

MONITORING A SIMULACE KVALITY OVZDUŠÍ V MIKROMĚŘÍTKOVÉ ÚROVNI; HOT-SPOT PRAHA-LEGEROVA

Jan Geletič, Petra Bauerová, Michal Belda, Martin Bureš, Kryštof Eben, Vladimír Fuka, Radek Jareš, Jan Karel, Josef Keder, Pavel Krč, William Patiño, Tereza Pikousová, Jelena Radović, Jaroslav Resler, Hynek Řezníček, Adriana Šindelářová, Ondřej Vlček

Zhoršená kvalita ovzduší ve městech představuje jeden z aktuálních problémů, se kterým se administrativy měst potýkají. Vzrůstající požadavky na mobilitu obyvatel, kteří ve městech žijí, vedou ke zvýšení počtu registrovaných automobilů a růstu intenzity dopravy. S rostoucím počtem studií, které při zhoršené kvalitě ovzduší kladou důraz na významný příspěvek antropogenní činnosti, se začínají objevovat požadavky spojené s podporou cyklistické přepravy, elektromobility nebo omezení automobilové dopravy jakožto primárního zdroje znečištění v oblastech měst. Zejména v případě evropských měst, která mají často památkově chráněná historická centra, ovšem neexistují jednoduchá řešení, jako je přidání pruhu pro kola nebo rozšíření stávající komunikace. Aby bylo možné spolehlivě kvantifikovat vliv automobilové dopravy, stejně jako dalších významných antropogenních zdrojů, jsou zapotřebí velmi detailní a ověřené simulace pomocí numerických modelů. Cílem článku je poukázat na složitost měření a modelování znečištění ovzduší v mikroměřítkovém rozlišení a umožnit tak uživatelům těchto výsledků jejich poučenější a obezřetnější interpretaci.

Klíčová slova: kvalita ovzduší, model PALM, interpretace dat, Praha

Úvod

Člověk a jeho činnost v sídelních oblastech jsou odedávna spojeni se zhoršenou kvalitou ovzduší. Jednou z historických příčin zhoršené kvality ovzduší bylo zejména vytápění na pevná paliva, jako jsou dřevo, oleje nebo uhlí. V okrajových částech měst se jednalo nejčastěji o emise z průmyslových zdrojů. Jedním z významných milníků ve studiu vlivu člověka na znečištění městského prostředí byl tzv. londýnský „velký smog“ (*The Great Smog of London*), který trval od 5. do 9. prosince 1952. Po dobu pěti dní zahalila město Londýn hustá mlha, která byla důsledkem výrazné inverzní situace (vzduch u povrchu byl mnohem chladnější než vzduch ve vyšších vrstvách, čímž nedocházelo k „provětrávání“ nižších vrstev a znečišťující látky zůstávaly v mlze u země). Vzhledem k nízkým teplotám vzduchu se navíc v domácnostech výrazně více topilo, zejména nekvalitním uhlím s vysokým obsahem síranů. Významnou měrou k extrémnímu znečištění ovzduší přispěly i diesellové autobusy, které nahradily dosluhující tramvajová spojení. Uvádí se, že během pěti dnů zemřelo okolo 4 000 obyvatel Londýna, dalších přibližně 8 000 zemřelo později v důsledku zdravotních komplikací [Davis, 2002]. V návaznosti na události z Londýna došlo ve většině západních zemí k přehodnoce-

ní pohledu na znečištění ovzduší; během následujících let a desetiletí bylo přijato mnoho zákonů, politik, regulačních předpisů a doporučení prakticky na všech administrativních úrovních. Důsledkem je, že dnešní koncentrace suspendovaných částic a oxidu siřičitého se i během smogových situací pohybují na řádově nižších úrovních než během londýnské epizody; jen pro zajímavost – denní průměrná koncentrace oxidu siřičitého v Londýně byla cca 2 800 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [Beaver, 1953], nejvyšší hodinový průměr v Praze v letech 2014–2023 byl 105 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a počet hodin, kdy byla alespoň na jedné stanici v celé ČR překročena hodnota hodinového imisního limitu (350 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), byl v uvedeném desetiletí roven 68 [ČHMÚ, 2024]. Kvalita ovzduší i přes významné zlepšení zůstává předmětem zájmu velké části veřejnosti.

Aby bylo možné efektivně regulovat znečištění ovzduší, je nezbytné mít k dispozici podkladová data nebo je získávat pomocí tzv. monitoringu. Monitoring z historického pohledu zahrnuje zejména přímá měření, v současnosti bývá doplněn i o jiné zdroje dat, jako jsou výsledky rozptylových modelů nebo satelitní měření. První monitorovací systémy se začaly vyvíjet v 60. letech, kdy se znečištění ovzduší v tehdejší ČSSR začalo významně zhoršovat. Prvním kro-

kem bylo sledování koncentrací znečišťujících látek; byly vytvořeny databáze imisní informační systém (IIS) a Registr emisí a zdrojů znečišťování (REZZO). Postupem času se IIS rozšířil z vybraných rizikových míst do všech postižených oblastí. V roce 1993 byl jedním z nově zařazených projektů do Programu péče o životní prostředí Ministerstva životního prostředí tzv. Informační systém kvality ovzduší (ISKO). Informační systém kvality ovzduší, který spadá pod Český hydro-meteorologický ústav (ČHMÚ), poskytuje veřejně dostupné informace, archivuje data a publikuje ročenky. Zároveň je zdrojem informací pro různé instituce, které se zabývají životním prostředím, nabízí podklady pro činnosti v oblasti ovzduší, koncipuje síť měřicích stanic včetně jejich přesného umístění a určuje rozsah sledovaných látek [Fiala, 2009].

Aktuální problematika zhoršené kvality ovzduší měst je velmi často spojována s intenzivní automobilovou dopravou [Sicard et al., 2021; Kuenen et al., 2022; TERM, 2023; Magistrát HMP, 2024]. Zejména v období zimních smogových situací se začíná uvažovat o nejruznějších opatřeních, jak snížit koncentrace znečišťujících látek v ovzduší; od omezení vjezdu do center měst až po úplné zákazy provozu automobilů v určitých zónách nebo omezení podle sudého či

lichého čísla registrační značky. Obdobně závažné jsou letní epizody vysokých koncentrací přízemního ozonu, které se navíc často překrývají s epizodami veder. Otázkou zůstává, jak významně se na znečištění ovzduší měst automobilová doprava opravdu podílí a jak nejlépe její příspěvek kvantifikovat. Jedním z používaných nástrojů je Státní síť imisního monitoringu (SSIM) provozovaná ČHMÚ [ČHMÚ, 2024]. Některé ze stanic SSIM fungují v automatickém režimu (stanice automatického imisního monitoringu, AIM) a umožňují on-line monitoring průměrných hodinových koncentrací znečišťujících látek. Část z nich jsou městské dopravní stanice, ještě menší podskupinu představují takzvané dopravní hot-spoty, které představují extrémně zatížené lokality z hlediska intenzity dopravy (konkrétně se v rámci ČR jedná o stanice Praha-Legerova, Brno-Úvoz, Ostrava-Českobratrská a Ústí nad Labem-Všebořická; seřazeno sestupně podle průměrné roční koncentrace NO_2 v roce 2022; [ČHMÚ, 2024]). Městské dopravní stanice mohou pomoci získat představu o vlivu dopravy na znečištění ovzduší. Je ovšem nezbytné zdůraznit, že měření ze stanic SSIM jsou bodová a jejich reprezentativnost záleží na typu stanice a konkrétním umístění stanice. Obzvláště u dopravních stanic je reprezentativnost měření omezena pouze na jejich nejbližší okolí. Při práci s naměřenými daty je třeba mít na paměti, že měření mohou být krátkodobě ovlivněna vnějšími faktory (např. stavební činností probíhající v okolí), kvůli čemuž může být reprezentativnost dočasně snížena, případně nemusí být vhodná pro porovnání s modelem, který tyto neevidované zdroje nepostihuje.

Zhoršená kvalita ovzduší je charakteristická zejména svou vysokou časoprostorovou variabilitou. Ta je, kromě vlastních emisních zdrojů, reliéfu a počasí, dána vysokou členitostí městského prostředí a také specifickými radiačními a tepelnými vlastnostmi povrchů. Radiační a tepelné vlastnosti povrchů ovlivňují v mikroklimatickém měřítku proudění vzduchu v ulicích [Resler et al., 2017], projevuje se přitom i vliv malých částí povrchu ulic či budov s rozměrem typicky jednotky až desítky metrů. Ve své podstatě se jedná o velmi složitý systém vzájemných vazeb, které je nezbytné

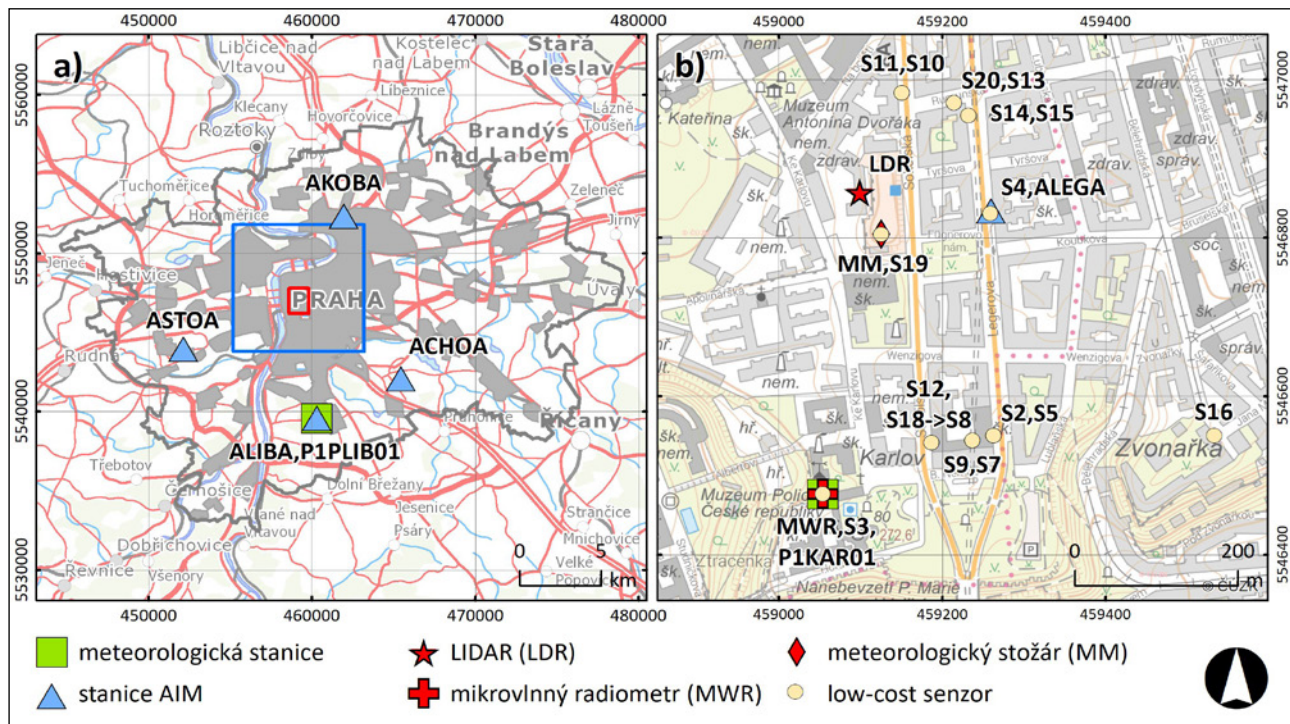
řešit pomocí komplexních numerických modelů. Tato studie představuje vybrané výsledky dosažené v rámci projektu TURBAN (*Turbulent-Resolving Urban Modeling of Air Quality and Thermal Comfort*): modelování kvality ovzduší a tepelného komfortu s rozlišenou turbulencí v městském prostředí. Tento projekt, financovaný Technologickou agenturou ČR a Norskými fondy, zkoumal možnosti numerických modelů s rozlišením v řádu metrů pro simulace vnitřního uličního kaňonu a zaměřoval se zejména na model PALM používající metodu velkých vírů. Cílem textu je prezentovat nejen výhody, ale i možná úskalí plynoucí z využití komplexních modelů pro tvorbu opatření ke zlepšení kvality ovzduší.

Metodika

Pro získání relevantních a komplexních informací ve složitém městském prostředí je nezbytné modelovat všechny procesy související s městským mikroklimatem ve velké úrovni detailu, ideálně v prostorových měřítkách v řádech nízkých jednotek metrů. Pro detailní simulace na úrovni ulic se v současnosti používají tzv. výpočtové modely dynamiky tekutin (z angl. *Computational Fluid Dynamics*; CFD). Ty se dále dělí podle principu použitého pro výpočet turbulentního proudění na dvě nejpoužívanější metody: 1) RANS (časově-průměrované Navierovy-Stokesovy rovnice, též Reynoldsovy rovnice; angl. *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*); 2) LES (simulace velkých vírů; z angl. *Large-Eddy Simulation*). Existuje i třetí metoda, DNS (přímá numerická simulace; z angl. *Direct Numerical Simulation*), která je ale výpočetně extrémně náročná a pro praktické účely se nepoužívá. Rozdíly mezi modely typu RANS a LES a jejich příklady jsou popsány v [Geletič et al., 2022]; související technické aspekty přesahují zaměření tohoto článku. Modely LES vyžadují jemnou síť a relativně krátký časový krok výpočtu, z čehož vyplývá, že jsou náročné na výpočetní výkon. Simulace obvykle probíhají na superpočítačích nebo rozsáhlých výpočetních clusterech schopných zpracovat takto rozsáhlé úlohy. Pro účel této studie byl použitý model PALM využívající princip LES; podrobněji např. [Maronga

et al., 2020] nebo [Resler et al., 2021]. Šíření znečištění ovzduší závisí zásadním způsobem na proudění vzduchu – toto proudění je ve městech do značné míry ovlivněno energetickými procesy, které se odehrávají v městské mezní vrstvě atmosféry a které musí mikroklimatický model přesně simulovat. Jedná se zejména o interakce krátkovlnného a dlouhovlnného záření s povrchy ulic, se stěnami domů nebo se stromy. Nerovnoměrná akumulace a uvolňování záření tvoří komplexní, časově proměnlivou energetickou bilanci povrchů [Krč et al., 2021]. Model PALM se stal prvním modelem metody velkých vírů se schopností detailního zachycení energetických procesů v městském prostředí [Maronga et al., 2020]. Vzhledem k integraci chemického transportního modelu a dalších modulů představuje PALM v současné době pravděpodobně nejkompaktnější městský mikroklimatický model [Geletič et al., 2022].

Nicméně ani moderní a komplexní modely automaticky nezaručují správnost výstupů; výsledky simulací je nezbytné porovnat s měřeními, ideálně ve stejné lokalitě. Standardní meteorologická měření nemají dostatečné časoprostorové rozlišení k ověřování takto detailního městského modelu, navíc jsou často lokalizovaná mimo městskou zástavbu. Proto se organizují speciální měřicí kampaně navržené přímo pro účely validace. Předchozí měřicí kampaně v Praze-Holešovicích (2015) a Praze-Dejvicích (2018) byly primárně zaměřeny na energetické procesy v městském prostředí, koncentrace znečišťujících látek nebyly měřeny vůbec nebo pouze na omezeném počtu míst [Resler et al., 2017; 2021]. Kampaň v rámci projektu TURBAN se zaměřila na kvalitu ovzduší v uliční úrovni a dynamické procesy v modelu PALM. Od konce května 2022 do konce března 2023 byly v ulicích Legerova, Sokolská, Rumunská a jejich okolí instalovány nízkonákladové senzory pro měření koncentrací NO_2 , O_3 , PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$, mobilní meteorologický stožár (MM) poskytující informaci o teplotě, relativní vlhkosti, směru a rychlosti větru pod úrovní střech, aerosolový Doppler LIDAR (LDR) pro měření vertikálních profilů směru a rychlosti větru a výskytu aerosolu (suspendovaných částic) a mikrovlnný radiometr (MWR) pro měření vertikál-



Obr. 1: Rozmístění měřících lokalit v rámci projektu TURBAN. Stanice mimo simulovanou doménu (a) a nízkonákladové senzory pro monitorování kvality ovzduší (S; v případě dvojic senzorů je číslo nižšího uvedeno jako první), LDR = Doppler LIDAR, MM = mobilní meteorologický stožár, MWR = mikrovlnný radiometr, P1KAR01 = meteorologická a klimatologická stanice Praha-Karlov, ALEGA = referenční dopravní stanice imisního monitoringu Praha-Legerova

ního teplotního zvrstvení atmosféry. Senzory pro měření kvality ovzduší byly účelně umístěny ve dvou různých výškách nad sebou i na různých stranách ulice, aby byly schopny zachytit vliv proudění na znečištění ovzduší uvnitř uličních kaňonů. Dále byla využita data z profesionální meteorologické stanice Praha-Karlov (meteorologická stanice umístěna na střeše budovy Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy, MFF UK) a z referenční dopravní stanice AIM Praha-Legerova (ALEGA), na které byl umístěn i jeden kontrolní senzor (S4). Okrajové podmínky pro simulovanou doménu byly vytvořeny mediánem měření z vybraných pozadových stanic AIM (obr. 1a) doplněným o vertikální profil koncentrací z evropského ansámblu modelů znečištění ovzduší Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Přesné rozmístění senzorů v modelované doméně je znázorněno na obr. 1b.

Při interpretaci dat naměřených nízkonákladovými senzory je vždy nutné uvažovat relativně velkou nepřesnost zařízení. Ke snížení případné nepřesnosti je obecně doporučováno zaměřovat se spíše na měřené trendy koncentrací, ni-

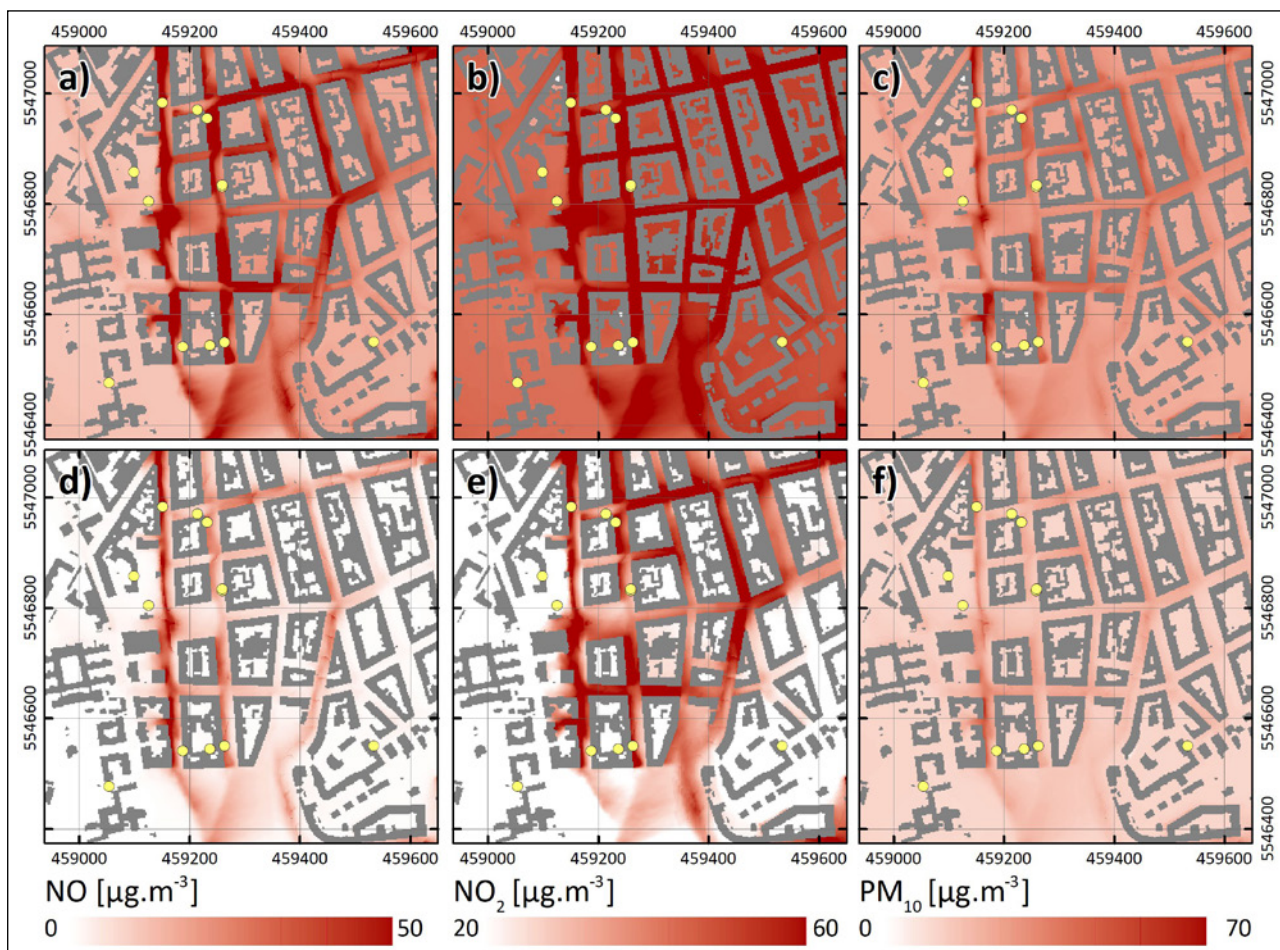
koliv na absolutní hodnoty. Jelikož cílem projektu TURBAN bylo získat co nejrelevantnější údaje o kvalitě ovzduší v různých místech a výškách nad povrchem, bylo nezbytné kvalitu naměřených dat průběžně kontrolovat a aplikovat matematické korekce využívající provedeného souměření senzorů umístěných na stanicích AIM Praha-Libuš po dobu 165 dní před zahájením kampaně a cca jeden měsíc po jejím skončení [Bauerová et al., 2024]. Bez korekce mohou hodnocení prováděná na základě senzorových dat vést ke zcela mylným závěrům. Senzorová měření prezentovaná v textu prošla kontrolou a korekcí. S ohledem na složitost řešené problematiky a velké množství datových podkladů jsou níže prezentovány pouze vybrané výstupy a měření.

Výsledky

Použití komplexních modelů, jako je PALM, může mít v praxi velký přínos pro hledání správných a smysluplných řešení v oblasti zlepšování kvality ovzduší ve městech. Nezbytnou podmínkou je ale správné použití modelu, stejně jako správná interpretace výsledků, při níž

je třeba postupovat nanejvýš opatrně. Z tohoto důvodu je důležité naučit se identifikovat problematické situace, při nichž může dojít ke zkreslení výsledků. K tomuto účelu mimo jiné slouží i výše popsaná validační kampaň. Podrobná demonstrace všech možných případů přesahuje rámec článku, proto je čtenáři v rámci této kapitoly spíše představena struktura a různorodost typů výsledků projektu, aby byl schopen udělat si představu o datech, na nichž jsou závěry v kapitole Diskuse vystavěny.

Jak bylo dříve zmíněno, distribuce znečištění ovzduší ve městě je komplexní problém specifický pro dané území. Mikroměřítková simulace má možnost podchytit časoprostorovou proměnlivost znečištění, na kterou je z izolovaných bodových měření na stanicích možné jen usuzovat. Uvnitř simulované domény jsou koncentrace znečišťujících látek zastoupeny významně nerovnoměrně; liší se jak v čase, tak v prostoru. Nejvyšší koncentrace jsou typicky v nejbližším okolí ulic zatížených intenzivní automobilovou dopravou, případně v okolí významných bodových zdrojů, jako jsou např. komíny. Konkrétní lokality s vysokými koncentracemi znečišťujících látek

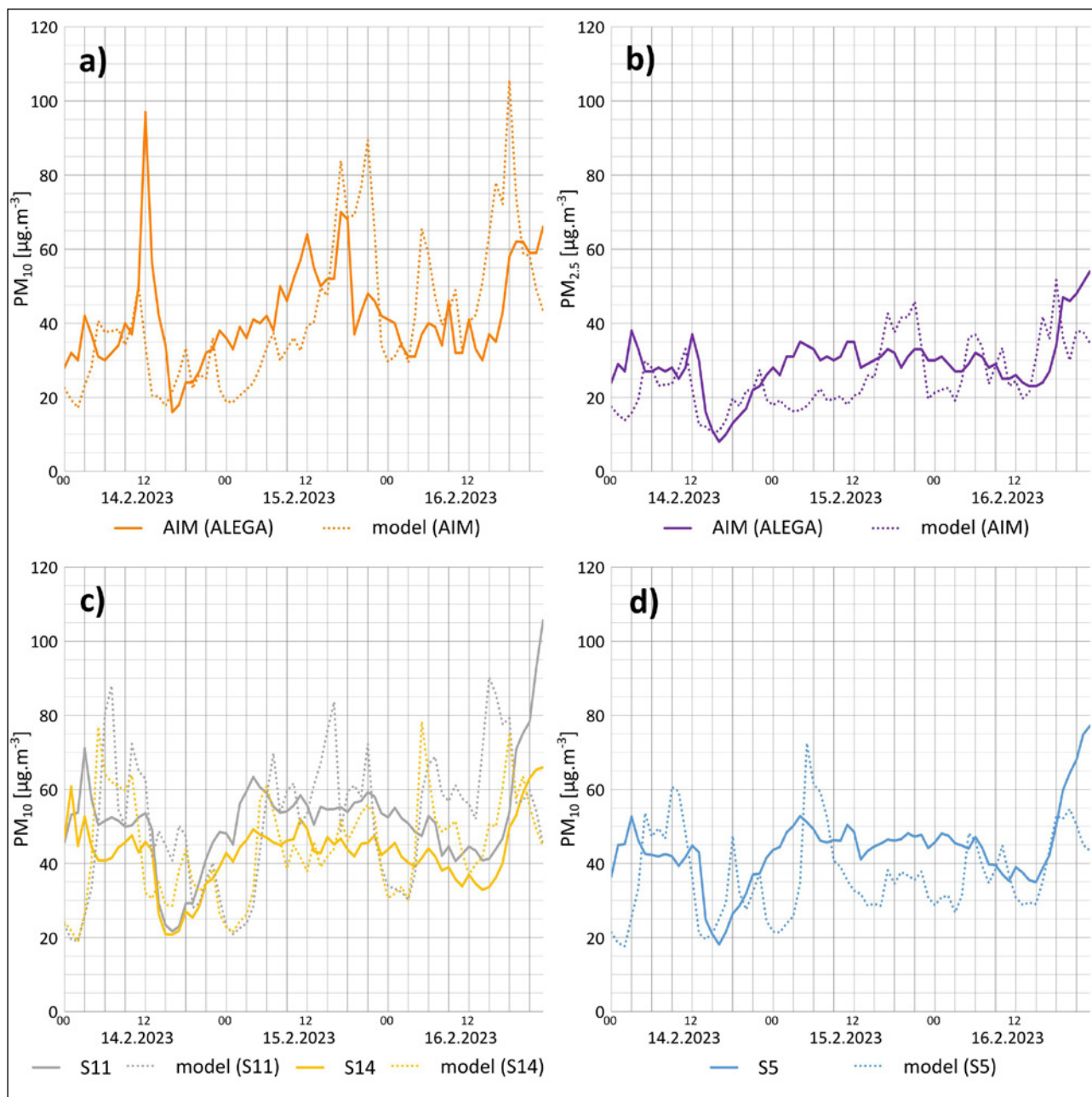


Obr. 2: Koncentrace oxidů dusíku NO, NO₂ a suspendovaných částic PM₁₀ během dopolední (a–c) a odpolední (d–e) dopravní špičky dne 13. 2. 2023 simulované pomocí modelu PALM. Mapy zobrazují průměrné hodinové koncentrace pro období 9–10 h a 17–18 h místního času. Poznámka: NO není v běžných koncentracích zdravotně závadný, nicméně je nezbytné jej v simulacích zahrnovat, protože z něj vzniká NO₂ a oba se spolu s těkavými organickými látkami (VOC) a slunečním zářením podílí na tvorbě a destrukci O₃ (tzv. fotochemického smogu), který vzniká v cyklu fotochemických reakcí těchto molekul v přízemní vrstvě atmosféry. NO a NO₂ bývají často souhrnně označovány jako NO_x

jsou především ovlivněny prouděním; z obr. 2 je patrné, že vyšší koncentrace prakticky všech znečišťujících látek jsou na závětrných, v tomto případě západních, stranách ulic. Vyšší koncentrace jsou způsobeny převládajícím prouděním ze západu, kdy se vítr z úrovně střeš stáčí o stěny budov dovnitř ulice. Vzniklý vír způsobuje na východní straně ulice sestupné proudění, uvnitř ulice dochází při zemi k transportu znečišťujících látek z východu na západ, na západní straně je stoupající proudění. Je-li vír v uličním kaňonu silný, výrazně přispívá k přenosu znečišťujících látek pryč z uličního kaňonu. Při jeho zeslabení naopak dochází k akumulaci látek uvnitř kaňonu. Simulace a měření zároveň naznačují, že transport znečišťujících látek přes střechy budov do okolních vnitrobloků je poměrně nízký.

Zajímavostí mohou být „opticky“ vyšší koncentrace znečišťujících látek v dopoledních nežli v odpoledních hodinách (sytější červená na obr. 2a–c než na obr. 2d–e). Může se to zdát překvapivé, ale tento efekt je způsobený tzv. konvekcí, resp. výstupným prouděním, které vzniká v období pozitivní energetické bilance. Ačkoliv šlo o únorový den, teplota vzduchu kolem poledne vystoupala až nad 10 °C, zároveň bylo slunečno; neutrální až nestabilní zvrstvení nad sledovanou lokalitou utvořilo optimální podmínky pro vznik konvektivního proudění, které se projevovalo i několik desítek minut po západu slunce. Převládající směr proudění společně se stratifikací atmosféry významným způsobem ovlivňuje koncentrace znečišťujících látek. V případě ulic Sokolská a Legerova jsou nižší koncentrace znečišťujících látek v případě severního nebo jižního směru větru.

Pro smysluplné výsledky, např. map prezentovaných pomocí obr. 2, je zásadní již samotná příprava podkladů pro simulace znečištění ovzduší – zejména relevance a přesnost dostupných dat – mají na výsledek významný vliv. I z tohoto důvodu je nezbytné model validovat pomocí měření. První ukázkou je srovnání modelu s profesionální stanicí AIM na ulici Legerova. Z hodinových koncentrací PM₁₀ je patrné, že simulace dobře odpovídají měření. Jedinou odchylkou – a to významnou – je průměrná hodinová měřená koncentrace ve 13 h (obr. 3a). Podobná odchylka by se dala očekávat i v případě suspendovaných částic PM_{2,5}, které s PM₁₀ do značné míry korelují; zde se ovšem nevyskytuje (obr. 3b). Odchylka dokonce nebyla zachycena ani žádnými dalšími senzory, které měřily jak v nižších (obr. 3c), tak vyšších (obr. 3d) úrovních okolních ulic.



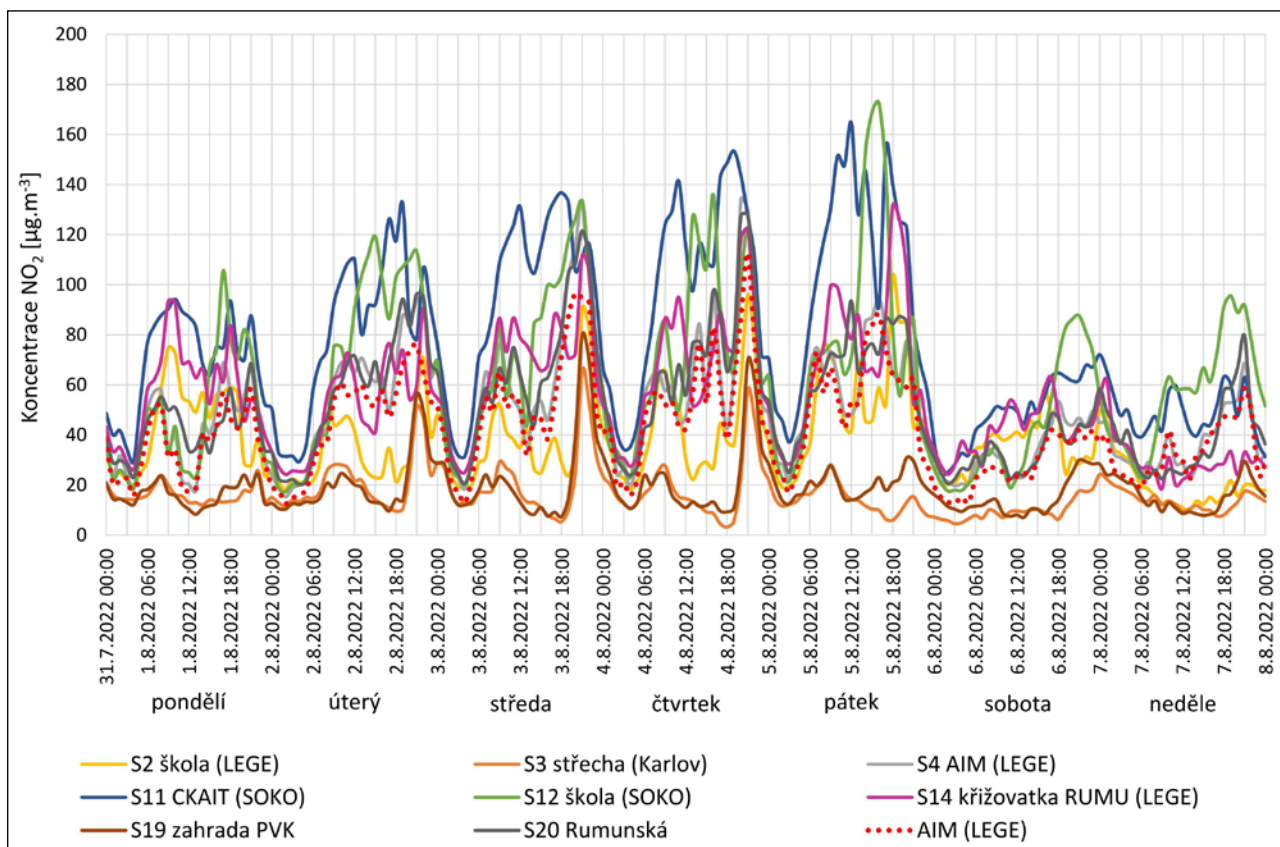
Obr. 3: Srovnání průměrných hodinových koncentrací suspendovaných částic PM_{10} z modelu PALM (tečkované linie) s měřeními (plné linie) pro vybrané stanice a proměnné. Lokality stanic jsou uvedeny na obr. 1

Odchylna má pravděpodobně vysvětlenu v dočasném zdroji – např. pokud by někdo zaparkoval nákladní automobil přímo u stanice AIM, případně mohlo dojít k dočasné stavební či jiné antropogenní činnosti poblíž stanice AIM. Pokud bychom pro validaci výsledků použili pouze bodové měření PM_{10} ze stanice AIM, mohli bychom dojít k nesprávnému závěru, že použití modelu v případě okolí stanice AIM na ulici Legerova není vhodné. Přitom ve skutečnosti je právě „realita zkršená“ lokálním zdrojem. Jako zásadní se zde tedy ukazuje potřeba pečlivě vybírat a kontrolovat data pro

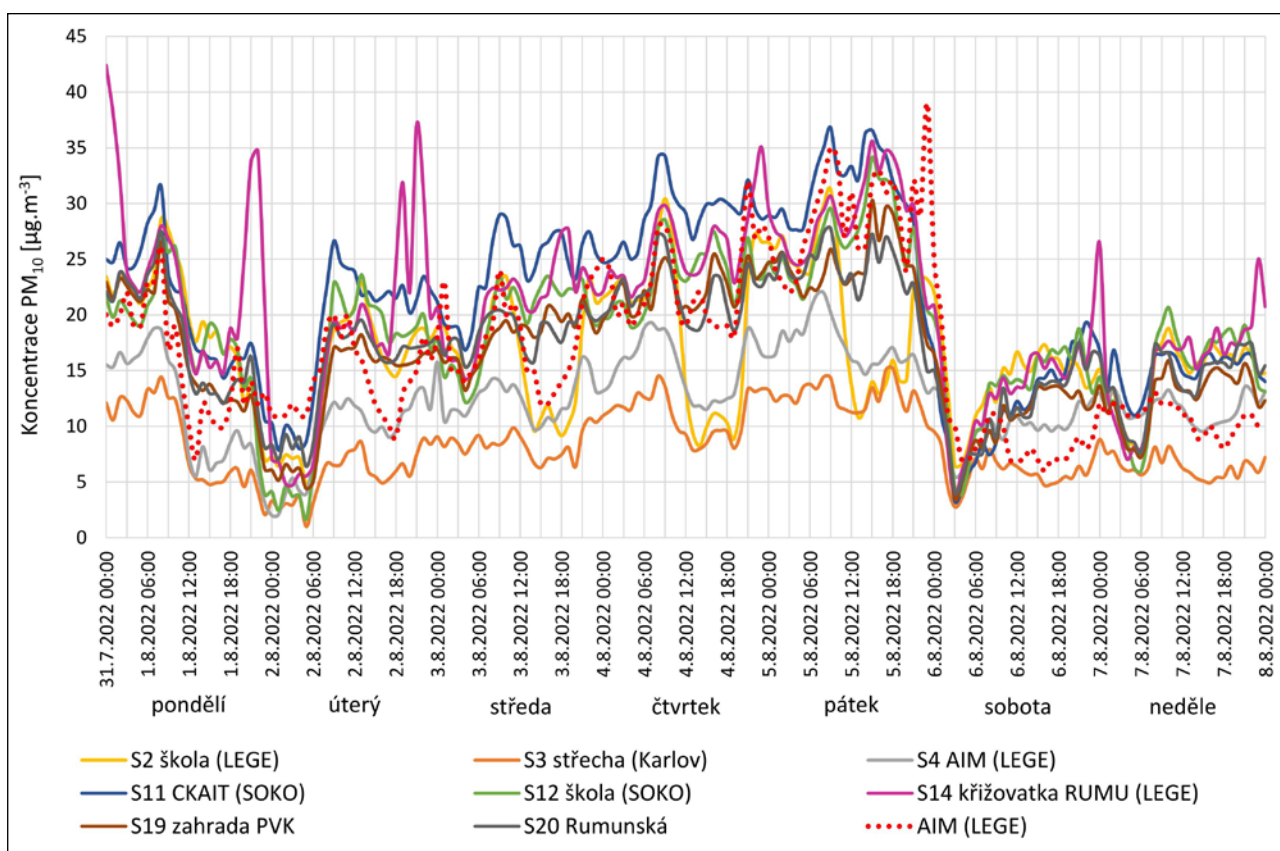
validaci, neomezit se pouze na jedno izolované měření.

Kromě validace modelových výstupů lze měření využít i k analýze dlouhodobějších trendů. Právě analýza trendů z měření a z modelu je důležitá pro kontrolu emisních vstupů modelu. Dále také může pomoci odhalit vliv procesů, které nejsou v rámci modelu zahrnuty. Měření NO_2 , který je jeden z primárních emisních výstupů z dopravy, reflektují změnu trendu koncentrací v průběhu pracovního týdne; vysoká intenzita dopravy je v ulicích od pondělí do pátku,

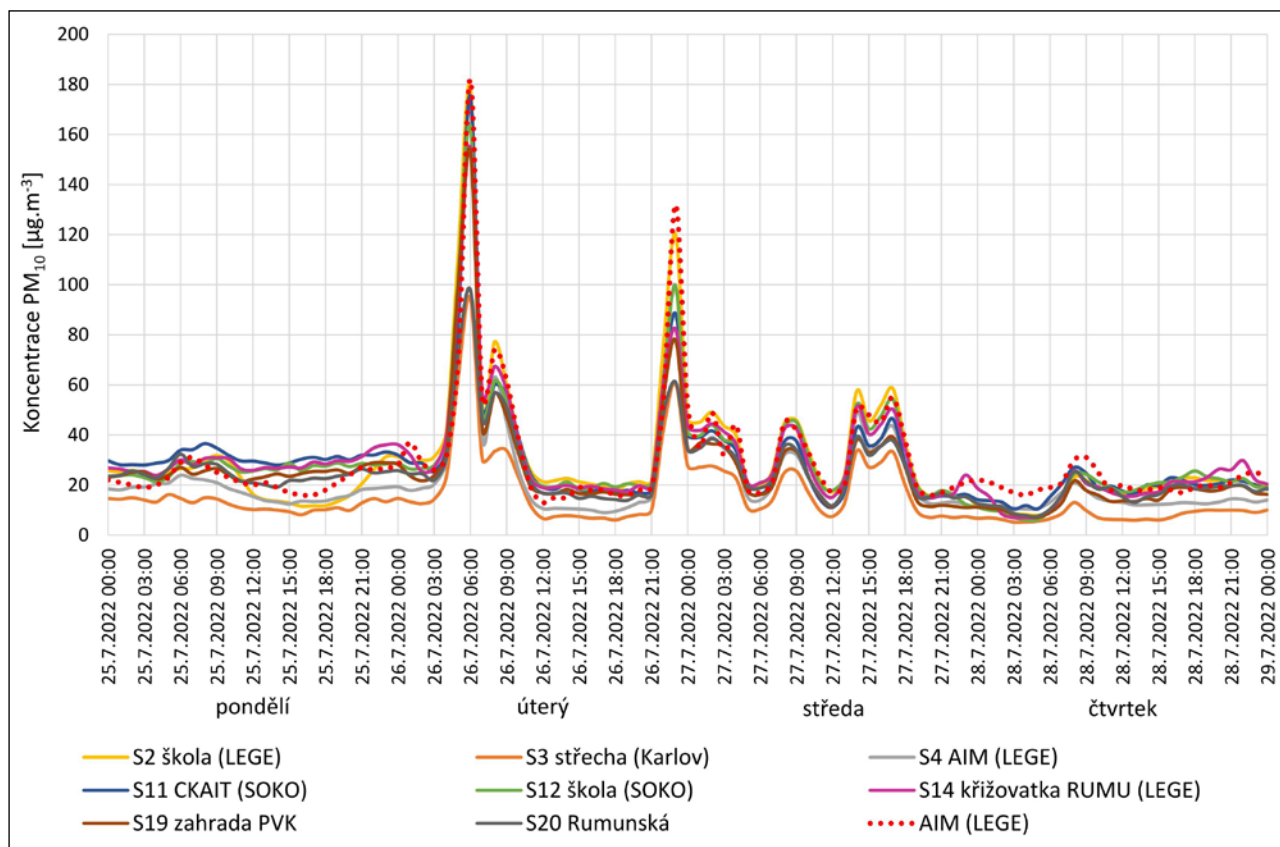
o víkendu je provoz aut obvykle nižší. Zároveň je v pracovních dnech dobře patrný efekt ranní a odpolední dopravní špičky (8–10 h a 16–20 h; viz obr. 4). Jako nejvíce imisně zatížené se v případě NO_2 projevovaly senzory v ulici Sokolské na křižovatce s Rumunskou (S11 a S10; pozn.: na obr. 4 je pro přehlednost zobrazen výsledek pouze z níže umístěného senzoru), senzory v ulici Legerova na křižovatce s Rumunskou (S14 a S15) a senzory v Rumunské ulici (S20 a S13). Nižší koncentrace byly zaznamenávány v případě senzorů umístěných na budově školy v Legerově (S2, S5) a Sokolské



Obr. 4: Průběh koncentrace NO_2 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na vybraných stanicích ve dnech 1.–7. 8. 2022 (po–ne), kdy v pracovních dnech je patrná zvýšená intenzita dopravy v ulicích Legerova (LEGE), Sokolská (SOKO) a Rumunská. Je zde i patrný rozdíl mezi pracovními dny a víkendem. AIM (LEGE) = dopravní stanice automatického imisního monitoringu ČHMÚ



Obr. 5: Průběh koncentrace PM_{10} ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na vybraných stanicích ve dnech 1.–7. 8. 2022 (po–ne). Prudký pokles koncentrací ze dne 6. 8. 2022 ve 3:00 h byl způsoben intenzivními srážkami. AIM (LEGE) = dopravní stanice automatického imisního monitoringu ČHMÚ



Obr. 6: Reakce měřicí sítě na aerosolové znečištění transportované z rozsáhlého lesního požáru v Hřensku dne 26. 7. 2022 v ranních a večerních hodinách (hodinové průměry suspendovaných částic PM_{10})

ulici (S12 a S18) v blízkosti Nuselského mostu, a to pravděpodobně důsledkem lepší ventilace uličního kaňonu z otevřeného prostoru. Nejnižší koncentrace byly naměřeny na tzv. pozadových lokalitách (dále od dopravního zdroje), tedy na střeše MFF UK v ulici Ke Karlovu (S3), na střeše Le Palais Art Hotelu Prague v ulici U Zvonařky (S16, není zobrazeno), na pozemku vodojemu PVK (S19) a dále v uzavřeném nádvoří školy VĚDA (S7 a S9 ve vnitrobloku; obr. 1). V případě znečištění částicemi NO_2 byl z měření rovněž patrný rozdíl mezi pracovními dny a víkendem (obr. 4).

V oblasti měření nebylo v případě PM_{10} ani $PM_{2,5}$ zaznamenáno navzdory vysokému dopravnímu zatížení monitorovaných ulic nijak extrémně vysoké znečištění. Podobný chod koncentrací byl zaznamenáván i na jiných referenčních stanicích méně zatížených dopravou. Vysvětlením může být fakt, že doprava v České republice není hlavním zdrojem částic PM_{10} . Doprava může produkovat částice menší velikostní frakce ($PM_{2,5}$, $PM_{1,0}$ a menší), které mohou být emito-

vané z nedokonalého spalování motorů. Určitou roli hrají i emise z otěrů brzd a pneumatik, které jsou součástí částic $PM_{2,5}$ a větších. Významný podíl znečištění mohou tvořit částice usazené na povrchu vozovky, které se opakovaně dostávají zpět do ovzduší díky zvíření vzduchu projíždějícími automobily (tzv. sekundární prašnost, resp. resuspenze z dopravy). Jedná se zpravidla o hrubší částice (PM_{10} a větší), jejichž příspěvek ke koncentracím PM_{10} ve zkoumané oblasti se ale zdá relativně nízký. Nejvíce zatíženými byly opět senzory umístěné v ulici Sokolské na křižovatce s Rumunskou (S11 a S10), senzory v ulici Legerova na křižovatce s Rumunskou (S14 a S15) a senzory v Rumunské ulici (S20 a S13). Naopak méně zatížené byly senzory umístěné na budově školy při vyústění k Nuselskému mostu a senzory umístěné na pozadových lokalitách (podobně jako u NO_2), což lze vysvětlit lepším provětráváním blízko kraje uličního kaňonu.

Obecně vzato, měření potvrzují zvýšené koncentrace PM_{10} zejména v obdobích teplotních inverzí, kdy jsou zhoršené

rozptylové podmínky. Inverzní situace jsou charakteristické primárně pro zimní období. Nicméně koncentrace suspendovaných částic mohou být významně ovlivněny i vzdálenějším okolím. Vhodným příkladem může být červenec roku 2022, kdy v Národním parku České Švýcarsko vypukl rozsáhlý lesní požár. Znečištění emitované do ovzduší se šířilo napříč celou Českou republikou, a to na velké vzdálenosti. Dne 26. 7. 2022 kolem 6. hodiny ráno a kolem 23. hodiny večerní zasáhlo město Prahu, přičemž nejen referenční stanice Praha-Legerova, ale i celá senzorická síť (včetně pozadových lokalit) velice dobře zareagovala na zvýšení koncentrace suspendovaných částic v celé oblasti Prahy 2 (obr. 6).

Diskuse

Získaná data z měření i modelů ukázala mnoho aspektů kvality ovzduší v komplexním, emisně zatíženém městském prostředí. Díky rozsahu a jedinečnosti získaných dat existuje reálný předpoklad, že data budou i v budoucnosti in-

tenzivně využívána pro studium a hodnocení kvality ovzduší ve městě. Studie potvrdila vysokou časoprostorovou diferenciaci znečišťujících látek v dané oblasti a komplexitu jejich detailního měření, modelování a hodnocení. Využití senzorové sítě se potvrdilo jako efektivní cesta k získání dlouhodobějšího obrazu rozložení a časového vývoje koncentrací měřených látek, ovšem jako zcela zásadní předpoklad pro jejich využití se ukázala profesionální příprava kampaně s dlouhodobým souměřením senzorů s referenční měřicí stanicí a následná kvalitní korekce výsledků [Bauerová et al., 2024]. Bez korekce by získaná měření byla prakticky nepoužitelná, jakékoliv závěry by mohly být zcela zavádějící.

Měřená senzorová data vedla k několika nečekaným závěrům. Například se ukázalo, že na některých dvojicích nad sebou umístěných senzorů jsou v některých případech koncentrace na výše umístěném senzoru vyšší než na níže umístěném senzoru, zatímco očekávání i modelové výsledky ukazovaly na opačné rozmístění koncentrací. Tento jev může přinést nové poznatky o struktuře znečištění v uličním kaňonu a vyžaduje další zkoumání. Výsledky zároveň naznačují poměrně nízký přenos z uličních kaňonů ulic Legerova a Sokolská do uzavřených dvorů ležících mezi nimi. Získaná měření poskytují informaci o zatížení stavebně uzavřených oblastí v blízkosti dopravních tepen.

Měření a analýza jejich trendů ovšem mohou pomoci i s modelováním emisí. Další modelové simulace vybraných epizod v průběhu roku ukazují, že zatímco hodnoty PM_{10} model v průměru mírně nadhodnocuje, hodnoty NO_x jsou v průměru mírně podhodnocené. Díky opačné odchylce lze příčinu hledat spíše v emisních vstupech než v modelování ventilace uličního kaňonu. Ukazuje to na vhodnost dalšího zpřesnění emisních vstupů, přičemž více úsilí by mělo být zaměřeno na emise s největší mírou nejistoty, např. resuspenze pevných částic v uličním kaňonu či na porovnání deklarovaných emisí NO_x z motoru s hodnotami v reálném provozu. Jednou z hypotéz je vyčerpání veškerého deponovaného prachu v ulicích Legerova a Sokolská v době silného provozu, které limituje resuspenzi v těchto ulicích. Možnou

metodou dalšího zkoumání této problematiky je studium poměru koncentrací suspendovaných částic $PM_{2.5}$ a PM_{10} , protože v $PM_{2.5}$ jsou v případě automobilové dopravy zastoupeny zejména primární emise (výfukové, otěry brzd a pneumatik), zatímco v PM_{10} se významně projevuje i resuspenze jakožto sekundární emise. Vliv filtrů prachových částic v moderních autech na koncentrace suspendovaných částic v ovzduší je rovněž předmětem zkoumání (podíl nových aut s kvalitními filtry je v Praze vyšší než v jiných městech). Naopak resuspenze je emise působící bez ohledu na typ pohonu auta (emituje se i u alternativních pohonů), je závislá spíše na intenzitě dopravy, typu povrchu a stavu komunikace a její přesná kvantifikace je pro vývoj modelování v uličním kaňonu zásadní. Všechna tato zjištění by v budoucnosti mohla pomoci vylepšit jak naši znalost znečištění ovzduší v blízkosti městských dopravních tepen, tak i přesnost městských modelů zahrnujících znečištění ovzduší.

Modelová studie dále prokázala vysokou citlivost modelovaných koncentrací na meteorologických okrajových podmínkách [Radović et al., 2024], zvláště za stabilních meteorologických situací, které jsou často spojeny se zvýšeným znečištěním ovzduší. Okrajové podmínky jsou typicky odvozovány z výsledků modelů pro předpověď počasí, jako např. ALADIN (ČHMÚ, ČR), ICON (Deutscher Wetterdienst, Německo) nebo WRF (National Center for Atmospheric Research, USA). Prováděné simulace ukázaly, že zatímco ve většině případů jsou výsledky modelových simulací s okrajovými podmínkami vytvořenými na základě těchto tří modelů podobné, v případě extrémně stabilní situace (inverzní podmínky) se koncentrace získané jako výsledky jednotlivých modelů mohou lišit až několikanásobně, případně mohou dosahovat nerealistických hodnot. Příklad konkrétní situace, její důsledky a možnosti zmírnění případných efektů jsou podrobně popsány v preprintu článku [Resler et al., 2024]. Podobné situace je nezbytné eliminovat nejen během validace modelu měřeními, ale je nutné omezit jejich výskyt i v případě porovnávání urbanistických scénářů, klimatologických scénářů apod. Vzhledem k nerealistickým citlivostem mo-

delovaných koncentrací by totiž mohla být ovlivněna i srovnání scénářů, což by mohlo vést k zavádějícím závěrům. [Resler et al., 2024] ukazuje, jak cca čtyři hodiny dlouhá „superstabilní“ situace, vytvořená v modelu díky nepřesným okrajovým podmínkám z modelu ICON, dokáže ovlivnit statistiky celé tří denní simulace koncentrací PM_{10} .

Z předchozích studií zabývajících se možnostmi vylepšení tepelného komfortu v ulicích se ukazuje velmi významný mitigační vliv zeleně. Vysazování stromů v ulicích je velmi často preferováno z důvodů revitalizace městského prostředí, která pozitivně přispívá ke kvalitě života ve městech. Modelové studie vlivu zeleně v ulicích ovšem velmi často vyhodnocují pouze vliv na tepelný komfort a jen omezené množství studií současně zkoumá i vliv na kvalitu ovzduší. Jedním z důvodů je poměrně velká komplexnost problematiky, tedy i modelů [Geletič et al., 2022]. Model PALM použitý v projektu TURBAN patří do skupiny modelů, které dokáží postihnout obě části. Ulice Legerova je, stejně jako ulice Sokolská, prakticky bez vegetace. Otázkou do budoucna, která úzce souvisí např. s iniciativou „Zastromuj Prahu“, je možný vliv stromů na proudění právě v těchto typech ulic. Modelové simulace, mimo jiné publikované ve studii [Belda et al., 2021], [Geletič et al., 2022] nebo [Geletič et al. 2024], ukazují, že vlivem výsadby stromů v ulicích může dojít ke snížení proudění a turbulentního promíchávání, jehož výsledkem potom může být zvýšení koncentrací znečišťujících látek. Zavádění vegetace v ulicích s vysokou dopravní zátěží by tedy mělo být vždy předmětem pečlivého uvážení všech aspektů, včetně možného ověření pomocí vhodného modelového nástroje.

Všechny výše popsané aspekty nám ukazují, jak docílit zlepšení mikroměřítkových modelů, a tím potažmo přesnějšího a efektivnějšího plánování opatření pro zajištění potřebné kvality ovzduší. Zároveň je ale nutné si uvědomit, že z důvodu již dříve zmíněné výpočetní náročnosti mikroměřítkových modelů typu PALM, je potenciální využití těchto modelů v současné době omezeno na vyhodnocování různých scénářů. Využití těchto komplexních modelů pro posuzování plnění imisních limitů pro roční

průměry, případně další roční statistiky (n-té nejvyšší hodinové nebo denní koncentrace) je teoreticky možné na základě statistického odvození ročních statistik z výrazně omezeného počtu simulovaných dnů (vysoká výpočetní náročnost, simulace maximálně několik málo desítek vybraných dnů), přičemž potřebné metodiky jsou zatím předmětem výzkumu.

Závěr

Výsledky studie poukázaly na několik významných rizikových faktorů, které by eventuálně mohly vést k zavádějícím závěrům: 1) ačkoliv použité emisní vstupy pro model PALM byly zpracovány na doposud nejpřesnější možné úrovni detailu, stále existuje množství nejistot. 2) V současné době neexistuje jeden ideální model pro tvorbu meteorologických okrajových podmínek, který by vždy poskytoval nejpřesnější vstupní data. Je nezbytné testovat různé modely a srovnávat jejich výsledky během různých synoptických situací; zejména v případě specifických situací, jako jsou inverze. 3) Při návrhu měřicí kampaně je nezbytné od začátku dbát na design experimentu a kvalitu naměřených dat, zejména v případě nízkonákladových senzorů pro měření koncentrací znečišťujících látek. Bez širší odborné diskuse může výsledek měřicí kampaně obsahovat významné systémové a technické chyby, jež povedou k zavádějící interpretaci výsledků. 4) Moderní komplexní modely mohou poskytnout velmi přesné údaje ve vysoké úrovni detailu. Jde nicméně o složitý proces, který vyžaduje velmi pečlivou přípravu, stejně jako detailní analýzu a odbornou interpretaci. 5) Ověření modelu srovnáním s podrobným a verifikovaným měřením je součástí procesu k vybudování systému pro podporu rozhodování (tzv. *Decision-Support System*; DSS), který zapadá do nejnovější iniciativy World Meteorological Organization (WMO) nazvané *Integrated Urban Services (IUS)*. IUS by v budoucnu měly významně přispět ke

zvýšení rezilience měst vůči dopadům klimatické změny. Pro integrované vyhodnocení je vhodné použít komplexní modely, které dovedou současně popsat biofyzikální i chemické procesy městského mikroklimatu a jejich interakce. Model PALM použitý v této studii zahrnuje obojí, a tudíž je vhodným kandidátem na zařazení do budoucích IUS jako jejich mikroměřítková komponenta. Na ověřování modelu a vývoji jeho uživatelsky přívětivé aplikace pro podporu orgánů územního plánování a tvorby strategie měst se nadále pracuje. Ukázkou, jak mohou být „uživatelsky přívětivější“ výsledky modelových výstupů pro Prahu prezentovány, lze nalézt na webGIS portálu (www.project-turban.eu/pribehy).

Použité zdroje:

BAUEROVÁ, Petra – KEDER, Josef – ŠINDELÁŘOVÁ, Adriana et al. *Turban Project: Urban Observation Campaign Consisting of Street-Level Low-Cost Air Quality Sensors and Wind and Temperature Profile Measurements in Prague*. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4748860>.

BEAVER, Hugh. *Great Britain Committee on Air Pollution: Interim Report*. 6. vyd. Londýn, Her Majesty's Stationary Office, 1953, 30 s.

BELDA, Michal – RESLER, Jaroslav – GELETIČ, Jan et al. Sensitivity analysis of the PALM model system 6.0 in the urban environment. In: *Geoscientific Model Development*. 2021, roč. XIV, č. 5, s. 4443–4464. ISSN 1991-9603.

ČHMÚ. *Souhrnný roční tabelární přehled „Znečištění ovzduší a atmosférická depozice v datech, Česká republika“*. 2024. [on-line]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2022_enh/index_CZ.html. [cit. 18. 6. 2024].

DEVRA, Lee. A Look Back at the London Smog of 1952 and the Half Century Since. In: *Environmental health perspectives*. 2002, roč. CX, č. 12, s. A734–A735. ISSN 1552-9924.

FIALA, J. Monitoring a hodnocení kvality ovzduší. In: *Atmosféra a klima. Aktuální otázky znečištění ovzduší*. 2009, Karolinum, Praha, ISBN 9788024615981, 352 s.

GELETIČ, Jan – BUREŠ, Martin – KRČ, Pavel et al. Modelování potenciálních dopadů způsobených výsadbou stromů v ulicích měst. In: *Urbanismus a územní rozvoj*. 2022, roč. XXV, č. 4, s. 12–17. ISSN 1212-0855.

GELETIČ, Jan – BELDA, Michal – BUREŠ, Martin et al. Complex Micro-meteorological Effects of Ur-

ban Greenery in an Urban Canyon: A Case Study of Prague-Dejvice, Czech Republic. In: *Stefanakis, A., Oral, H. V., Calheiros, C., Carvalho, P. (eds) Nature-based Solutions for Circular Management of Urban Water. Circular Economy and Sustainability*. 2024, Springer, Cham., s. 391–404. ISBN 9783031507250.

KUENEN, Jeroen – DELLAERT, Stijn – VISSCHEDIJK, Antoon et al. CAMS-REG-v4: a state-of-the-art high-resolution European emission inventory for air quality modelling. In: *Earth System Science Data*. 2022, roč. XIV, č. 2, s. 491–515. ISSN 1866-3516.

KRČ, Pavel – RESLER, Jaroslav – SÜHRING, Matthias et al. Radiative Transfer Model 3.0 Integrated into the PALM Model System 6.0. In: *Geoscientific Model Development*. 2021, roč. XIV, č. 5, s. 3095–3120. ISSN 1991-9603.

Magistrát HMP. [on-line]. Praha: Magistrát hlavního města Prahy, 2024, verze 29. 4. 2024. Dostupné z: https://praha.eu/web/portalzp/w/smogove_situace_a_regulace_v_praze. [cit. 18. 6. 2024].

MARONGA, Björn – BANZHAF, Sabine – BURMEISTER, Cornelia et al. Overview of the PALM Model System 6.0. In: *Geoscientific Model Development*. 2020, roč. XIII, č. 3, s. 1335–1372. ISSN 1991-9603.

RADOVIČ, Jelena – BELDA, Michal – RESLER, Jaroslav – et al. Challenges of Constructing and Selecting the “Perfect” Boundary Conditions for the Large-Eddy Simulation Model PALM. In: *Geoscientific Model Development*. 2024, roč. XVII, s. 2901–2927. ISSN 1991-9603.

RESLER, Jaroslav – KRČ, Pavel – BELDA, Michal et al. PALM-USM v1.0: A New Urban Surface Model Integrated into the PALM Large-Eddy Simulation Model. In: *Geoscientific Model Development*. 2017, roč. X, č. 10, s. 3635–3659. ISSN 1991-9603.

RESLER, Jaroslav – EBEN, Kryštof – GELETIČ, Jan et al. Validation of the PALM Model System 6.0 in a Real Urban Environment: a Case Study in Dejvice, Prague, the Czech Republic. In: *Geoscientific Model Development*. 2021, roč. XIV, č. 8, s. 4797–4842. ISSN 1991-9603.

RESLER, Jaroslav – GELETIČ, Jan – BELDA, Michal et al. Challenges of high-fidelity air quality modeling in Urban Environments - PALM Sensitivity Study During Stable Conditions. In: *Geoscientific Model Development Discussions*. 2024 [in review].

SICARD, Pierre – AGATHOKLEOUS, Evgenios – DE MARCO, Alessandra et al. Urban population exposure to Air Pollution in Europe Over the Last Decades. In: *Environmental Sciences Europe*. 2021, roč. XXXIII, č. 28. ISSN 2190-4715.

TERM. *Transport and environment report 2022. Digitalisation in the Mobility System: Challenges and Opportunities*, European Environment Agency, 2023. [on-line]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/32dd-ca81444147fdb729523b3a98fe91. [cit. 1. 2. 2024].

Mgr. Jan Geletič, Ph.D., Ing. Martin Bureš, RNDr. Kryštof Eben, CSc., Mgr. Pavel Krč, Ph.D., RNDr. Jaroslav Resler, Ph.D., Mgr. Hynek Řezníček (Ústav informatiky Akademie věd České republiky); Ing. Petra Bauerová, Ph.D., RNDr. Josef Keder, CSc., William Patiño, Mgr. Tereza Pikousová, Ing. Adriana Šindelářová, Mgr. Ondřej Vlček (Český hydrometeorologický ústav); Mgr. Michal Belda, Ph.D., Mgr. Vladimír Fuka, Ph.D., Jelena Radović, M.Sc. (Katedra fyziky atmosféry, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova); Mgr. Radek Jareš, Mgr. Jan Karel (ATEM – Ateliér ekologických modelů, s. r. o.)

ENGLISH ABSTRACT

Micro-Scale Monitoring and Modelling of Air Quality; A Case Study of Prague-Legerova Hot-Spot, by Jan Geletič, Petra Bauerová, Michal Belda, Martin Bureš, Kryštof Eben, Vladimír Fuka, Radek Jareš, Jan Karel, Josef Keder, Pavel Krč, William Patiño, Tereza Pikousová, Jelena Radović, Jaroslav Resler, Hynek Rezníček, Adriana Šindelářová, Ondřej Vlček

Deteriorated air quality in cities worldwide is a current problem city administrations face. With the growing mobility requirements of the population living in cities, the number of registered cars and traffic intensity keeps increasing. Numerous studies emphasize the significant contribution of anthropogenic activity to deteriorated air quality. Initiatives linked to promoting bicycle transport, electromobility, or reducing car traffic as the primary source of pollution in urban areas are beginning to appear. However, simple solutions such as adding bicycle lanes or widening existing roads are often not applicable in European cities with heritage-protected historic centers. Modern numerical models are becoming mature enough to serve as a basis for reliable tools providing quantification of the impact of automobile traffic and significant anthropogenic sources in high-fidelity resolution - up to metre scale. However, several important limitations resulting from high-resolution processes need to be considered. First of all, models require very detailed input data about air quality; this includes the transport of pollution from outside the area of interest, emissions from local sources, or resuspension. Second, simulations using numerical models need to be properly validated. Particulate matter, as well as nitrogen (di-)oxide, are highly variable both in space and time. Finally, air quality strongly depends on meteorological conditions. Air quality models typically use national forecast models or regional climate models as meteorological drivers. Our results suggested that currently, no one model can be considered "best" for all potential applications. It seems to be beneficial to test at least two or three different models to analyse potential over- or under-estimation of the results. Practically, the article aims to point out the complexity of measuring and modelling air pollution at micro-scale resolution and uncertainties in fine-scale model resolution.