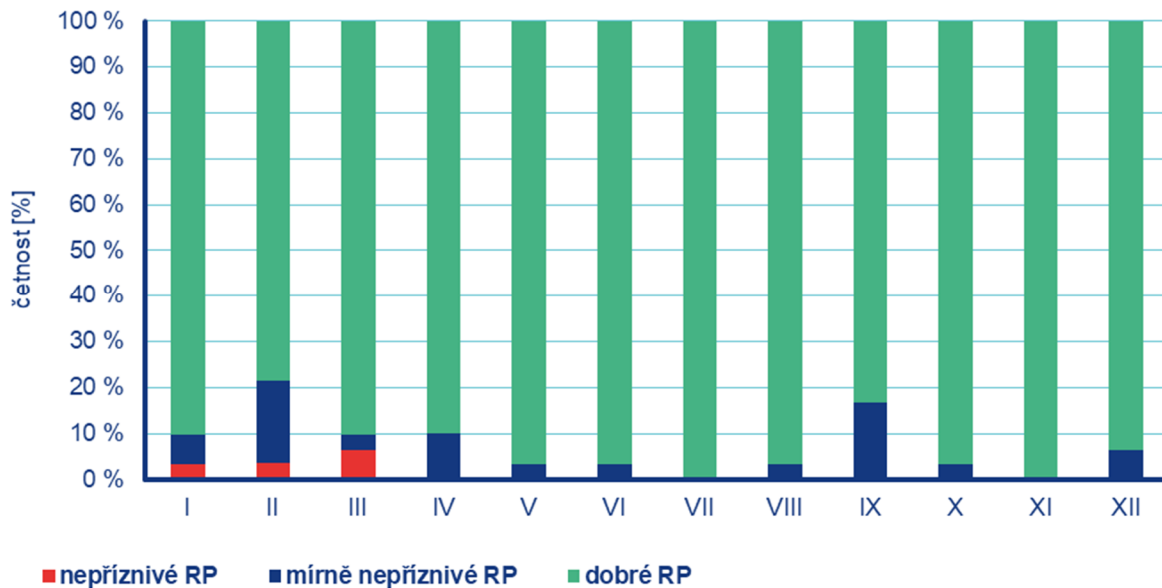
Frequency of counts by wind direction (%)



■ nepříznivé RP ■ mírně nepříznivé RP ■ dobré RP

Obr. 1 Větrná růžice (vlevo) a četnost rozptylových podmínek (vpravo) v lokalitě Uhelná v roce 2023.

Nepříznivé rozptylové podmínky se vyskytly pouze v měsících leden až březen, mírně nepříznivé ve všech měsících s výjimkou července a listopadu, nejčastější byly v únoru a září (viz Obr. 2). Celkově byly oproti ročnímu průměru podmínky pro rozptyl znečištění výrazně horší v lednu až dubnu, září a prosinci.



■ nepříznivé RP ■ mírně nepříznivé RP ■ dobré RP

Obr. 2 Měsíční četnosti výskytu rozptylových podmínek v lokalitě Uhelná v roce 2023.

3. Rozsah a metodika prací

3.1. Metody měření a vzorkování

Metody měření a režim vzorkování pro hodnocení příčin znečištění jsou prezentovány v Tab. 2.

Tab. 2 Metody měření a režim vzorkování

Stanice	Měřený parametr	Interval měření		Jednotka	Metoda měření
		Doba odběru	Interval odběru		
Uhelná (LUHL)	PM ₁₀	1d/3d		μg.m ⁻³	GRV
	PAH, EC/OC	1d/3d		ng.m ⁻³	GC-MS
	prvková analýza, ionty	1d/3d		ng.m ⁻³	XRF
	Směr a rychlost větru	1s		°, m.s ⁻¹	U-SONIC

Vzorky byly odebírány automatickými sekvenčními vzorkovači SEQ (Sven Leckel – Ingenieurbüro GmbH, Německo) s konstantním průtokem 2,3 m³.h⁻¹ se startem odběru v čase 0:00 UTC.

Vzorky pro gravimetrické stanovení PM₁₀, prvkovou analýzu a stanovení koncentrace iontů byly odebírány na teflonové filtry. Pro stanovení elementárního a organického uhlíku, PAH a hopanů byly použity křemenné filtry.

3.2. Metody laboratorních analýz

Všechny vzorky byly laboratorně analyzovány v rozsahu:

- hmotnostní koncentrace suspendovaných částic PM₁₀,
- OC, EC včetně teplotně rozlišených frakcí OC1 až OC4, resp. EC1 až EC4,
- ionty: SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, Br⁻, F⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺,
- PAH: benzo[*a*]antracen, chrysen, benzo[*b*]fluoranten, benzo[*j*]fluoranten, benzo[*k*]fluoranten, benzo[*a*]pyren, dibenzo[*a,h*]antracen, benzo[*ghi*]perylene, indeno[*1,2,3-cd*]pyren,
- hopany: ααα.20S-Cholestan, αββ.(20R)-Cholestan, ααα.20R-Cholestan, αββ.20R.24S-Methylcholestan, αββ.20R.24R-Ethylcholestan, ααα.20R.24R-Ethylcholestan, 17α(H)-22,29,30-Trisnorhopan, 17α(H),21β(H)-30-Norhopan, 17α(H),21β(H)-Hopan, 17β(H),21α(H)-Hopan, 17α(H),21β(H)-22S-Homohopan, 17α(H),21β(H)-22R-Homohopan,
- prvkové složení: Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, In, Sn, Sb, Ba, Pb,
- anhydrosacharidy (iontová chromatografie): levoglucosan, mannosan, galactosan.

Součástí odběrů a rozborů byly polní slepé vzorky (min. 5 % řádných vzorků pro každou z použitých metod). Chemické rozborů byly provedeny v laboratořích ČHMÚ, pobočce Ostrava (prvkové složení, elementární a organický uhlík, ionty a anhydrosacharidy) a pobočce Ústí nad Labem (PAH a hopany).

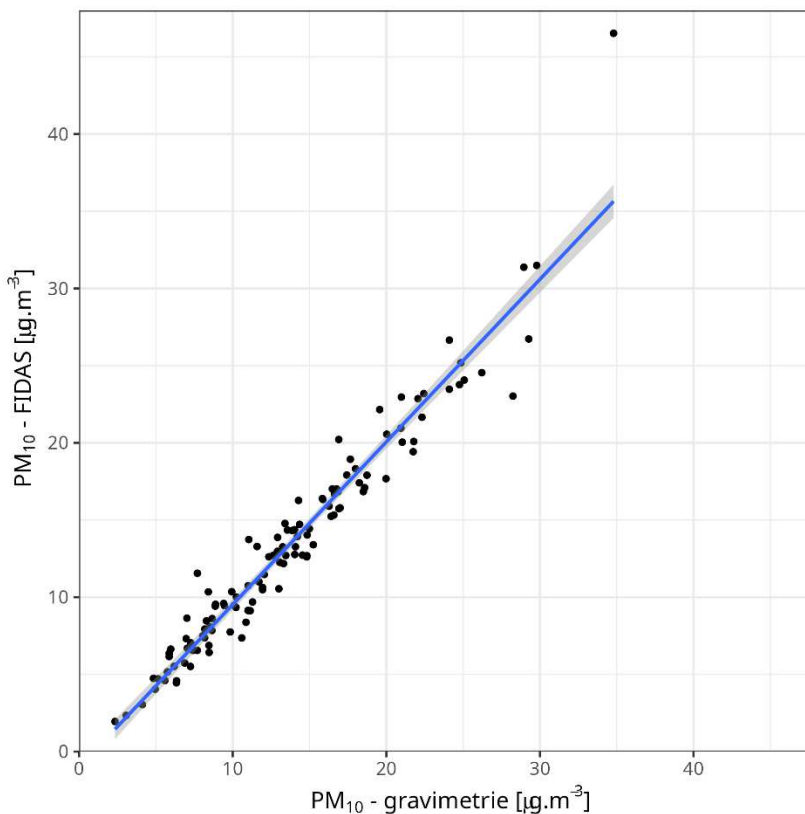
3.3. Metody vyhodnocení

Identifikace zdrojů znečištění ovzduší a kvantifikace jejich podílů na celkovém znečištění PM₁₀ byla provedena na základě receptorového modelu PMF (positive matrix factorization). Jedná se o mnohorozměrnou faktorovou analýzu, založenou na vzájemných korelacích časových řad imisních koncentrací jednotlivých analytů a jejich skupin. Analyty s podobným časovým průběhem jsou modelem seskupeny do tzv. faktorů.

Tyto identifikované faktory reprezentují konkrétní zdroje nebo skupiny zdrojů znečišťování ovzduší, které v posuzované lokalitě přispívají ke znečištění ovzduší zájmovou látkou.

V modelu PMF bylo použito 122 vzorků ovzduší. Modelování proběhlo v souladu s požadavky manuálu k programu PMF 5.0 [Norris a kol., 2014]. Po vyloučení hmotnostních duplicit bylo kromě PM_{10} v modelu použito celkem 38 analytů, které dosahovaly potřebného poměru signál/šum: celkem 8 teplotně rozlišených frakcí organického a elementárního uhlíku, 2 anhydrosacharidy, 5 zástupců iontů, 17 prvků, 4 PAH a 2 hopany.

V lokalitě Uhelná byla po celý rok paralelně měřena koncentrace suspendovaných částic optickou metodou (FIDAS 200) a gravimetricky. Jako totální proměnná (analyt, který zahrnuje hmotnostní koncentraci všech ostatních měřených analytů) byla pro model PMF použita gravimetricky stanovená koncentrace PM_{10} ze vzorků na teflonových filtrech. Rozptylový diagram těchto dvou metod je obsahem Obr. 3. Vzájemná korelace metod je vyjádřena koeficientem $R^2=0,98$ (Pearson).



Obr. 3 Rozptylový diagram hmotnostní koncentrace PM stanovené optickou a gravimetrickou metodou

V průběhu modelování musely být pro zajištění stability modelu vyloučeny následující dny:

- 1. 1. 2023: Vliv silvestrovských oslav způsobující extrémní a statisticky nevysvětlitelný pík široké škály prvků,
- 1. 5. 2023: Špičkové koncentrace cholestanů v doprovodu nízkoteplotního uhlíku, mírně zvýšené PAH, třetí nejvyšší koncentrace anhydrosacharidů, mírně zvýšený draslík – pravděpodobný vliv oslav u příležitosti pálení čarodějnic,
- 21. 7. 2023: Extrémně vysoká hodnota Ca, Mg, F⁻, OC4 a druhá nejvyšší koncentrace PM_{10} při denním typu proudění od S-SV. Příčinu tohoto pravděpodobně reálného extrému (projevil se u různých nezávislých metod) se nepodařilo identifikovat.

Model PMF byl odladěn s 8 faktory, poměrem $Q(\text{true})/Q_{\text{exp}}=1,01$, přidanou nejistotou 6,7 % a korelací mezi skutečně naměřenou a modelovou koncentrací PM_{10} s $R^2 = 0,94$. Metoda displacement (DISP) prokázala

nízkou rotační nejednoznačnost modelového řešení (pokles hodnoty Q v průběhu DISP testu o $-0,013$). Stabilita řešení byla ověřena metodou bootstrap (BS). BS test základního modelu (Base Run) se vyznačoval ≥ 80 % shodných běhů. Řešení bylo proto rotováno s hodnotou $F_{\text{peak}} = -0,5$. Po této úpravě proběhl BS test u všech faktorů se >95 % shodných běhů, reprodukovatelnost faktorů je teď dobrá. Předkládané vyhodnocení je založeno na tomto stabilnějším rotovaném řešení.

Po vypracování modelu PMF byly modelem vypočtené imisní příspěvky jednotlivých faktorů spárovány s denními typy proudění (DTP) [Volná a kol., 2022]. Lze předpokládat, že z důvodu 24hodinové doby odběru vzorků, během které mohlo docházet k významným změnám směru větru, je metoda DTP reprezentativnější, než běžněji využívaný vektorový průměr směru a rychlosti větru. Výpočet DTP probíhá pomocí interní metodiky ČHMÚ z hodinových hodnot směru a rychlosti větru. Pro výpočet se využívají údaje směru a rychlosti větru v daném místě. Na základě metodiky je možné určit DTP pro 8 základních směrů (S, SV, SZ, V, Z, J, JZ, JV), případně sektorů pro dva směry nacházející se vedle sebe (S–SV, S–SZ, J–JZ, J–JV, JV–V, SV–V, JZ–Z, SZ–Z), dále pro bezvětří ($\leq 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a proměnlivý vítr [Volná a kol., 2022]. Vektorový průměr směru větru byl použit pro orientační posouzení původu znečištění podle koncentračních růžic.

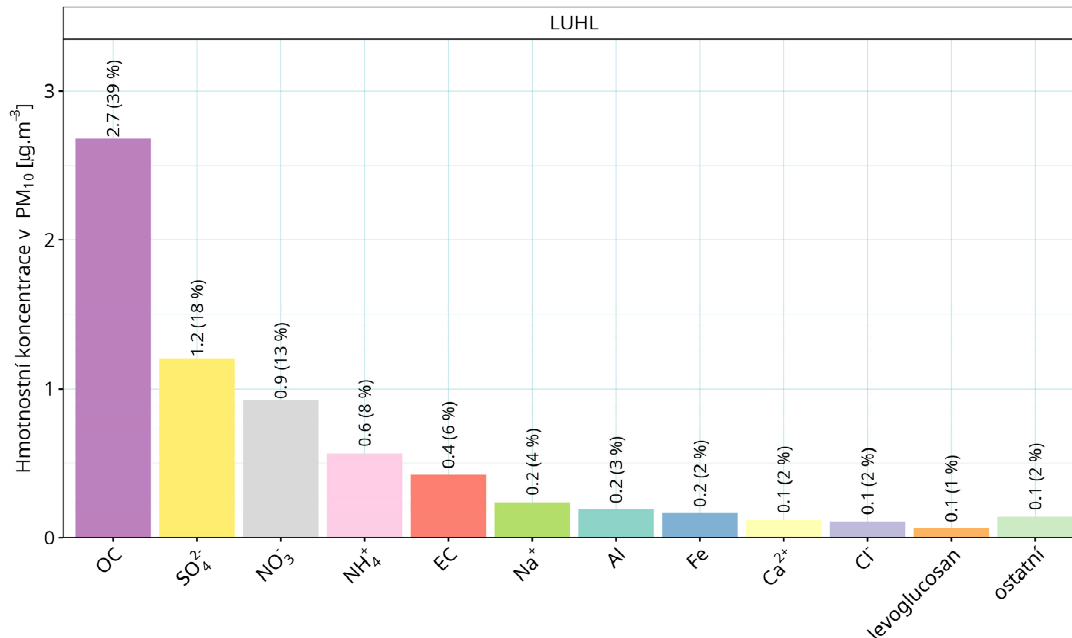
Výsledky modelu PMF byly zpracovány také dalšími metodami s cílem odhadnout zdrojové oblasti jednotlivých identifikovaných typů znečištění. Výstupy byly vizualizovány krabicovými diagramy, sloupcovými grafy a koncentračními růžicemi.

Ke statistickému zpracování a prezentaci naměřených dat byl využit R software.

4. Výsledky

4.1. Složení aerosolu PM₁₀

Pro identifikaci příčin znečištění provedeny širokospektrální analýzy, které umožnily určit chemické složení suspendovaných částic PM₁₀ (viz Obr. 4).



Obr. 4 Hlavní složky aerosolu PM₁₀

Podobně jako je obvyklé v jiných lokalitách ČR byl aerosol PM₁₀ tvořen především organickým uhlíkem, sírany a dusičnany. Tyto složky spolu tvořily 70 % hmoty PM₁₀. Pětiprocentní hranici hmotnostního podílu překročily také amonné ionty a elementární uhlík. Podíl 1 % hmoty aerosolu přesáhl dále sodík, chlor, hliník, železo a vápník, z organických sloučenin pouze levoglucosan. V kontextu ČR zjištěná skladba PM₁₀ v zásadě odpovídá dřívějším výzkumům. Za zvýšené lze považovat pouze zastoupení hliníku. Více než 2 % tohoto prvku bylo v rámci prací ČHMÚ zjištěno v atmosférickém aerosolu PM₁₀ pouze v blízkosti hnědouhelných lomů v lokalitách Tušimice, Lom a Most-letišť, jinde se vždy jeho podíl pohyboval pod 1 %.

4.2. Faktory kvality ovzduší

Modelem PMF bylo identifikováno 8 faktorů, které ovlivňovaly koncentraci PM₁₀. Jsou popsány v následujícím textu.

NH₄NO₃

Zimní typ sekundárního aerosolu, tvořený převážně dusičnanem amonným. Faktorový imisní příspěvek se v letním období blížil nule. Časový chod faktorového příspěvku naznačuje lokální až regionální původ. Zdrojem prekurzorů mohou být vytápění domácností, automobilová doprava i elektrárenské emise. Průkazný zásadní dopad vytápění domácností biomasou na vznik tohoto druhu znečištění byl za rok 2023 vyhodnocen na požadové lokalitě v Mostech u Jablunkova [Seibert a kol., 2024].

NH₄SO₄

Sekundární síran amonný, doprovázený bromidy, arsenem, selenem a olovem. Z uhlíkatých částic vykazuje relativně zvýšený podíl nízkoteplotní frakce. Koncentrace hopanů ve faktorovém profilu byly nízké,

s vysokým homohopanovým indexem (převaha S-Homohopanu). Reprezentuje sekundární částice vznikající především z antropogenních emisí, zejména při průmyslovém spalování uhlí, dominantně v energetice. Relativně zvýšené zastoupení nízkoteplotní frakce organického a elementárního uhlíku indikuje, že by tento typ znečištění mohl částečně souviset s emisemi ze spalování uhlí v domácnostech, ale s ohledem na vysoký homohopanový index je to nepravděpodobné, popř. je podíl domácností na faktorovém příspěvku velmi malý (většinové spalování vysoce jakostního černého uhlí v domácnostech nelze předpokládat, obvyklá je převaha R-Homohopanu).

MINER_PŮDA

Částice minerálního složení s letním maximem a zimním minimem imisního příspěvku. Z hlediska relativního zastoupení prvků jsou tvořeny nejvíce vápníkem, křemíkem, železem, manganem, hořčíkem a stronciem. Hmotnostně ve faktoru převažují sírany, vyskytující se v násobně nižších koncentracích oproti faktoru NH_4SO_4 , dále křemík, vápník, železo a nízkoteplotní uhlíkaté částice. Zastoupení síranů a uhlíkatých částic v dominantně minerálním faktoru je podle dosavadních prací ČHMÚ běžné. Je vysvětlitelné tím, že faktor reprezentuje směs místních primárních minerálních částic z půdy okolních polí, místní pískovny (hrana areálu cca 300 m jihozápadním směrem od měřicího místa) a složením a původem stejných částic z větších vzdáleností, včetně epizod přenosu částic z pouštních a stepních oblastí. Během transportu pravděpodobně dochází k agregaci těchto minerálních částic se sírany a uhlíkatými částicemi, které jsou v atmosféře téměř vždy hojně zastoupeny (viz hmotnostní složení PM_{10} v kap. 4.1). V roce 2023 byl podobný typ znečištění podrobněji interpretován na pozadové lokalitě v Mostech u Jablunkova [Seibert a kol., 2024]. U délky transportovaných půdních částic lze kromě agregace předpokládat také vliv katalytické funkce kovů při konverzi SO_2 na sírany, a to jak ve vodní fázi, tak heterogenními reakcemi na povrchu částic [Clemets et al., 2013; Wang et al., 2022; Sun et al., 2024].

MINER_TĚŽBA

Tento faktor byl během zpracování modelu PMF velmi stabilní a byl identifikován při všech modelových bězích s počtem faktorů 6 až 10. Z toho vyplývá, že se jedná o statisticky výrazně chemicky odlišný typ znečištění oproti faktoru MINER_PŮDA, a že má reálný základ, tzn., odpovídá skutečně existujícímu typu znečištění, resp. zdroje. Podobně jako u faktoru MINER_PŮDA se jedná o částice minerálního složení s letním maximem a zimním minimem imisního příspěvku. Oproti faktoru MINER_PŮDA se vyznačuje vyšším zastoupením hliníku (opačný poměr Al/Si), zásadně nižším podílem vápníku, železa a manganu, opačným poměr Sr/Ba (zde více barya), zřetelným zastoupením středně až vysokoteplotních frakcí uhlíku a R-Homohopanu. Vyšší zastoupení hliníku, barya a středních teplotně rozlišených frakcí uhlíku je obvyklé v blízkosti hnědouhelných povrchových dolů. Bylo zjištěno v lokalitách Lom a Most-letišť, kde v rámci projektu ARAMIS proběhla identifikace zdrojů na základě měření v roce 2022 [Seibert a kol., 2023a]. Vyšší výskyt barya, související s těžbou hnědého uhlí v Podkrušnohorské pánvi, byl oproti obvyklým poměrům v ČR zjištěn také v rámci dřívějšího projektu, zaměřeného na resuspenzi PM_{10} z vozovek [Seibert a kol., 2023b]. Za zmínku stojí také odlišnost mezi zmíněnými dvěma minerálními faktory spočívající v zanedbatelném obsahu síranů ve faktoru MINER_TĚŽBA, což naznačuje, že tento faktor, na rozdíl od faktoru MINER_PŮDA, neobsahuje dálkově přenášený aerosol (viz výše zmíněné mechanismy agregace částic a oxidace SO_2).

Uvedené skutečnosti v souhrnu vedou k závěru, že faktor MINER_TĚŽBA souvisí s povrchovou těžbou hnědého uhlí. S ohledem na umístění měřicího místa se jedná pravděpodobně o fugitivní úlet z areálu dolu Turów. To potvrzuje i dominantní přenos tohoto znečištění ze severního směru, tedy od zmíněného dolu, přestože převládající směr větru v lokalitě byl jižní (viz Obr. 1). Jedná se o jediný z identifikovaných faktorů, jehož průměrný roční příspěvek k PM_{10} byl způsoben přenosem převážně ze severních směrů (viz odhad zdrojových oblastí znečištění v kap. 4.3). Uvedenou interpretaci podporuje i granulometrické složení částic (viz podkapitola níže).

SŮL

Faktor se silně kolísavým imisním příspěvkem se špičkovými koncentracemi vyskytujícími se nepravidelně po celý rok. Z hlediska relativního zastoupení faktoru dominuje sodík, chlor a hořčík. Z důvodu stejných mechanismů, jaké jsou popsány u faktoru MINER_PŮDA, se v absolutních koncentracích na faktorovém příspěvku významně podílely i sírany a dusičnany. Stopově jsou přítomny uhlíkaté částice (výhradně vysokoteplotní frakce), pravděpodobně nasedlé během transportu na povrchu ostatních částic. Faktor byl interpretován jako dálkově transportovaná mořská sůl.

VYS_TEPL_C

Celoročně se vyskytující typ znečištění s velmi nízkou kolísavostí mezi měřicími dny, ale s násobně zvýšenými hodnotami v teplé části roku. V procentuálním i hmotnostním zastoupení ve faktoru násobně převažují vysokoteplotní uhlíkaté částice. Relativně jsou zde z prvků výrazně zastoupeny také měď, železo, mangan, selen, hořčík, draslík a další kovy. Z organických sloučenin zásadně převažuje S-Homohopan nad R-homohopanem. V absolutních koncentracích se na faktorovém příspěvku podílí kromě zmíněných analytů také sírany a dusičnany.

Faktor obdobného složení se standardně vyskytuje ve všech receptorových modelech, zpracovaných ČHMÚ v posledních letech. Jedná se pravděpodobně o smíšený faktor, ve kterém jsou indikovány automobilové emise (spíše vysokoteplotní frakce uhlíku v kombinaci s Cu, Zn, případně S-Homohopanem). Ve srovnání s ostatními faktory jsou zde relativně zvýšeny obsahy kovů, sodíku a hořčíku, které jsou markery průmyslového spalování fosilních paliv, popř. lodní dopravy, a mohly by naznačovat dálkový přenos z přímořských oblastí. Pro dálkový přenos hovoří také již zmíněná extrémně nízká kolísavost imisního příspěvku. Jak ale vyplývá z výrazného ročního chodu, významnou roli zde hrají pravděpodobně fotochemické procesy formace sekundárních částic. Teplotní skladba uhlíkatých částic (zvyšující se podíl směrem k OC4 a EC4) je charakteristická a směrové analýzy výsledků modelů PMF z poslední doby neukazují na žádnou konkrétní zdrojovou oblast tohoto typu znečištění nebo indikují vyšší imisní příspěvek faktoru při proudění ze směru od horských oblastí bez významných zdrojů.

V návaznosti na výše uvedené skutečnosti se pravděpodobně jedná o smíšený faktor zahrnující vliv regionálně až nadregionálně přenášených primárních aerosolů z dopravy nebo průmyslu (nebylo možné odlišit) a lokální až regionální biogenní sekundární organický aerosol vznikající z těkavých organických látek produkovaných zejména jehličnatými lesy. Pro rozdělení smíšeného faktoru VYS_TEPL_C na jednotlivé zmíněné typy znečištění chybí v portfoliu analytů, které aktuálně ČHMÚ sleduje při identifikaci zdrojů, odpovídající organické markery. S postupným zlepšováním kvality ovzduší v ČR nabývají přírodní aerosoly na významu. Obdobné faktory, jako zde označený VYS_TEPL_C, tvoří již podle dosavadních receptorových modelů ČHMÚ významnou část znečištění PM₁₀ a PM_{2,5}. V předkládaném hodnocení byl jeho podíl modelově vypočten dokonce jako největší ze všech faktorů (viz kap. 4.4). Kvantifikaci antropogenního podílu na tomto smíšeném faktoru bude proto v následujících výzkumných aktivitách ČHMÚ věnována zvýšená pozornost.

VYT_BIOM

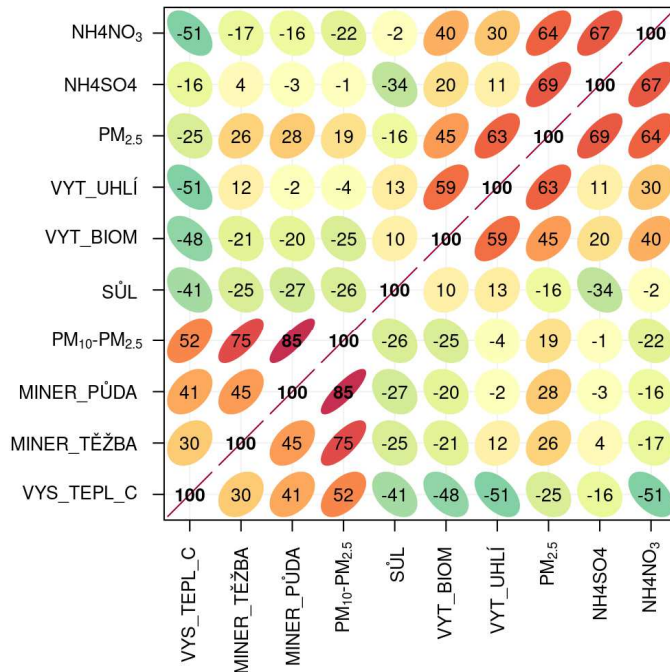
Faktor se vyznačuje v zásadě nízkými modelovými příspěvky mimo topnou sezonu a silně kolísavými v topné sezoně. Na rozdíl od faktoru VYT_UHLÍ se výjimečně vyskytly středně vysoké až vysoké příspěvky i mimo topnou sezonu. Ve faktorovém profilu jednoznačně procentuálně dominují anhydrosacharidy, jejichž obsah hmotnostně předčí pouze nízkoteplotní uhlík. Poměr BaP/BeP naznačuje vyšší stupeň degradace, a tedy vzdálenější původ, než v případě faktoru VYT_UHLÍ. Faktor reprezentuje primární částice pocházející ze spalování biomasy, především při vytápění domácností. Dvě výrazné letní špičky (30. 6. a 30. 7.) 24hodinového imisního příspěvku faktoru VYT_BIOM nastaly při proudění přibližně od jihu a s ohledem na nízký poměr BaP/BeP byly způsobeny pravděpodobně zdroji mimo zástavbu obce Uhelná (transportovány z větší vzdálenosti). Mohly být způsobeny spalováním biomasy v otevřených ohništích nebo lesními požáry.

VYT_UHLÍ

Nejvyšší imisní příspěvky tohoto faktoru byly vypočteny v topné sezoně, v létě naopak nulové. Hmotnostně ve faktoru dominuje nízkoteplotní uhlík. Hmotnostně významně je zastoupen také levoglucosan, ale bez mannosanu, což spolu s nízkým poměrem S-Homohopanu k R-Homohopanu indikuje původ ve spalování hnědého uhlí. Tuto interpretaci podporuje relativní zastoupení prvků, charakteristické zvýšeným obsahem arsenu, olova, zinku a mědi, a také nejvyšší relativní i absolutní koncentrace PAH ze všech faktorů. Dvě nejvyšší 24hodinové hodnoty imisního příspěvku faktoru VYT_UHLÍ (nad $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) se dle modelu vyskytly při proudění ze severních směrů, tedy Polska.

4.3. Velikostní složení částic

Ačkoliv měření velikostního složení částic nebylo v průběhu odběrové kampaně prováděno, orientační představu o rozdílech granulometrie částic umožňují data z paralelního měření frakce PM_{10} a $\text{PM}_{2.5}$ optickým analyzátozem FIDAS 200. Časové řady těchto údajů bylo možno korelovat s imisními příspěvky identifikovaných faktorů. Výsledek této analýzy ukazuje Obr. 5.



Obr. 5 Klasterová korelační matice faktorových příspěvků vůči frakcím PM (metoda Pearson).

Je zřejmé, že spolu s faktorem, interpretovaným jako přírodní minerální prašnost z polí, místní pískovny a dálkového přenosu (MINER_PŮDA), se faktor MINER_TĚŽBA vyznačuje statisticky významnou korelací s hrubou frakcí (PM_{10} - $\text{PM}_{2.5}$). Mírně slabší korelace faktoru MINER_TĚŽBA ($r=0,75$) s hrubou frakcí oproti faktoru MINER_PŮDA ($r=0,85$) lze vysvětlit větší vzdáleností od zdroje, a s ní spojenou sedimentací nejhrubších podílů na migrační trase od lomu Turów k měřicímu místu v Uhelně.

Vysoká korelace faktoru zastupujícího minerální prašnost z půdy a pískovny (MINER_PŮDA) s hrubou frakcí naznačuje, že podíl dálkového přenosu částic na tomto typu znečištění není významný. Stepní a pouštní částice byly pravděpodobně v tomto faktoru zahrnuty, ale vzhledem k jejich menší velikosti, vytrženy během transportu, ovlivňovaly hmotnostní koncentrace podstatně méně než lokální částice z přilehlých polí a místní pískovny.

Identifikované sekundární anorganické aerosoly (faktory NH_4SO_4 A NH_4NO_3) korelují dle Obr. 5 s jemnou frakcí, méně významně i znečištění z vytápění domácností. Tyto skutečnosti jsou v souladu s obvyklou velikostí částic v atmosféře a odpovídají očekáváním.

V případě faktoru VYS_TEPL_C je v Obr. 5 indikována slabá kladná korelace s hrubou frakcí a minerálními faktory, zatímco se sekundárními aerosoly záporná. To zdánlivě odporuje výše uvedené interpretaci tohoto faktoru (sekundární a dálkově přenášené znečištění). V tomto případě se ale jedná pouze o korelaci, nikoliv kauzalitu. Korelace je zde náhodná, způsobená tím, že tento faktor vykazoval vyšší příspěvky v létě, kdy nabývají vyšších hodnot také minerální faktory, a naopak nízké v zimě, kdy byly vysoké imisní příspěvky vytápění a dusičnanu amonného. Náhodnost této závislosti lze doložit tím, že mezi faktorem VYS_TEPL_C a síranem amonným, jehož příspěvek byl ve všech sezónách podobný, záporná korelace zjištěna nebyla, přestože se jedná o faktor reprezentující sekundární, tedy jemné částice.

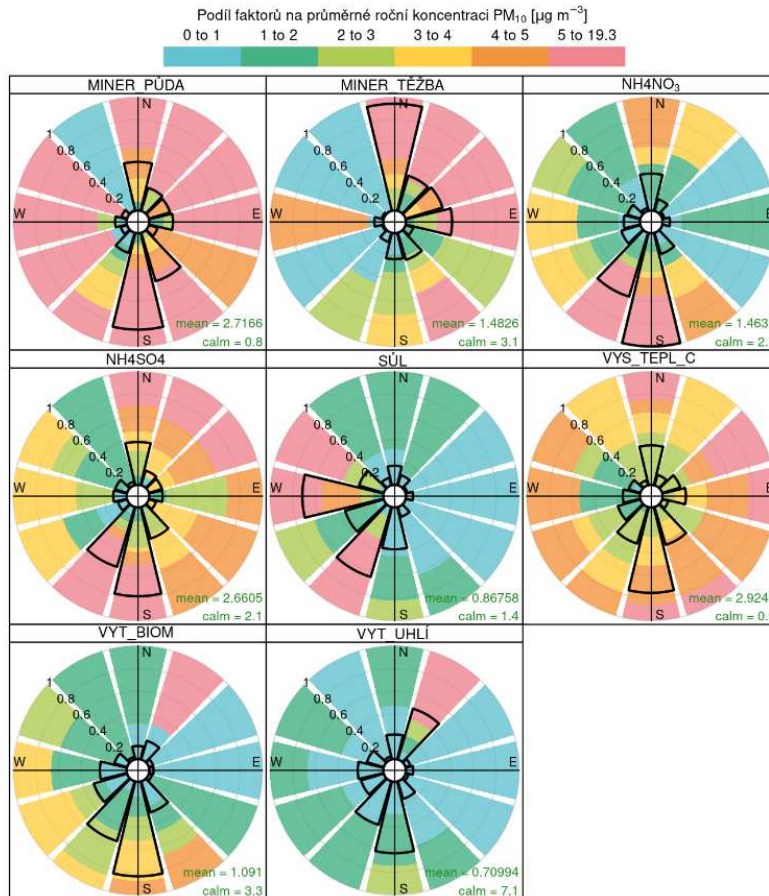
Částice mořské soli (faktor SŮL) nekorelovaly se žádným jiným faktorem ani velikostní frakcí, což může být způsobeno hypoteticky jednak relativně nízkým imisním příspěvkem tohoto faktoru, který neovlivní celkové podíly frakcí PM, jednak tím, že se může jednat o částice střední velikosti (ovlivňují hmotnostně podobně jemnou i hrubou frakci).

4.4. Zdrojové oblasti znečištění

Směr, odkud bylo transportováno znečištění, reprezentované identifikovanými faktory, lze vyčíst z koncentračních růžic na Obr. 6 a krabicových diagramů členěných podle denních typů proudění (Příloha 3).

V kap. 3.3. je zmíněno, že pro model PMF byly využity výsledky získané 24hodinovými odběry vzorků, a hodnocení na základě vektorového průměru směru větru může být méně reprezentativní, než hodnocení založené na denních typech proudění (DTP). Významné rozdíly mezi výsledky těchto dvou metod ale zjištěny nebyly. Oběma metodami lze vysledovat stejné směry ke zdrojovým oblastem znečištění. Pro přehlednost je proto do textu zahrnuta pouze grafika koncentračních růžic.

Velikost a relativní četnost faktorového imisního příspěvku v koncentračních růžicích na Obr. 6 znázorňuje barevná škála. Relativní podíl jednotlivých směrů na celkovém průměrném ročním imisním příspěvku faktorů znázorňují obrysové čáry.



Obr. 6 Relativní koncentrační růžice faktorových příspěvků, normalizovaná podle sektorů směrů větru.

Podle relativních směrově normalizovaných koncentračních růžic (Obr. 6) vykazuje zřetelnou směrovost většina faktorů s výjimkou faktoru VYS_TEPL_C a MINER_PŮDA. V případě těchto faktorů je omezená směrovost dána komplexním původem značištění (lokální zdroje, situované vícero směry od měřicího místa, i dálkový přenos).

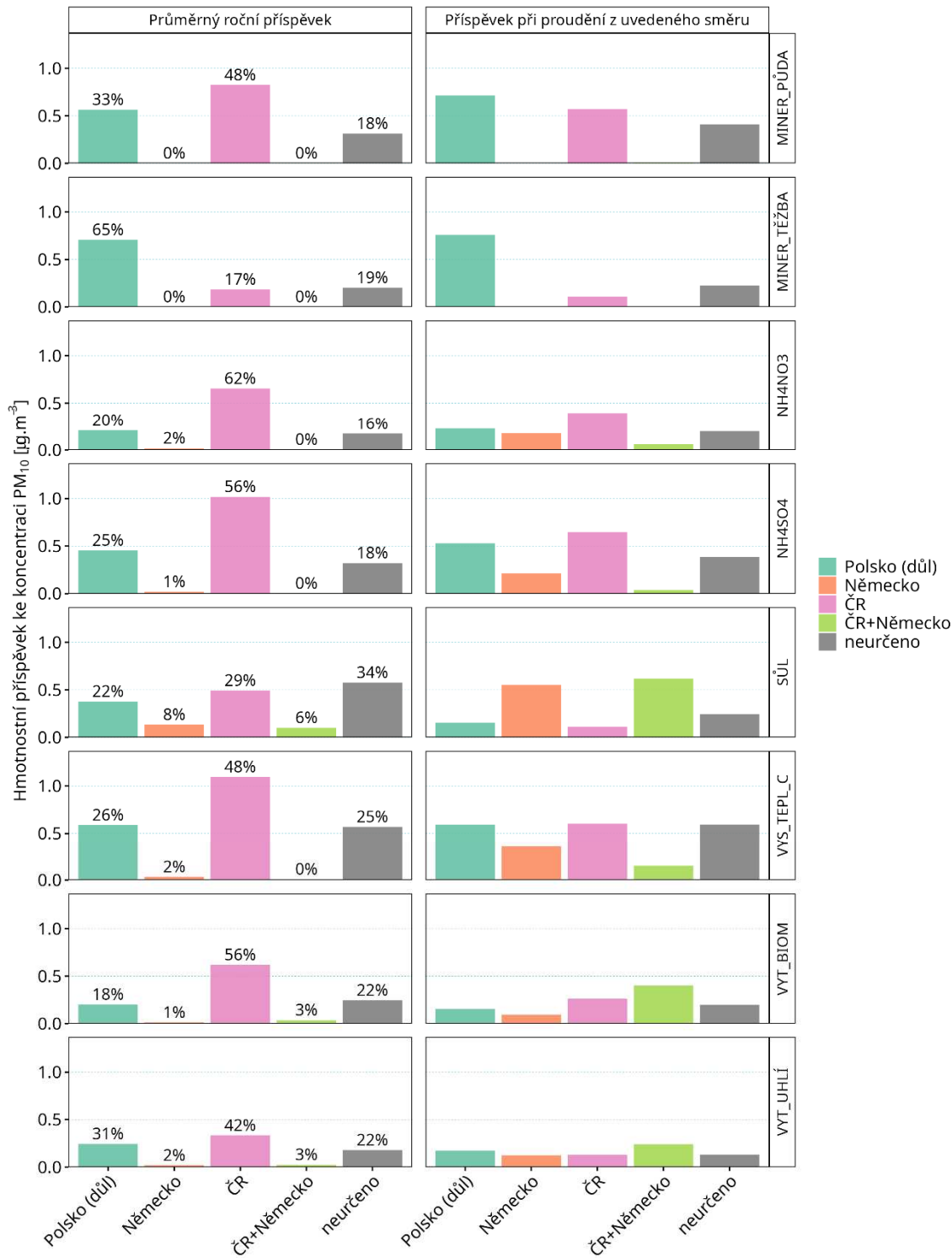
Vysoké imisní příspěvky faktoru MINER_TĚŽBA se podle koncentrační růžice vyskytovaly při proudění od S až V, ale s menší četností také od JV. Tyto směry pouze částečně odpovídají poloze povrchového lomu Turów, který je situován severně od lokality. Nepřesnost může být vysvětlena možnou lokální odchylkou směru větru v měřicím místě vlivem stromů rostoucích cca 10 m Z až SSZ od měřicího místa, a také větrnou resuspencí částic pocházejících původně z lomu Turów, které byly deponovány na zpevněných plochách a jiných površích bez vegetace. To se týká i relativně slabšího příspěvku od JV, protože tímto směrem od měřicího místa se nachází polní cesta a asfaltová komunikace vybíhající z obce Uhelná JV směrem, ze kterých mohla být případná suchá depozice při změně směru větru snadno opětovně suspendována a transportována na měřicí místo.

Imisní příspěvky faktoru SŮL se vyskytovaly při Z až SZ směru větru, a také při JZ proudění, což odpovídá oceánskému proudění, které umožňuje zvýšený dálkový přenos mořského aerosolu.

Vytápění biomasou sice přispívalo k ročnímu průměru celkově nejvíce z J až JZ, tedy souhlasně s převládajícím směrem větru, ale nejvyšší imisní příspěvky nastaly při SV proudění. Emisně nejvýznamnější zdroj emisí vznikajících při vytápění biomasou se proto nachází tímto směrem, tedy v Polsku (obce Opolno-Zdrój, Jasna Góra a město Bogatynia). V případě vytápění uhlím je tato skutečnost ještě patrnější, protože výrazně vyšší imisní příspěvek od SV se v koncentrační růžici projevil i vychýlením průměrného ročního příspěvku tímto směrem.

V případě sekundárního síranu amonného a dusičnanu amonného (faktory NH₄SO₄ A NH₄NO₃) přispívalo k průměrné roční koncentraci nejvíce znečištění transportované od J až JZ, což odpovídá převládajícímu směru proudění v lokalitě (viz větrná růžice na Obr. 1).

Jiný způsob vyjádření směrů, odkud byly identifikované typy znečištění transportovány, je obsahem Obr. 7, který je založen na vyhodnocení imisních příspěvků při různých denních typech proudění.



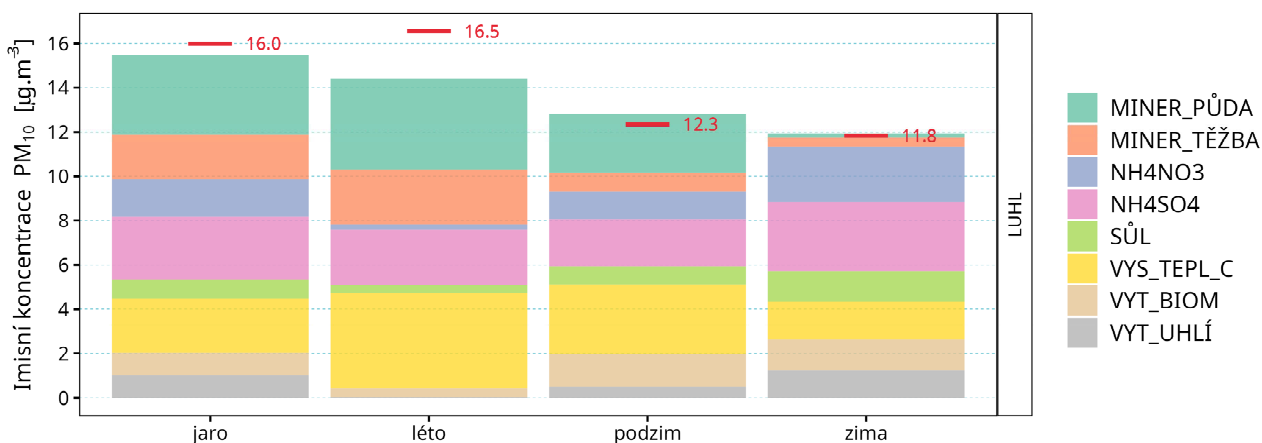
Obr. 7 Vliv transportu znečištění z různých směrů na koncentraci PM₁₀.

Pravá polovina tohoto grafu znázorňuje, jak vysoký byl imisní příspěvek při proudění z příslušného směru, bez ohledu na to, jak často k těmto podmínkám docházelo v měřeném roce. Naproti tomu levá polovina grafu zohledňuje i četnost výskytu proudění z daných směrů a reprezentuje tak příspěvek konkrétního faktoru k roční průměrné koncentraci PM_{10} . Protože měřicí lokalita se nachází v pohraničí v blízkosti trojmezí ČR, Polska a Německa, bylo možné jednotlivé směry přiřadit státům, ze kterých bylo znečištění pravděpodobně transportováno. Označení „ČR+Německo“ udává směr z česko-německého příhraničí, ze kterého nebylo možné zemi původu jednoznačně určit. Kategorie „neurčeno“ reprezentuje koncentrace při bezvětří nebo proměnlivém směru větru, kdy směr ke zdrojové oblasti nebylo možné odhadnout.

Z grafu na Obr. 7 vyplývá, že u všech faktorů s výjimkou minerálních částic z povrchové těžby uhlí (MINER_TĚŽBA) převažuje v lokalitě Uhelná tuzemský příspěvek znečištění. Částice z povrchové těžby pocházejí dominantně z Polska, konkrétně lomu Turów. Odečteme-li cca 19 % měřených dnů, ve kterých nebylo možné směr ke zdroji určit, poměr mezi polským a českým podílem na tomto typu znečištění je cca 80/20, přičemž je vhodné zohlednit, že v českých 20 % je zahrnut blíže nespecifikovaný podíl částic původně emitovaných z lomu Turów, které byly vlivem suché depozice deponovány na českém území v okolí stanice Uhelná a následně resuspendovány větrem. Při této úvaze lze z grafu odhadnout, že podíl minerálních částic z lomu Turów na imisní koncentraci PM_{10} v lokalitě Uhelná dosáhl v roce 2023 cca $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, tedy necelých 10 %.

4.5. Podíly zdrojů a typů znečištění na koncentraci PM_{10}

Skládaný graf podílu identifikovaných faktorů na koncentraci PM_{10} je obsahem Obr. 8.



Obr. 8 Sezonní příspěvky identifikovaných faktorů ke koncentraci PM_{10} .

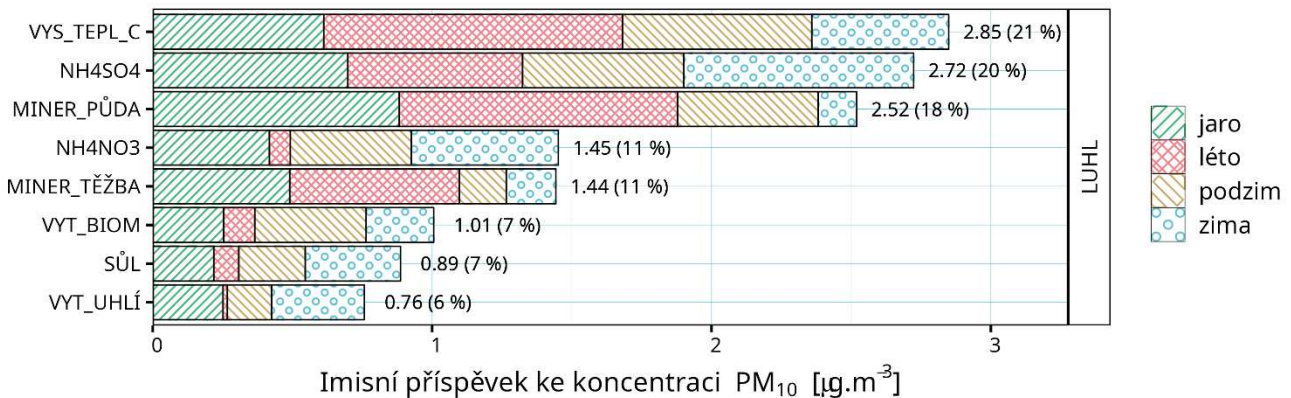
Z grafu jsou zřejmé výrazně vyšší koncentrace v topné sezoně na začátku roku oproti topné sezoně v jeho závěru. Nejen zde graficky prezentované čtvrtletní průměry, ale i vypočtené denní imisní příspěvky individuálního vytápění, dusičnanu amonného a síranu amonného kulminovaly v prvním čtvrtletí, konkrétně v lednu a únoru (viz Příloha 2). Jde o důsledek nepříznivějších roptylových podmínek na začátku roku (viz kapitola 2).

V grafu na Obr. 8 je kromě sloupce složeného z příspěvku modelových faktorů vyznačena červenou linkou a popiskem také skutečně naměřená koncentrace PM_{10} . Je zřejmé, že v teplých měsících model podhodnocoval skutečnou úroveň znečištění (součet imisních příspěvků modelových faktorů dosahoval 86 % skutečně naměřené koncentrace). V ostatních sezonách byla odchylka zanedbatelná. Letní rozdíl může souviset s horší schopností modelu predikovat sekundární organický aerosol z důvodu chybějících markerů (z organických látek byly měřeny pouze OC, PAH a hopany). I přes tento nedostatek tvořily v létě uhlíkaté částice faktoru VYS_TEPL_C, které jsou v předkládaném hodnocení částečně spojovány s formací sekundárních organických aerosolů, největší část PM_{10} .

Spolu s faktorem VYS_TEPL_C zaujímal v PM₁₀ v letním období největší podíl faktor MINER_PŮDA, interpretovaný jako půdní částice a fugitivní úlet z místní pískovny. Třetím a čtvrtým nejvýznamnějším faktorem v létě byla s podobným imisním příspěvkem povrchová těžba uhlí v lomu Turów (MINER_TĚŽBA) a síran amonný (NH₄SO₄). Vytápění domácností, mořská sůl a dusičnan amonný se v létě vyznačovaly zanedbatelnými příspěvky.

V zimě byly nejvýznamnějšími faktory síran a dusičnan amonný (NH₄SO₄ a NH₄NO₃), třetí nejvýznamnější podíl připadal na smíšený faktor složený převážně z vysokoteplotních uhlíkatých částic (VYS_TEPL_C) a s podobným podílem následovaly oba typy vytápění domácností a dálkový transport mořské soli.

Jiný způsob grafické prezentace modelových výsledků je obsahem Obr. 9.



Obr. 9 Podíl identifikovaných faktorů na průměrné roční koncentraci PM₁₀.

Modelově vypočtené podíly zdrojů jsou zřetelně ovlivněny skutečností, že monitorovací stanice Uhelná se nachází ve venkovské, dobře provětrávané lokalitě, vzdálené od zdrojů průmyslových a dopravních emisí. Jak celková úroveň znečištění PM₁₀, tak i podíly lokálních zdrojů primárních emisí zde byly oproti obvyklým poměrům v ČR nízké. O to významnější podíl zaujímaly v aerosolu PM₁₀ sekundární aerosoly a dálkový přenos znečištění. Kromě síranu amonného, který patří mezi podílově nejvýznamnější typy znečištění ve všech lokalitách, byl v lokalitě Uhelná přibližně stejně významný aerosol tvořený převážně uhlíkatými částicemi, zčásti sekundárního původu. Podíl tohoto uhlíkatého typu aerosolu se při dosavadních hodnoceních příčin znečištění, realizovaných ČHMÚ v jiných lokalitách, pohyboval okolo 10 %, zatímco v Uhelné byl podle modelu jeho podíl dvojnásobný a sám o sobě tvořil pětinu znečištění, podobně jako zmíněný síran amonný.

Téměř stejného podílu, jako dva výše zmíněné faktory, zde dosáhl v ročním průměru imisní příspěvek přírodních minerálních částic (téměř pětina PM₁₀). Asi desetinu znečištění PM₁₀ tvořil dusičnan amonný, transportovaný ze zdrojových oblastí, což je z hlediska relativního podílu v ČR obvyklá hodnota.

Celkově výrazně pozadový charakter lokality byl v Uhelné narušen specifickým zdrojem minerálních částic. Podle provedeného vyhodnocení na základě chemických ukazatelů a analýzy imisních příspěvků při různých směrech větru je tímto zdrojem těžba hnědého uhlí v areálu povrchového dolu Turów s průměrným ročním podílem v PM₁₀ okolo 10 %. Jednalo se tedy o podobně významný faktor kvality ovzduší, jako dusičnan amonný. V kontextu všech identifikovaných faktorů lze tuto část znečištění hodnotit jako podílově středně významnou.

Výčet identifikovaných faktorů uzavírají nejnižším podílem mezi 5 a 10 % primární částice z vytápění domácností uhlím a biomasou a dálkový transport mořské soli. Vytápění domácností se tak celkově na kvalitě ovzduší v Uhelné podílelo desetinou až pětinou. Je ale vhodné upozornit na to, že plynné emise z domácností vedou ke vzniku zmíněného dusičnanu amonného a vytápění uhlím může vést i k formaci síranu amonného, takže celkový vliv tohoto segmentu zdrojů je nutno i v Uhelné hodnotit jako významný. Orientačně lze odhadovat, že bez existence emisí z vytápění domácností by v Uhelné byla průměrná roční koncentrace PM₁₀ celkově o pětinu až čtvrtinu nižší.

5. Závěr

Na základě celoroční odběrové kampaně v roce 2023 bylo v rámci projektu ARAMIS provedeno vyhodnocení příčin znečištění ovzduší aerosolem PM_{10} v příhraniční venkovské lokalitě Uhelná (Liberecký kraj). Jedním z cílů bylo identifikovat vliv těžby hnědého uhlí v povrchovém dolu Turów (Polsko) a odhadnout jeho podíl na průměrné roční koncentraci PM_{10} .

Průměrná chemická skladba atmosférického aerosolu odpovídala obvyklým poměrům v ČR s výjimkou zvýšené koncentrace hliníku.

Identifikace zdrojů a typů znečištění ovzduší byla provedena na základě receptorového modelu PMF (positive matrix factorization). Identifikováno bylo osm hlavních faktorů, které v hodnoceném roce v Uhelné ovlivňovaly koncentraci PM_{10} .

Výsledky hodnocení odpovídají skutečnosti, že monitorovací stanice Uhelná se nachází ve venkovské, dobře provětrávané lokalitě, vzdálené od zdrojů průmyslových a dopravních emisí. Nejvýznamnější podíl v aerosolu PM_{10} zde zaujímal sekundární aerosoly a dálkový přenos znečištění.

Kromě síranu amonného, který patří mezi podílově nejvýznamnější typy znečištění ve všech lokalitách, byl v lokalitě Uhelná přibližně stejně významný aerosol tvořený převážně uhlíkatými částicemi, zčásti sekundárního původu. Síran amonný a uhlíkaté částice zde tvořily dohromady cca dvě pětiny PM_{10} . Necelou pětinu znečištění tvořily přírodní minerální částice, převážně z okolních polí a místní pískovny.

Přibližně desetinu průměrné roční koncentrace PM_{10} lze připsat sekundárnímu dusičnanu amonnému, a také vlivu hnědouhelného polského lomu Turów.

Primární částice z vytápění domácností uhlím a biomasou a dálkový transport mořské soli se na průměrné roční koncentraci PM_{10} jednotlivě podílely 5 až 10 %.

Identifikovanými lokálními zdroji primárních částic jsou vytápění domácností uhlím a biomasou, prašnost z polí a místní pískovny a důl Turów. Plynné emise z domácností vedou ke vzniku zmíněných sekundárních anorganických aerosolů, takže celkově způsobují v Uhelné odhadem pětinu až čtvrtinu průměrné roční koncentrace PM_{10} . Domácnosti jsou zde proto významnějším lokálním faktorem kvality ovzduší než prašnost z polí a místní pískovny. Pokud ale hodnotíme celkovou minerální prašnost v lokalitě, tj. součet minerální prašnosti z místních polí a pískovny spolu s polským podílem z lomu Turów, pak se minerální částice podílely na koncentraci PM_{10} větší měrou, než celkový vliv vytápění.

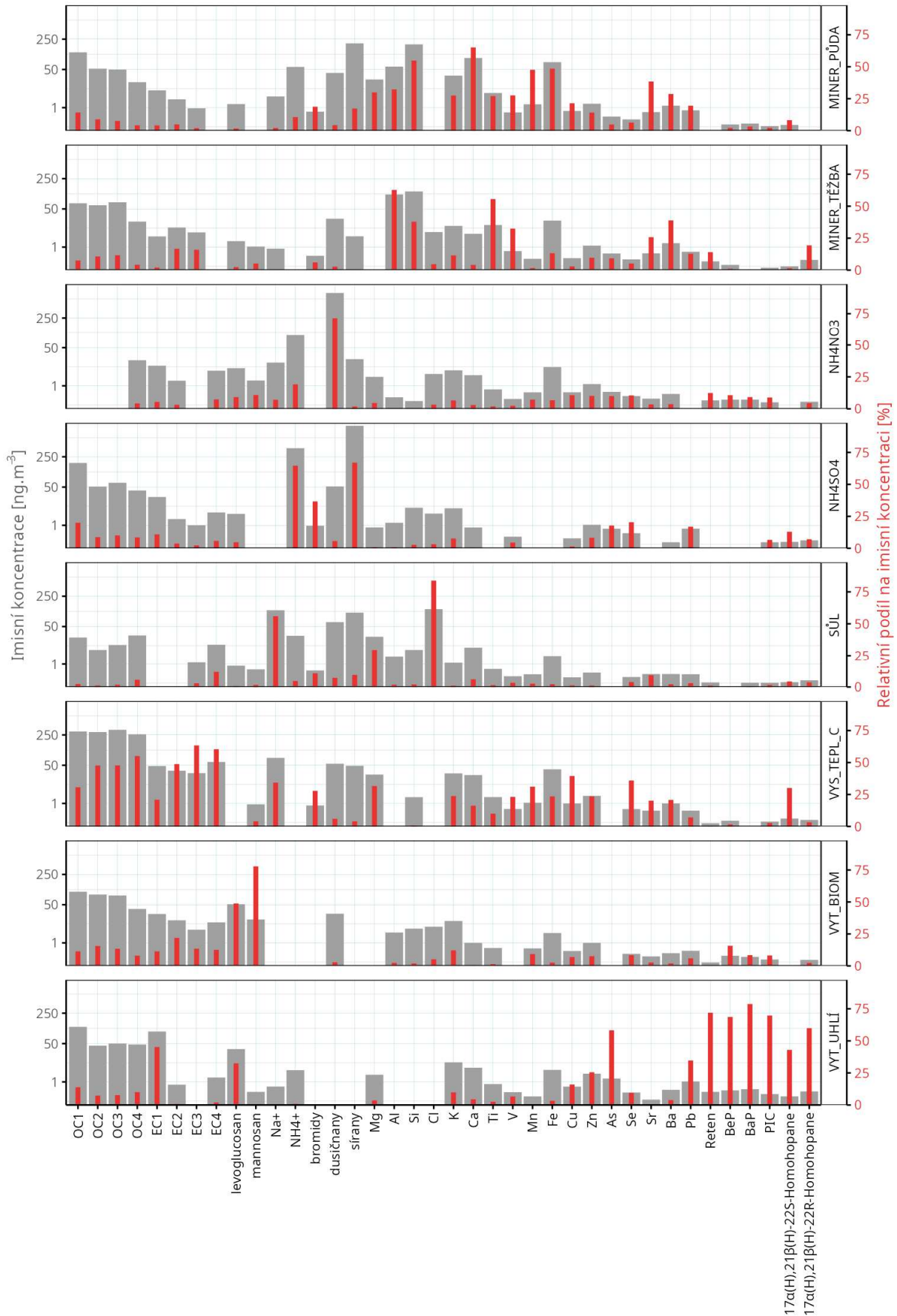
Přenos znečištění do Uhelné byl výrazně nejvýznamnější z území České republiky, především v důsledku výrazně převažujících směrů větru. To platí pro všechny identifikované typy znečištění s výjimkou částic reprezentujících těžbu hnědého uhlí. Tyto částice přispívaly k průměrné roční koncentraci PM_{10} vlivem provozu lomu Turów dominantně se severního směru, tedy z Polska.

Z hlediska pokračování dalších výzkumných aktivit v oblasti identifikace zdrojů provedené hodnocení potvrdilo nedostatečnou schopnost metod ČHMÚ rozlišit biogenní sekundární organický aerosol. Vzhledem ke zlepšující se kvalitě ovzduší v ČR relativní podíl přírodních aerosolů narůstá. Roste proto i potřeba jejich odlišení od antropogenního znečištění. Bez kvantifikace jejich podílu nelze správně určit tuzemský potenciál zlepšení kvality ovzduší a navrhnout adekvátní mitigační opatření na zdrojích emisí. Budoucí výzkumné činnosti při hodnocení příčin znečištění budou proto zaměřeny na hledání a případné zavedení nových metod organických analýz.

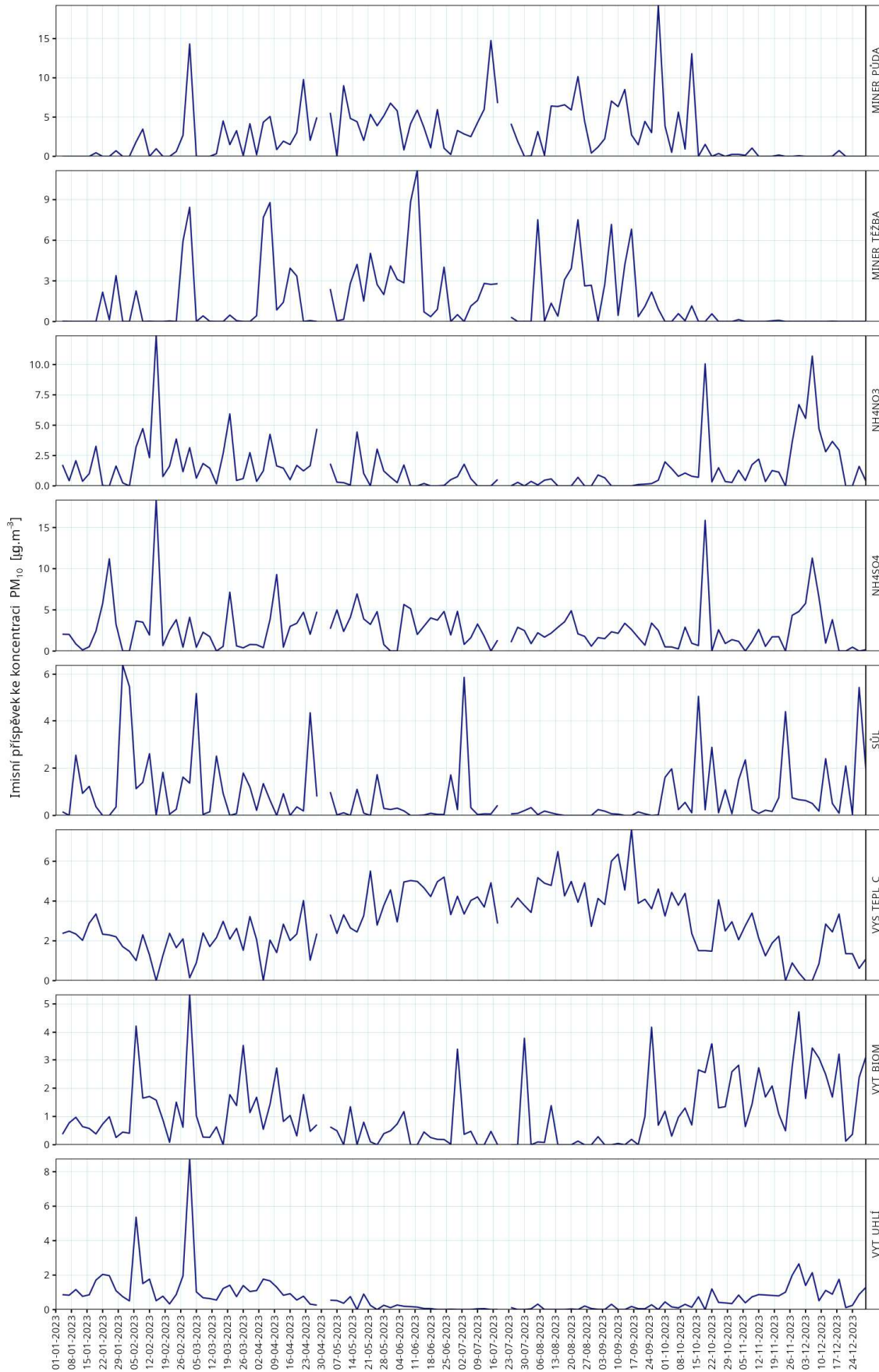
Literatura

- [1] NORRIS, G., DUVALL, R., BROWN, S., BAI, S., 2014. Positive Matrix Factorization (PMF), Fundamentals and User Guide; U. S. EPA: Washington, DC, USA, 2014. Available online: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf (accessed on 21 March 2024).
- [2] VOLNÁ, V., HLADKÝ, D., SEIBERT, R., KREJČÍ, B., 2022. Transboundary Air Pollution Transport of PM10 and Benzo[a]pyrene in the Czech–Polish Border Region. *Atmosphere* 2022, 13, 341. <https://doi.org/10.3390/atmos13020341> (accessed on 21 March 2024).
- [3] HLADKÝ, D., SEIBERT, R., VOLNÁ, V., KREJČÍ, B., 2024, Vyhodnocení měření na monitorovacích stanicích Ostravice-golf a Mosty u Jablunkova-Šance v roce 2023, Projekt Měření znečištění ovzduší vzorkovači pro identifikaci zdrojů znečištění na dvou lokalitách v Moravskoslezském kraji 2023, Závěrečná zpráva projektu (1. 1. – 31. 12. 2023)
- [4] SEIBERT, R., VOLNÁ, V., HLADKÝ, D., SCHREIBEROVÁ, M., KREJČÍ, B., 2023a, Identifikace příčin znečištění ovzduší v Ústeckém kraji, Zpráva v rámci dílčího cíle 2.1 Zlepšení identifikace zdrojů znečištění. https://www.projekt-aramis.cz/results/Aramis_DC2.1_d.pdf
- [5] SEIBERT, R. a kol., 2023b., Výzkum vlivu atmosférické depozice PAH a těžkých kovů na zdraví obyvatelstva v souvislosti s resuspenzí částic vlivem dopravy, TAČR SS01010156.
- [6] Wang, T., Liu, Y., Cheng, H., Wang, Z., Fu, H., Chen, J., Zhang, L., 2022. Significant formation of sulfate aerosols contributed by the heterogeneous drivers of dust surface. *Atmos. Chem. Phys.* 22, 13467–13493. <https://doi.org/10.5194/acp-22-13467-2022>
- [7] Sun, N., Wu, L., Zheng, F., Liang, D., Qi, F., Song, S., Peng, J., Zhang, Y., Mao, H., 2024. Atmospheric environment characteristic of severe dust storms and its impact on sulfate formation in downstream city. *Science of The Total Environment* 922, 171128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171128>
- [8] Clements, A.L., Buzcu-Guven, B., Fraser, M.P., Kulkarni, P., Chellam, S., 2013. Role of particulate metals in heterogenous secondary sulfate formation. *Atmospheric Environment* 75, 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.038>

Příloha 1: Chemické profily identifikovaných faktorů



Příloha 2: Časové řady identifikovaných faktorů



Příloha 3: Faktorové imisní příspěvky vzhledem k DTP

