

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí

Studijní obor: Ochrana životního prostředí



Dominik Šmok

Stanovení koncentračního pole PM_{2.5} v ovzduší obce Družec během topné sezóny

PM_{2.5} field in the air of Družec village during heating season

Bakalářská práce

Školitel: RNDr. Jan Hovorka, Ph.D.

Praha 2022

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím níže uvedené literatury, a že předložená tištěná verze je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze dne:

7. 5. 2022



.....

Dominik Šmok

Poděkování

Děkuji svému školiteli bakalářské práce RNDr. Janu Hovorkovi, Ph.D., nejen za podnětné rady a odbornou pomoc při zpracování mé práce, ale také za jeho přístup, kdy spolupráce s panem doktorem byla vždy velmi poučná a zábavná zároveň. RNDr. Jan Hovorka, Ph.D. se podle mého skromného názoru zhostil role mentora prvotřídně a za to mu patří také mé velké poděkování.

Abstrakt

Lokální topeniště na pevná paliva v malých obcích mají během topné sezóny v zimě velký potenciál zhoršovat kvalitu ovzduší, především emisí $PM_{2.5}$, do takové míry, že jsou překračovány limity WHO a US-EPA pro $PM_{2.5}$.

V obci Družec, okres Kladno, byla během 14denní měřicí kampaně, s využitím stacionární sítě 6 monitorů měřící minutové koncentrace $PM_{2.5}$, zjištěna výrazná časová variabilita a prostorová heterogenita koncentračního pole $PM_{2.5}$. 24hod. limit pro $PM_{2.5}$ (US-EPA, $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) byl v průměru za celou dobu měření překročen na zahradě základní školy. Na ostatních stanovištích byl 24hod. limit pro $PM_{2.5}$ překračován ojediněle a současně na všech stanovištích pouze v jeden den, kdy byly koncentrace $PM_{2.5}$ nadlimitní na celém území ČR. Z analýzy časového průběhu minutových hodnot $PM_{2.5}$ vyplývá, že lokální topeniště v průměru zvyšovaly koncentrace $PM_{2.5}$ o 61-72% ($16-25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na exponovaných a o 40-49% ($6-10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na pozadových stanovištích, přičemž hodnoty $PM_{2.5}$ exponenciálně klesaly s vzrůstající rychlostí větru až do $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kdy se ustálily na $8-16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Mobilní měření vteřinových koncentrací $PM_{2.5}$ a počtu submikronových aerosolových částic – PNC během sedmi identických procházek v jednom dni, potvrdilo výraznou heterogenitu koncentrací aerosolových částic i v mikroměřítku. Byly identifikovány hot-spoty $PM_{2.5}$ s maximy pro $PM_{2.5}$ přes $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro PNC přes $2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$. Fotodokumentace kouřících komínů topenišť současně s vysokými koncentracemi potvrdila lokální topeniště jako dominantní zdroj $PM_{2.5}$ v obci.

Klíčová slova: atmosférický aerosol, $PM_{2.5}$, malé sídlo, topeniště na pevná paliva, stacionární versus mobilní měření $PM_{2.5}$, počet submikronových částic atmosférického aerosolu – PNC

Abstract

Residential heating by solid fuel combustion in small settlements has great potential to degrade air quality, especially PM_{2.5} emissions, during the winter heating season, to such an extent, that WHO and US-EPA limits for PM_{2.5} are frequently exceeded.

There were found significant temporal variability and spatial heterogeneity of the PM_{2.5} concentration field. 24h limit for PM_{2.5} (US-EPA, 35 µg·m⁻³) using a stationary network of 6 monitors measuring minute concentration of PM_{2.5}, In the village Družec, Kladno district, during the 14-day measuring campaign. Campaign average exceeded the limit at the primary school garden. In the other sites, the limit was usually exceeded occasionally except one day, when the limit exceedance was recorded in all the sites as well at the whole area of the Czech Republic. The analysis of time course of minute values of PM_{2.5} shows that the residential heating increased PM_{2.5} concentrations on average by 61-72% (16-25 µg·m⁻³) or 40-49% (6-10 µg·m⁻³) at exposed or background sites respectively; PM_{2.5} values decreased exponentially with wind speed up to 2 m·s⁻¹, when they stabilized at 8-16 µg·m⁻³.

At the microscale of the village, there were also found spatial and temporal heterogeneity of PM_{2.5} and aerosol particle concentrations PNC using by mobile measurement of PNC and PM_{2.5} at 1Hz acquisition rate, during seven identical walks during one day. There were identified hot-spots for PM_{2.5} with max values over 1000 µg·m⁻³ and for PNC with max values 2x10⁵ cm⁻³. Concurrent photos of the smoking chimneys of the residential heating boilers confirmed the residential fuel combusting being the main cause of PNC and PM_{2.5} variability and dominant source of PM_{2.5} in ambient air in the village.

Keywords: atmospheric aerosol, PM_{2.5}, small settlement, residential solid fuel combusting, stationary versus mobile PM_{2.5} measurement, aerosol particle number concentration - PNC

Obsah

Úvod	7
Cíl práce	8
1 Metodika	9
1.1 Stacionární měření	9
1.2 Mobilní měření	10
1.3 Časové rozmezí provedené kampaně.....	12
1.4 Příprava přístrojů	12
1.5 Zpracování dat	12
1.5.1 Stacionární měření	13
1.5.2 Mobilní měření	14
2 Výsledky.....	14
2.1 Kolokace monitorů DustTrak™	14
2.2 Koncentrační hladina PM _{2.5} v obci.....	14
2.3 Prostorová variabilita PM _{2.5} v obci	16
2.4 Vliv meteorologických podmínek na koncentrační hladinu PM _{2.5} v obci.....	17
2.5 Vliv lokálních topenišť na koncentrační hladinu PM _{2.5} v obci	20
2.6 Prostorová a časová variabilita PM _{2.5} a PNC během mobilního měření	21
3 Diskuse.....	24
3.1 Stacionární měření	24
3.2 Mobilní měření	26
Závěr	29
Reference	30
Přílohy.....	34

Úvod

Jedním z parametrů při sledování kvality ovzduší je hmotnostní koncentrace atmosférického aerosolu, a to přesně PM_{10} , obsahující částice o aerodynamickém průměru $d_{ae} < 10 \mu m$, a $PM_{2.5}$, obsahující částice o aerodynamickém průměru $d_{ae} < 2,5 \mu m$. Samotný aerosol je přirozenou součástí atmosféry a svůj původ má v nespočtu přírodních dějů jakými může být i vlnobití mořské vody, vulkanická činnost, větrná eroze či tvorba z plynných prekurzorů nebo i biologická aktivita, kdy jsou do ovzduší vypouštěny spory, semena, pyl a další (Penner, et al., 2001). V lidských sídlech pak ke kvalitě ovzduší výrazně přispívá znečištění antropogenního původu, např. z průmyslu, a ze spalování paliv. Koncentrace PM_{10} a $PM_{2.5}$ jsou tak běžně navyšovány.

Z důvodu mikroskopických rozměrů aerosolové částice frakce PM_{10} a $PM_{2.5}$ pronikají při dýchání do horních, respektive dolních cest dýchacích. To je hlavní příčinou jejich nepříznivého vlivu na zdraví, jenž se projevuje zvýšenou mortalitou a morbiditou v populaci (Braniš, et al., 2010; Brook, et al., 2010). Lze v současnosti pozorovat také zvýšený zájem o hrubé aerosolové částice tedy přesněji o částice o $d_{ae} < 10 \mu m$ a zároveň $d_{ae} > 2,5 \mu m$. $PM_{2.5}$ se ukazuje jako hlavním zdrojem nejen akutních dýchacích potíží (André, 2005), ale i dlouhodobých (Susanne, et al., 2009; Pope 3rd, et al., 2002). Vliv aerosolových částic na zdraví je různorodý, promítá se do něho mnohé jako je chemické složení, toxikologické vlastnosti, permeabilita, zdravotní stav i vnímavost jedince (Ki-Hyun, et al., 2015). Je tedy důležité si uvědomovat fakt, že ovzduší se stává jedním z mnoha faktorů ovlivňující naše zdraví (Anderson, 2009). K sledování a kontrole PM_{10} a $PM_{2.5}$ slouží limity stanovované organizacemi zabývající se, jak samotnou ochranou životního prostředí, jako je Agentura pro ochranu životního prostředí (dále jen „US-EPA“), tak i lidským zdravím, jako je Světová zdravotnická organizace (dále jen „WHO“).

Spalování pevných paliv v topeništích, jakožto zdroj tepla v rezidenčních obydlích, je významným zdrojem $PM_{2.5}$ (Szidat, et al., 2007; Pokorná, et al., 2020). Zatímco ve větších sídlech jako jsou města a velkoměsta, kde je vytápění velkého množství domovů více centralizované do tepláren, jejichž komíny ústí desítky metrů nad zemí, nebo je zde více alternativ k tuhým palivům či dostupnější jiné způsoby vytápění, tak naopak v malých sídlech je vytápění domovů záležitostí většinou pouze jednotlivých domů, jejichž komín ústí pouhých pár metrů nad zemí. V takovýchto lokálních topeništích je využíván dostupný zdroj energie, a to především uhlí a dřevo

(Hovorka, et al., 2015). V současnosti jsou lokální topeniště jedním z největších znečišťovatelů ovzduší. Samotné domácnosti se podílí na celkových emisích $PM_{2.5}$ ze 78 % a na celkových emisích toxického benzo[a]pyrenu dokonce z 98 % (MŽP). Společně se stabilním rázem počasí lze pak snadno docházet k výraznému zhoršování kvality ovzduší v obcích (Barmpadimos, et al., 2012; Elminir, 2005) a dosahování ba dokonce vysokému překračování limitů $PM_{2.5}$ i jiných škodlivin.

Téměř třetina populace v Evropě žije na venkově (Eurostat, 2018) a obzvláště během topné sezóny, která je charakteristická nízkými teplotami, tvorbou dlouhodobějších teplotních inverzí vytvářející stabilní ráz počasí a intenzivním vytápěním domovů, se lze snadno dostat do situace, kdy jsou občané vystavováni vysokým koncentracím $PM_{2.5}$ a úměrně zvýšenému zdravotnímu riziku, které se projevuje i na ekonomické rovině. Celkové sociální náklady související se zdravotním dopadem znečištěného ovzduší lokálními topeništi důsledkem vytápění a vaření v domácnostech dosáhly v EU+UK v roce 2018 výše 29 miliard eur (Kortekand, et al., 2022).

Cíl práce

Cílem této bakalářské práce bylo proměřit koncentrační pole $PM_{2.5}$ během topné sezóny v obci Družec, okres Kladlo, během 14denní měřicí kampaně skládající se ze stacionárního měření minutových koncentrací $PM_{2.5}$ probíhající po dobu kampaně a jednodenního mobilního měření vteřinových koncentrací $PM_{2.5}$ a PNC. Ze získaných dat stanovit a vyhodnotit dynamiku koncentračního pole $PM_{2.5}$ v obci porovnáním s 24hod. limitem pro $PM_{2.5}$ US-EPA ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), odhadnout příčinu případných vysokých koncentrací $PM_{2.5}$ a určit vliv, především lokálních topenišť, na koncentrační hladinu $PM_{2.5}$. To doplnit o zjištění z mobilního měření vteřinových koncentrací $PM_{2.5}$ a PNC, v podobě lokalizování úseků s opakovanými výraznými maximy $PM_{2.5}$, tzv. hot-spot $PM_{2.5}$, a pomocí fotografií a souběžného měření PNC určit zdroj $PM_{2.5}$.

Předpokládáme, že variabilita koncentračního pole $PM_{2.5}$ v ovzduší obce Družec je dána zejména

1. lokálními topeništi s nízkou emisní výškou, přičemž
2. jejich vliv se bude prohlubovat s klesající teplotou a rychlostí větru

1 Metodika

1.1 Stacionární měření

Stacionární měření bylo provedeno s využitím 6 nefelometrů¹ DustTrak™ (TSI, DustTrak™ Aerosol monitor, model 8520) měřící PM_{2.5} s mezí detekce 1 µg·m⁻³, rozmístěných v intravilánu obce Družec na zpřístupněných pozemcích občanů (Obrázek 1). Přístroje DustTrak™ byly umístěny ve vodotěsných kufřících na geodetických trojnožkách s ústím odběrové hlavice ve výšce dýchací zóny člověka, tj. zhruba 1,5 metru nad zemí (Obrázek 2). Na stanovišti 4, byl monitor DustTrak™ z nezbytných důvodů umístěn na střeše garáže a odběrová hlavice byla ve výšce cca 3 metry (Příloha - obrázek 2). Měření meteorologických podmínek, jako je teplota vzduchu (Comet 200-80/E), rychlost a směr větru (Wind-Sonic M, Gill), relativní vlhkost, tlak a příkon radiace, bylo měřeno meteorologickou stanicí simultánně.



Obrázek 1: Letecký snímek obce Družec s lokalizací šesti stanovišť měření PM_{2.5} a trasou mobilního měření.

¹ Princip měření: https://tsi.com/getmedia/d4b8dd3a-48b5-4dc6-94d6-fa94be2abe2c/EXPMN-001_DustTrakII_Theory_of_Operation-A4?ext=.pdf

Stacionární síť byla koncipována tak, aby se 2 aerosolové monitory DustTrak™ nacházely ve vyšších polohách na okraji intravilánu, kde byl očekáván nejmenší vliv antropogenních zdrojů PM_{2.5}. Taková stanoviště se měla stát pozadovými, tedy stanoviště 1 a 6. Ostatní stanoviště se nacházela uvnitř intravilánu obce (Tabulka 1). Na stanovišti 3 byla též umístěna meteorologická stanice.

Integrační doba měření všech přístrojů byla 1 minuta.

Tabulka 1: Přehled umístění jednotlivých aerosolových DustTrak™ monitorů.

Číslo stanoviště	Název stanoviště	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Nadmořská výška	Charakter stanoviště
1	Jižní	50,10086	14,04336	380 m. n. m.	Vyvýšený okraj obce
2	Škola	50,10401	14,04543	375 m. n. m.	Poblíž náměstí obce
3	Starosta	50,10307	14,05007	365 m. n. m.	Centrum obce
4	Hlavní	50,10435	14,05291	370 m. n. m.	Příjezdová komunikace ze severu
5	V Zátíší	50,10266	14,05353	370 m. n. m.	Příjezdová komunikace z východu
6	K Chatám	50,09940	14,05857	400 m. n. m.	Vyvýšený okraj obce



Obrázek 2: Snímek umístění monitoru PM_{2.5} na stanovišti 1, Jižní.

1.2 Mobilní měření

Mobilní měření bylo provedeno s využitím nefelometru DustTrak™ DRX (TSI, DustTrak™ DRX Aerosol monitor, model 8533) měřící PM_{2.5} s mezí detekce 1 µg·m⁻³, kondenzačním čítačem částic² P-Trak® (TSI, P-Trak® Ultrafine Particle Counter, model 8525) měřící počet submikronových částic o velikosti 0.02 <d <1 µm (dále jen „PNC“) s mezí detekce 0 cm⁻³ a GPS trackerem GPSMAP® 64s (GARMIN, GPSMAP® 64s). Tyto přístroje byly umístěny v upravené krosně na zádech chodce s ústím odběrových hlavic v celkové výšce cca 2 m. Odběrové hlavice se nacházely za hlavou chodce přibližně o 20 cm výše než ústí dýchacích cest chodce (Obrázek 3). Zároveň byla celá

² Princip měření: <https://tsi.com/getmedia/daa93d8e-25e1-4fe4-b01c-3ace0606fcdd/ITI-071-RevB-P-TRAK-Ultrafine-Particle-Counter-Theory?ext=.pdf>

cesta dokumentována automatickým fotoaparátem pořizující fotky okolí před chodcem v intervalu 5 s.

Mobilní měření proběhlo formou opakovaných procházek po jedné trase vedoucí intravilánem a z menší části také extravilánem obce (Obrázek 1). Trasa byla zvolena tak, aby přibližně propojovala stanoviště stacionárního měření s ohledem na dostupné místní cesty a procházela místy, kde se daly předpokládat jak vysoké, tak nízké koncentrace $PM_{2.5}$.

Trasa začínala od obecního úřadu směrem k autobusové zastávce Družec, Náměstí a poté podél silniční komunikace v ulici Na Návsi směrem k základní škole (dále jen „ZŠ“). Na křižovatce u ZŠ se odbočilo do ulice Dokeská, kde se po cca 100 metrech odbočilo doprava směrem na pole. Zde začínal první úsek měření v extravilánu obce na poli, který skončil při návratu trasy zpátky na



Obrázek 3: Podoba krosny, v které byly umístěny měřicí přístroje během absolvovaných procházek.

pěší komunikaci u schodů v ulici Na Panence. Poté se pokračovalo na východ ulicí Hlavní až k odbočce k Družecké kalvárii. Zde se začalo stoupat po pěší cestě k tenisovým kurtům, následně se procházelo vedle nich a začalo se klesat ulicí Pod Veselovem k silniční komunikaci ulice V Zátíší. Dále se pokračovalo směrem na východ, po cca 300 m se na křižovatce odbočilo doprava do ulice K Chatám. Ulicí K Chatám se stoupalo do nejvyšších poloh během procházky. Dále se pokračovalo na jihozápad, než se narazilo na lesní stezku, zde jsme se už nacházeli v druhém úseku měření v extravilánu obce na louce a v lese končící ústím lesní stezky u silniční komunikace v horní části ulice Ve Štědrém. Touto ulicí se klesalo do nižších poloh obce a u křižovatky se odbočilo doleva do ulice Ke Kačáku. Zde se prošlo po pěší cestě okolo čističky odpadních vod (nejnižší

poloha v obci) a následně se vracelo zpět k obecnímu úřadu.

Integrační doba měření všech přístrojů byla 1 sekunda.

1.3 Časové rozmezí provedené kampaně

Stacionární měření koncentračního pole $PM_{2.5}$ v obci probíhalo v období od 4. 2. 2021 odpoledne do 19. 2. 2021 odpoledne, tj. po dobu 15 dnů. Pouze na stanovišti 4, Hlavní, je měření započato až při kontrole od 11. 2. 2021 kolem 12:00 z důvodu vypnutí DustTrak™ monitoru první měřící den 4. 2. 2021, kdy pravděpodobně došlo k chvilkovému odpojení od elektrické sítě a baterie, jež plnily funkci zálohy energie při vypojení z elektrické sítě, nedokázaly při nízkých teplotách vzduchu splnit svoji úlohu.

Mobilní měření proběhlo průběžně ve dne 15. 2. 2021 od 7:00 do 20:00.

1.4 Příprava přístrojů

Příprava a kontrola přístrojů byla provedena v místnosti aerosolové laboratoře před uskutečněním měřící kampaně. Příprava DustTrak™ monitorů zahrnovala vyčištění komor, instalace mřížky pro měření frakce $PM_{2.5}$, synchronizaci času, kontrola baterií, kalibrace nuly a průtoku vzduchu ($1,6 \pm 0,1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$). Příprava DustTrak™ DRX a P-Trak® byla prováděna před každou procházkou a zahrnovala kontrolu baterií, synchronizaci času, kalibrace nuly a výměnu alkoholové náplně u P-Trak®.

V místnosti aerosolové laboratoře byla také provedena kolokace monitorů DustTrak™ pro stacionární měření. Kolokace byla provedena tak, že jednotlivé monitory byly položeny odběrovými hlavicemi u sebe a následně měřili koncentraci $PM_{2.5}$ v místnosti, která byla zakouřena. Výsledkem kolokace byl korelační koeficient (směrnice lineární regrese) jednotlivých monitorů DustTrak™ k jednomu vztaženému monitoru.

1.5 Zpracování dat

Naměřené koncentrace $PM_{2.5}$ ze všech monitorů DustTrak™ byly korigovány zjištěným korelačním koeficientem (směrnici lineární regrese) jednotlivých monitorů z kolokace. Korekce na správnost nefelometrické detekce byla provedena kalibrací s beta prachoměrem v dřívější studii v Mladé Boleslavi (Hovorka, et al., 2015). Hodnota pro DustTrak™ byla 0,32, respektive pro DustTrak™ DRX byla 0,7.

1.5.1 Stacionární měření

Prostorová variabilita $PM_{2.5}$ mezi jednotlivými stanovišti byla hodnocena s využitím koeficientu divergence (dále jen „COD“) (Kim, et al., 2005; Pinto, et al., 2004). COD je definováno jako

$$COD_{s' - s''} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{is'} - x_{is''}}{x_{is'} + x_{is''}} \right)^2}$$

Kde $x_{is'}$ je i -tá naměřená koncentrace na stanovišti s' . s' a s'' reprezentují dvě stanoviště a n je počet naměřených koncentrací. Nulová hodnota COD naznačuje podobnost v prostorové variabilitě $PM_{2.5}$ mezi jednotlivými stanovišti, a naopak hodnota lišící se od nuly naznačuje zvyšující se odlišnost. Kritická hodnota COD, nad kterou jsou stanoviště mezi sebou považována za odlišná, byla stanovena na 0,2 (Buchholz, et al., 2014).

Vliv lokálních topenišť na koncentrační hladinu $PM_{2.5}$ byl určen s využitím potenciálního podílu lokálních topenišť k průměrné denní koncentraci $PM_{2.5}$. Potenciální podíl lokálních topenišť k průměrné denní koncentraci $PM_{2.5}$ na stanovišti je definován jako

$$\text{Potenciální podíl} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c_{st.}(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} c_{Q0.1 \text{ poz. st.}}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} c_{st.}(t) dt}$$

Kde t_1 je čas počátku dne a t_2 čas konce dne. $c_{st.}(t)$ je koncentrace $PM_{2.5}$ na stanovišti v čase t a $c_{Q0.1 \text{ poz. st.}}(t)$ je decil koncentrace $PM_{2.5}$ za 24h interval na pozadřovém stanovišti s nejnižší průměrnou denní koncentrací $PM_{2.5}$ v čase t , představující přirozené pozadí ovzduší v obci (Brantley, et al., 2014). Potenciální příspěvek lokálních topenišť [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] k průměrné denní koncentraci $PM_{2.5}$ na jednotlivých stanovištích byl spočten vynásobením potenciálního podílu lokálních topenišť k průměrné denní koncentraci $PM_{2.5}$ a průměrné denní koncentrace $PM_{2.5}$ na jednotlivých stanovištích. Využití této metodiky bylo možné za podmínek, kdy se v oblasti měření vyskytoval pouze jeden dominantní typ zdroje $PM_{2.5}$ se zanedbatelným zasahováním jiného typu zdroje $PM_{2.5}$. V obci Družec byla tato podmínka splněna, kdy dominantním zdrojem $PM_{2.5}$ v ovzduší obce bylo spalování tuhých paliv v lokálních topeništích a zanedbatelným zasahováním zdroje $PM_{2.5}$ v podobě automobilů, jejichž početnost a frekvence průjezdů obcí byla v době

prováděné měřicí kampaně snížena i z důvodu epidemiologických opatření proti šíření koronaviru.

1.5.2 Mobilní měření

Zobrazení koncentrace $PM_{2.5}$ a PNC v závislosti na ušlé vzdálenosti bylo vytvořeno s využitím makra, kdy bylo na základě GPS souřadnic jedné vybrané procházky určena podoba ideální trasy procházky, bez odchylek GPS souřadnic a naměřené koncentrace $PM_{2.5}$ během jednotlivých procházek, které byly lokalizovány k určitému bodu na mapě, byly ve vzdálenosti 5 metrů od GPS souřadnice z ideální procházky s využitím makra zprůměrované. Tímto bylo vytvořeno zobrazení koncentrace $PM_{2.5}$ a PNC v závislosti na ušlé vzdálenosti pro každou procházku se stejnou podobou trasy.

2 Výsledky

2.1 Kolokace monitorů DustTrak™

Provedená kolokace umožnila získání rovnice lineární regrese a koeficient determinace DustTrak™ monitorů (Tabulka 2).

Tabulka 2: Rovnice lineární regrese a koeficient determinace z provedené kolokace DustTrak™ monitorů.

Stanoviště DustTrak™ monitoru	Rovnice	R ²
1	$y = 0,46x$	0.99
2	$y = 1,02x$	0.96
3	$y = 1,05x$	0.98
4	$y = 0,89x$	0.94
5	$y = x$	1
6	$y = 0,44x$	0.99

2.2 Koncentrační hladina $PM_{2.5}$ v obci

Maximální koncentrace $PM_{2.5}$ za celkovou dobu měření byla změřena na stanovišti 3, avšak nejvyšší průměrná koncentrace $PM_{2.5}$ za celkovou dobu měření byla na stanovišti 2. Na stanovišti 2 byly, v porovnání s ostatními stanovišti, běžně měřené vyšší koncentrace $PM_{2.5}$, to je viditelné na kvantilech z jednotlivých stanovišť. Tato skutečnost se projevuje především ve velikosti rozdílu mezi mediánem a průměrem koncentrace $PM_{2.5}$, který je největší právě na stanovišti 2, z příčiny častějšího výskytu vyšších koncentrací $PM_{2.5}$.

Tabulka 3: Popisná statistika (max., průměr, medián a min.) a kvantily ($Q_{0.05}$, $Q_{0.25}$, $Q_{0.75}$ a $Q_{0.95}$) naměřených koncentrací $PM_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] na jednotlivých stanovištích

[$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	St. 1, Jižní	St. 2, Škola	St. 3, Starosta	St. 4, Hlavní	St. 5, V Zátíší	St. 6, K Chatám
Maximum	382	453	591	283	346	246
95 kvantil	72	91	68	76	49	52
75 kvantil	31	41	35	32	18	25
Průměr	25	35	29	23	16	19
Medián	21	25	26	18	11	18
25 kvantil	12	19	18	10	7	11
5 kvantil	2	6	4	4	2	3
Minimum	1	1	1	1	1	1

24hod. limit US-EPA pro $PM_{2.5}$ byl překročen během měření na jednom stanovišti v polovině měřících dnů, na jednotlivých stanovištích byl poté překračován s rozdílnou četností. Zároveň 24hod. limit US-EPA pro $PM_{2.5}$ byl překročen na všech stanovištích dne 15. 2. 2021. Na stanovišti 2 byl průměrně za celou dobu provedeného měření dosažen 24hod. limit US-EPA pro $PM_{2.5}$, $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Tabulka 4).

Předpoklad využití stanovišť 1 a 6 jako tzv. pozadová se splnil pouze v případě stanoviště 6. Koncentrační pole $PM_{2.5}$ v okolí stanoviště 1 mohlo být v některých dnech ovlivněno stavební aktivitou v okolí monitoru DustTrak™ (rekonstrukce střechy domu). Naopak na stanovišti 5 byla neočekávaně naměřená nejnižší průměrná koncentrace $PM_{2.5}$ za celou dobu provedeného měření (Tabulka 4). Důvodem této skutečnosti je buď absence významného zdroje $PM_{2.5}$ v okolí tohoto stanoviště nebo, v případě přítomnosti zdroje, převládající směr větru ve směru od stanoviště ke zdroji.

Tabulka 4: Průměrné denní koncentrace PM_{2.5} na 6 stanovištích, Družec 4. - 19. 2. 2021. Žlutě označená pole jsou víkendy. Červeně označená pole jsou dny, kdy byl překročen 24hod. limit US-EPA pro PM_{2.5} (35 μg·m⁻³), NA představuje výpadek dat.

Datum	St. 1, Jižní	St. 2, Škola	St. 3, Starosta	St. 4, Hlavní	St. 5, V Zátíší	St. 6, K Chatám
	PM _{2.5} [μg·m ⁻³]	PM _{2.5} [μg·m ⁻³]	PM _{2.5} [μg·m ⁻³]	PM _{2.5} [μg·m ⁻³]	PM _{2.5} [μg·m ⁻³]	PM _{2.5} [μg·m ⁻³]
4.2.2021	16	46	16	NA	11	4
5.2.2021	34	33	35	NA	19	19
6.2.2021	19	21	24	NA	13	15
7.2.2021	22	24	28	NA	12	21
8.2.2021	25	24	27	NA	12	22
9.2.2021	30	30	30	NA	14	27
10.2.2021	31	29	26	NA	9	23
11.2.2021	14	36	27	24	13	16
12.2.2021	34	36	34	23	13	18
13.2.2021	22	40	32	27	17	15
14.2.2021	38	46	40	22	22	32
15.2.2021	69	76	67	46	39	55
16.2.2021	25	36	28	34	23	22
17.2.2021	9	21	13	16	14	8
18.2.2021	9	29	22	20	11	6
19.2.2021	9	24	14	13	6	7
Průměr	25	35	29	23	16	19

2.3 Prostorová variabilita PM_{2.5} v obci

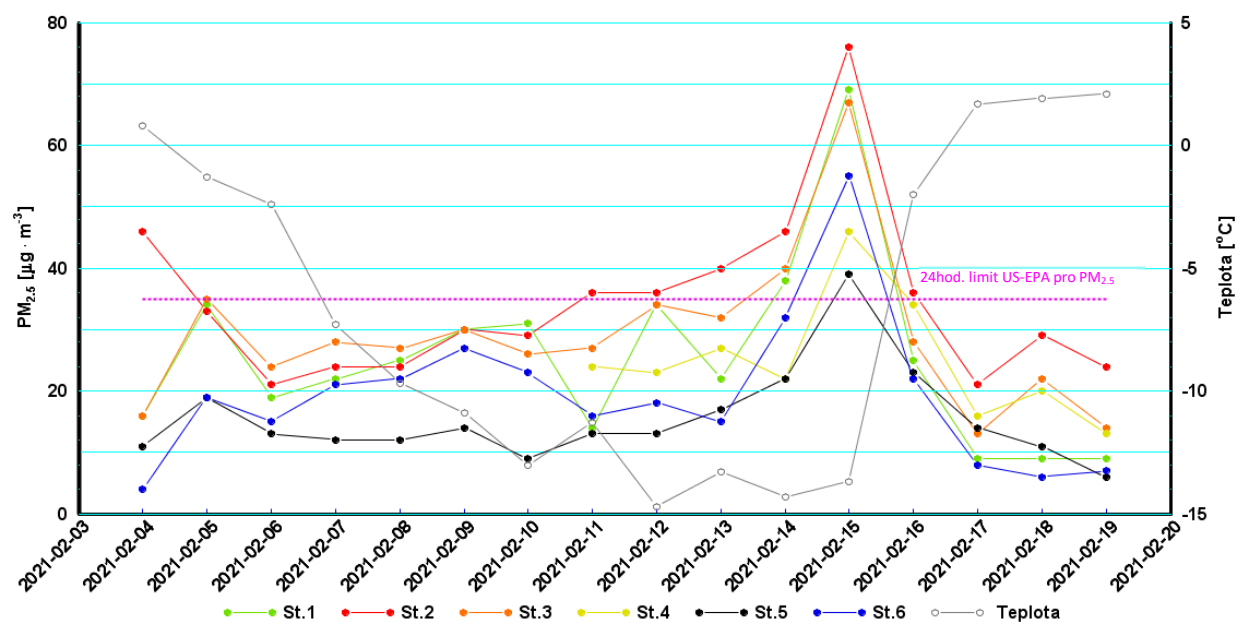
Mezi jednotlivými DustTrak™ monitory byly statisticky významné rozdíly naměřených hodnot koncentrace PM_{2.5} v rámci stacionárního měření dle jejich COD hodnoty. Nejvýraznější odlišnosti byly zjištěny na stanovišti 5 (Tabulka 5).

Tabulka 5: COD minutových hodnot koncentrace PM_{2.5} stanovených DustTrak™ monitory na jednotlivých stanovištích. Družec 4. - 19. 2. 2021.

	St. 2, Škola	St. 3, Starosta	St. 4, Hlavní	St. 5, V Zátíší	St. 6, K Chatám
St. 1, Jižní	0.32	0.28	0.40	0.45	0.25
St. 2, Škola		0.26	0.41	0.48	0.35
St. 3, Starosta			0.34	0.45	0.30
St. 4, Hlavní				0.46	0.38
St. 5, V Zátíší					0.40

2.4 Vliv meteorologických podmínek na koncentrační hladinu PM_{2.5} v obci

Denní koncentrace PM_{2.5} dosahovaly nejvyšších hodnot v období nejnižších teplot přízemní vrstvy vzduchu (Obrázek 4). Hlavní příčinou poklesu teploty nebyl příchod masy chladného vzduchu, jelikož naměřená rychlost větru během ochlazování byla nízká a neindikovala tak významné proudění velkých vzdušných mas (ČHMI, 2021), ale bylo jím ochlazování přízemní vrstvy vzduchu v důsledku kontaktu s prochlazujícím se zemským povrchem (Obrázek 6).

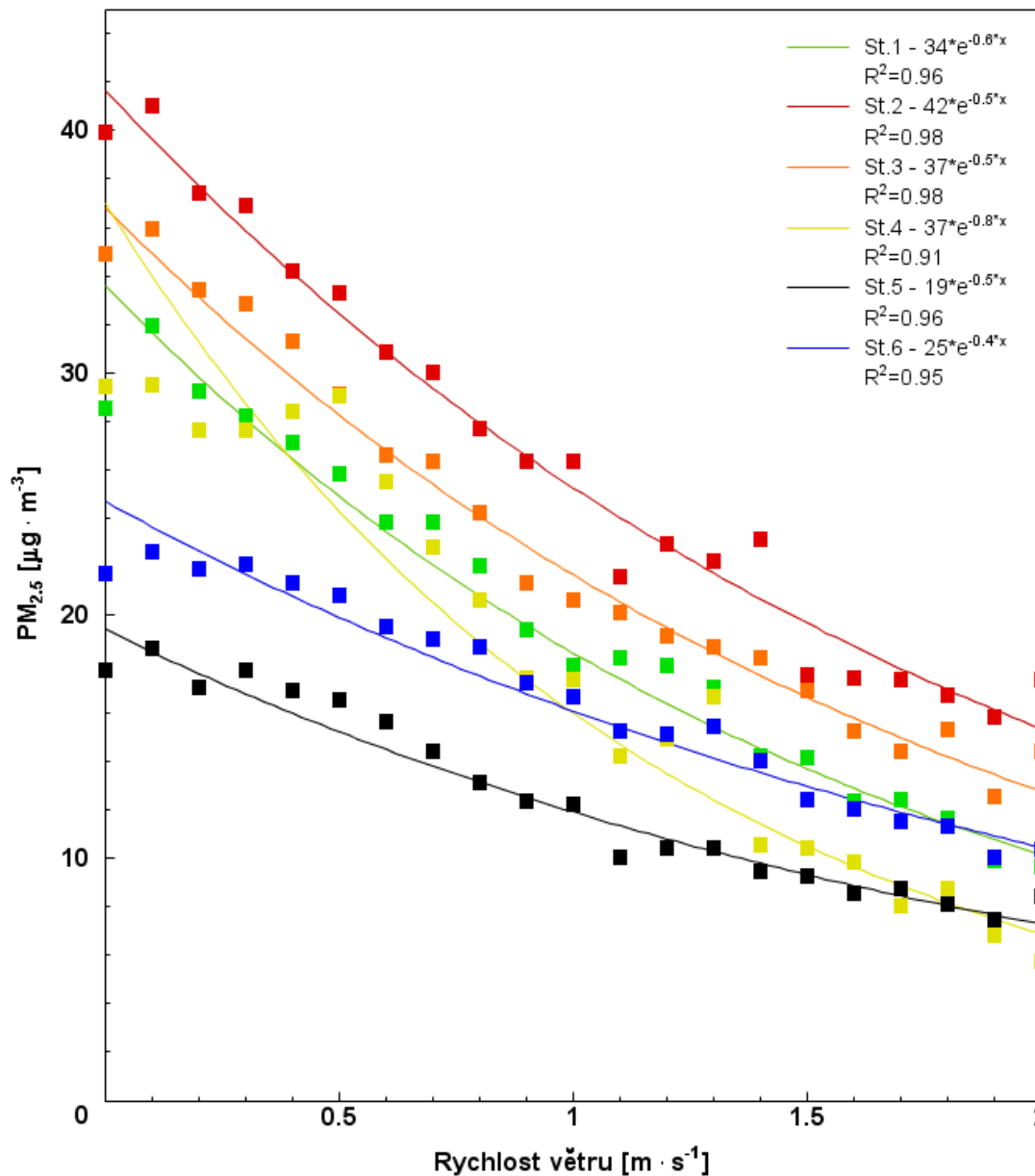


Obrázek 4: Průběh průměrných denních koncentrací PM_{2.5} na stanovišti 1 (zelená), 2 (červená), 3 (oranžová), 4 (žlutá), 5 (černá), 6 (modrá) a průměrné denní teploty (šedá), Družec 4. - 19. 2. 2021.

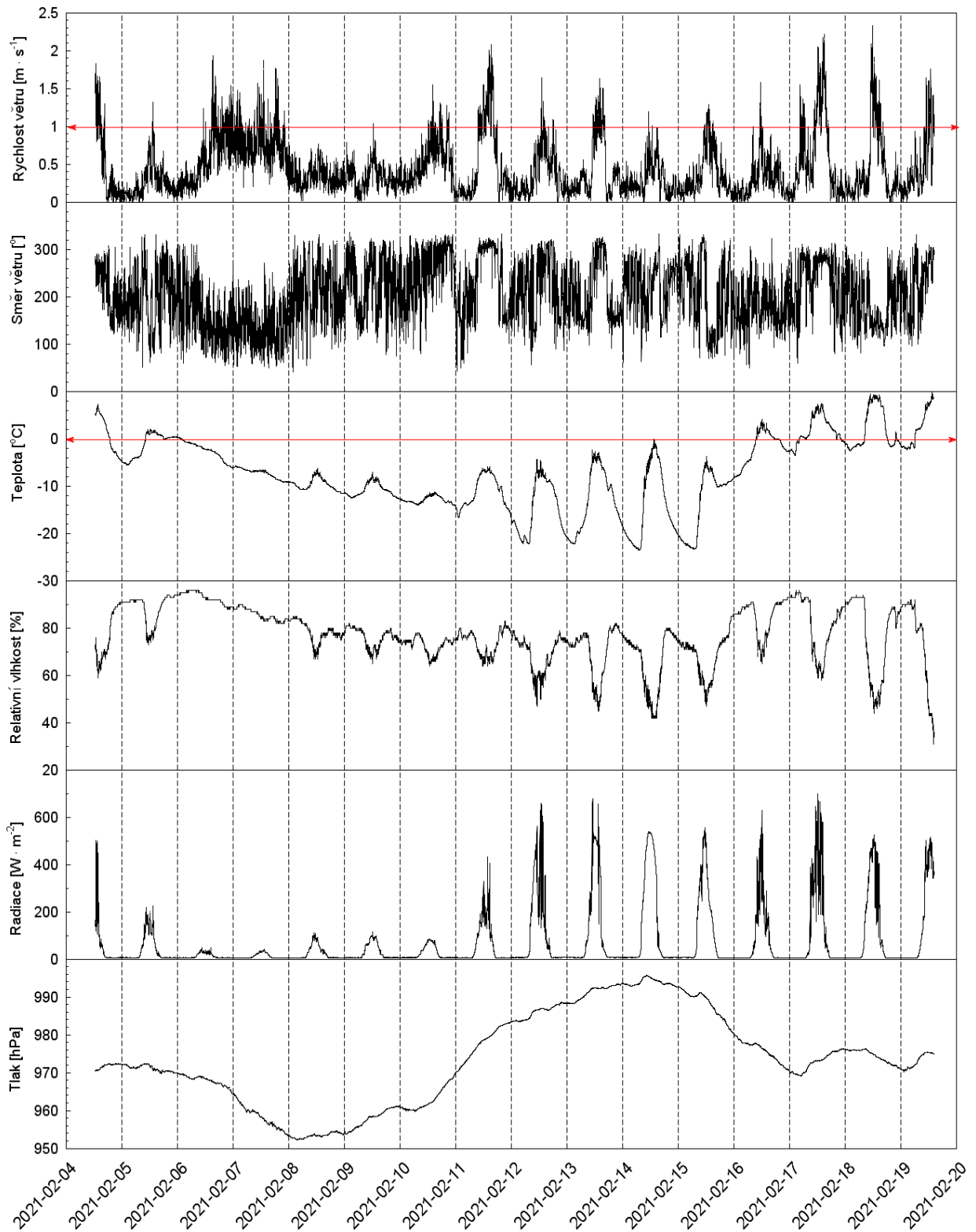
Prochlazování povrchu bylo zapříčiněno při malých rychlostech větru a za vysokého tlaku vzduchu postupným překrytím sněhem. Překrytí povrchu sněhem, jenž má vysoké albedo, zvyšuje odražení slunečního záření během dne. Výsledkem toho je skutečnost, že nejsou kompenzovány ztráty tepelné radiace zemského povrchu, což vede k teplotní stagnaci nebo ochlazování (Hiebl, et al., 2018). Za takovýchto meteorologických podmínek docházelo k poklesu teploty vzduchu, která 15. 2. 2021 klesla až na -24 °C při východu slunce (Obrázek 6). V takovéto situaci je prochlazená přízemní vrstva vzduchu snadno převrstvena vzduchem teplejším a tedy lehčím, což zabraňuje přirozenému mísení těchto vrstev. Tato teplotní inverze je poté výrazným faktorem snižující rozptylové podmínky vytvářením stabilního rázu počasí, škodliviny jsou pak snadno akumulovány v přízemní vrstvě vzduchu (Wallace, et al., 2010; Bendl, et al., 2017).

Významný vliv na hladinu PM_{2.5} má rychlost větru. Obecně je předpokládáno, že v blízkosti zdroje s rostoucí rychlostí větru koncentrace PM_{2.5} exponenciálně klesá. To platí i pro stanoviště

v Družci (Obrázek 5). Rychlost poklesu je vyšší pro více znečištěná stanoviště nežli pro pozadová stanoviště. Rychlost větru, nad kterou již nedochází k významnějšímu poklesu koncentrací $PM_{2.5}$ a zároveň i krátkodobé hodnoty $PM_{2.5}$ dosahují jen výjimečně nadlimitních hodnot, lze považovat rychlost proudění $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nicméně, při této rychlosti větru je patrné, že pozadové stanoviště 5 odvětrává lépe nežli stanoviště 2, které je tak pravděpodobně stále ještě ovlivněno emisemi $PM_{2.5}$ v okolí stanoviště.



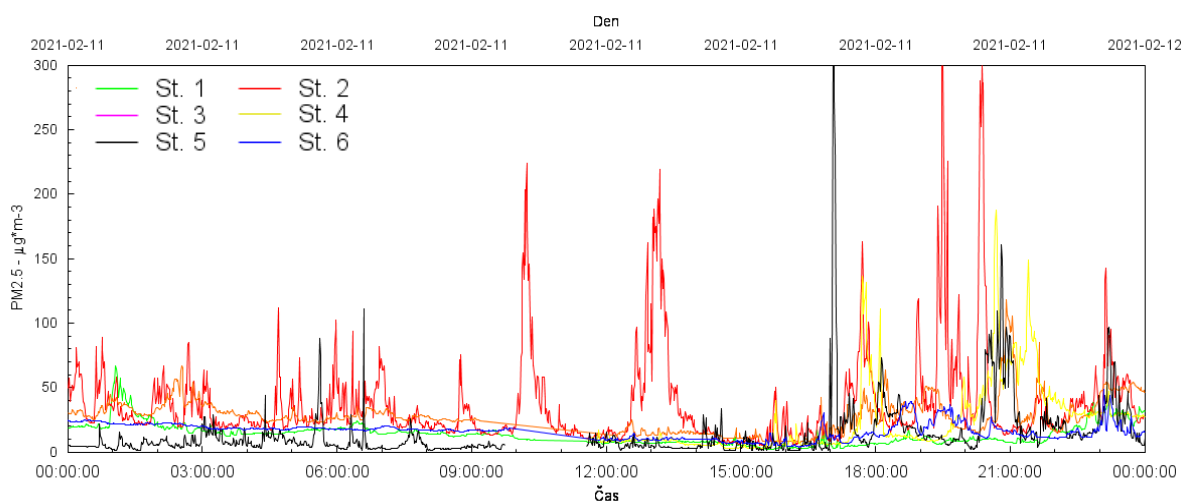
Obrázek 5: Exponenciální regrese průměrné koncentrace $PM_{2.5}$ v intervalu rychlosti větru na stanovišti 1 (zelená), 2 (červená), 3 (oranžová), 4 (žlutá), 5 (černá) a 6 (modrá). Družec, 4. - 19. 2. 2021.



Obrázek 6: Průběh minutových hodnot rychlosti a směru větru, teploty, relativní vlhkosti, radiace a atmosférického tlaku na stanovišti 3, Družec, 4. - 19. 2. 2021.

2.5 Vliv lokálních topenišť na koncentrační hladinu PM_{2.5} v obci

Kouřová vlečka ze zdroje v krátké vzdálenosti od monitoru se projevuje rychlým vzrůstem a poklesem krátkodobých vysokých koncentrací PM_{2.5} a dalších škodlivin (Brantley, et al., 2014). Například dne 11. 2. jsou příčinou navýšení průměrné denní koncentrace PM_{2.5} na stanovišti 2 výrazné krátkodobé nárůsty PM_{2.5} v ranních hodinách dosahující 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 220 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v čase 10:00 – 11:00 a 12:30 – 14:00 h a až 300 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ PM_{2.5} v čase 19:30 - 20:30 (Obrázek 7). Takto přispívaly lokální topeniště dne 11. 2. na stanovišti 2 k denní průměrné koncentraci PM_{2.5} zhruba ze 75 % neboli 27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ PM_{2.5} (Tabulka 6). Podobné průběhy koncentrace PM_{2.5}, indikující emise PM_{2.5} z lokálního topeniště, lze během měřicí kampaně pozorovat na všech stanovištích.



Obrázek 7: Průběh minutových koncentrací PM_{2.5} na stanovišti 1 (zelená), 2 (červená), 3 (fialová), 4 (žlutá), 5 (černá), 6 (modrá). Družec, 11. 2. 2021.

Analogicky z analýzy časového průběhu minutových koncentrací PM_{2.5} byl zjištěn potenciální příspěvek lokálních topenišť k průměrné denní koncentraci i na ostatních stanovištích. Ve dnech překračující 24hod. limit US-EPA pro PM_{2.5} byl potenciální příspěvek lokálních topenišť k průměrné denní koncentraci PM_{2.5} na 1. stanovišti 36 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, na 2. stanovišti 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, na 3. stanovišti 30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Jedná se o hodnoty blízké či rovné samotnému 24hod. limitu US-EPA pro PM_{2.5}. Podobně velký význam lokálních topenišť vyplývá i z potenciálního podílu k průměrné denní koncentraci PM_{2.5}, který pro stanoviště 1 činil 69 %, na stanovišti 2 80 % a na stanovišti 3 65 %.

Tabulka 6: Potenciální příspěvek [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] a podíl [%] lokálních topenišť k průměrné denní koncentraci $\text{PM}_{2.5}$ na 6 stanovištích, Družec 4. - 19. 2. 2021. Žlutě označená pole jsou víkendy. Červeně označená pole jsou dny, kdy byl překročen 24hod. limit US-EPA pro $\text{PM}_{2.5}$ ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). NA znamená výpadek dat.

Datum	St. 1, Jižní		St. 2, Škola		St. 3, Starosta		St. 4, Hlavní		St. 5, V Zátíší		St. 6, K Chatám	
	$\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	[%]	$\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	[%]	$\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	[%]	$\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	[%]	$\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	[%]	$\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	[%]
4.2.2021	13	81	43	94	13	81	NA	NA	8	73	1	25
5.2.2021	19	56	18	55	20	57	NA	NA	4	21	4	21
6.2.2021	7	37	9	43	12	50	NA	NA	1	8	3	20
7.2.2021	12	55	14	58	18	64	NA	NA	2	17	11	52
8.2.2021	15	60	14	58	17	63	NA	NA	2	17	12	55
9.2.2021	18	60	18	60	18	60	NA	NA	2	14	15	56
10.2.2021	23	74	21	72	18	69	NA	NA	1	11	15	65
11.2.2021	5	36	27	75	18	67	15	63	4	31	7	44
12.2.2021	31	91	33	92	31	91	20	87	10	77	15	83
13.2.2021	16	73	34	85	26	81	21	78	11	65	9	60
14.2.2021	28	74	36	78	30	75	12	55	12	55	22	69
15.2.2021	44	64	51	67	42	63	21	46	14	36	30	55
16.2.2021	13	52	24	67	16	57	22	65	11	48	10	45
17.2.2021	3	33	15	71	7	54	10	63	8	57	2	25
18.2.2021	7	78	26	90	19	86	18	90	9	82	4	67
19.2.2021	5	56	20	83	10	71	9	69	2	33	3	43
Průměr	16	61	25	72	20	68	16	68	6	40	10	49

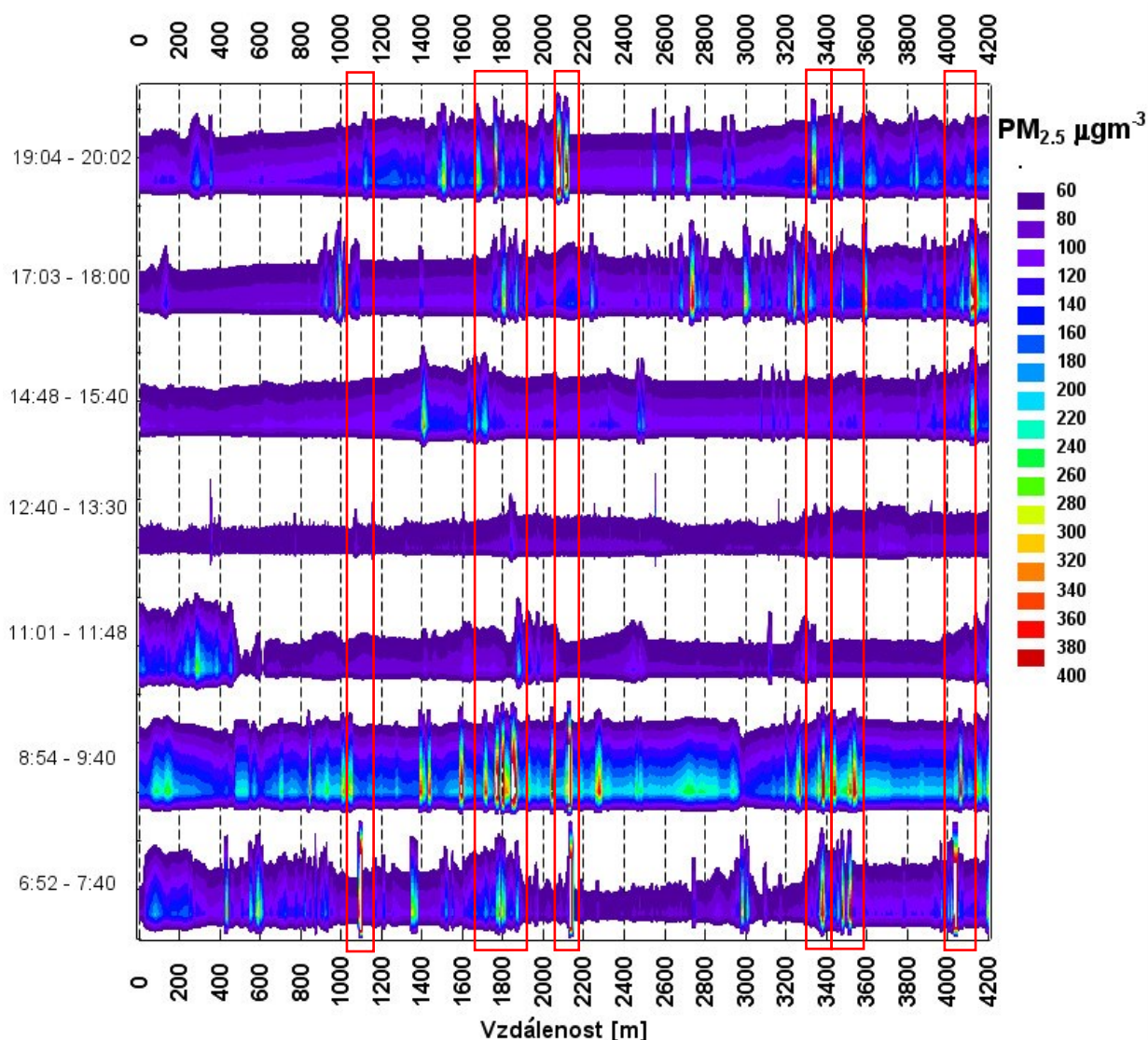
2.6 Prostorová a časová variabilita $\text{PM}_{2.5}$ a PNC během mobilního měření

Mobilní měření bylo provedeno ke konci epizody chladného počasí, kdy ranní teplota klesla až na $-24 \text{ }^\circ\text{C}$ (Obrázek 6), den byl polojasný. Východ a západ slunce dne 15. 2. byl v 7:13, respektive v 17:22. Délka jednotlivé procházky byla cca 4200 m a ujít jí trvalo přibližně 50 minut.

Během 1. a 2. procházky (dále jen ‚ranní procházky‘) byly naměřeny jak nejvyšší maximální, tak i průměrné koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ a největší místní rozdíly. Během dne pak docházelo k poklesu a postupnému vyrovnání hladin koncentrací $\text{PM}_{2.5}$, započatému v čase mezi 2. a 3. procházkou, respektive mezi 10 a 11 hodinou (Tabulka 7 a Obrázek 8). Vyšší hodnoty koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ jako v ranních časech bylo opět možné naměřit v průběhu 6. a 7. procházky (dále jen ‚večerní procházky‘).

Tabulka 7: Začátek, konec, maximální, minimální, průměrná a medián koncentrace $PM_{2.5}$ během jednotlivých procházek, Družec 15. 2. 2021.

Procházka	Začátek	Konec	Max. $PM_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Min. $PM_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Průměr $PM_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Medián $PM_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
1	6:52	7:40	1334	73	136	118
2	8:54	9:40	881	131	226	211
3	11:01	11:47	282	60	102	88
4	12:40	13:30	257	69	84	81
5	14:48	15:40	380	94	123	117
6	17:03	18:00	487	88	133	117
7	19:04	20:02	697	107	150	195



Obrázek 8: Koncentrace $PM_{2.5}$ během jednotlivých procházek v závislosti na uražené vzdálenosti. Červené rámečky vyznačují možné hot-spots $PM_{2.5}$.

Z opakování procházek vyplývá, zda k vysokému navýšení koncentrace $PM_{2.5}$ dochází opakovaně na některých úsecích, tzv. hot-spot $PM_{2.5}$. Takovéto úseky jsou viditelné hlavně během ranních a večerních procházek (Obrázek 8). Úseků s vysokou koncentrací $PM_{2.5}$ bylo v průběhu 1. procházky nalezeno 5 (Příloha - obrázek 7) a v průběhu 2. procházky 4 (Příloha - obrázek 8), z toho se na 3 úsecích jednalo o opakovaný jev. Nejvyšší naměřené koncentrace $PM_{2.5}$ v těchto hot-spotech byly 10krát až 40krát vyšší, nežli je 24hod. limit US-EPA pro $PM_{2.5}$. Zobrazení průběhu vteřinových koncentrací $PM_{2.5}$ jednotlivých procházek na uražené vzdálenosti v barevné škále během všech procházek (Obrázek 8) umožnilo separovat úseky, které by mohly odpovídat charakteristice hot-spotu $PM_{2.5}$ (Tabulka 8).

Tabulka 8: Lokalizace a názvy možných hot-spotů $PM_{2.5}$.

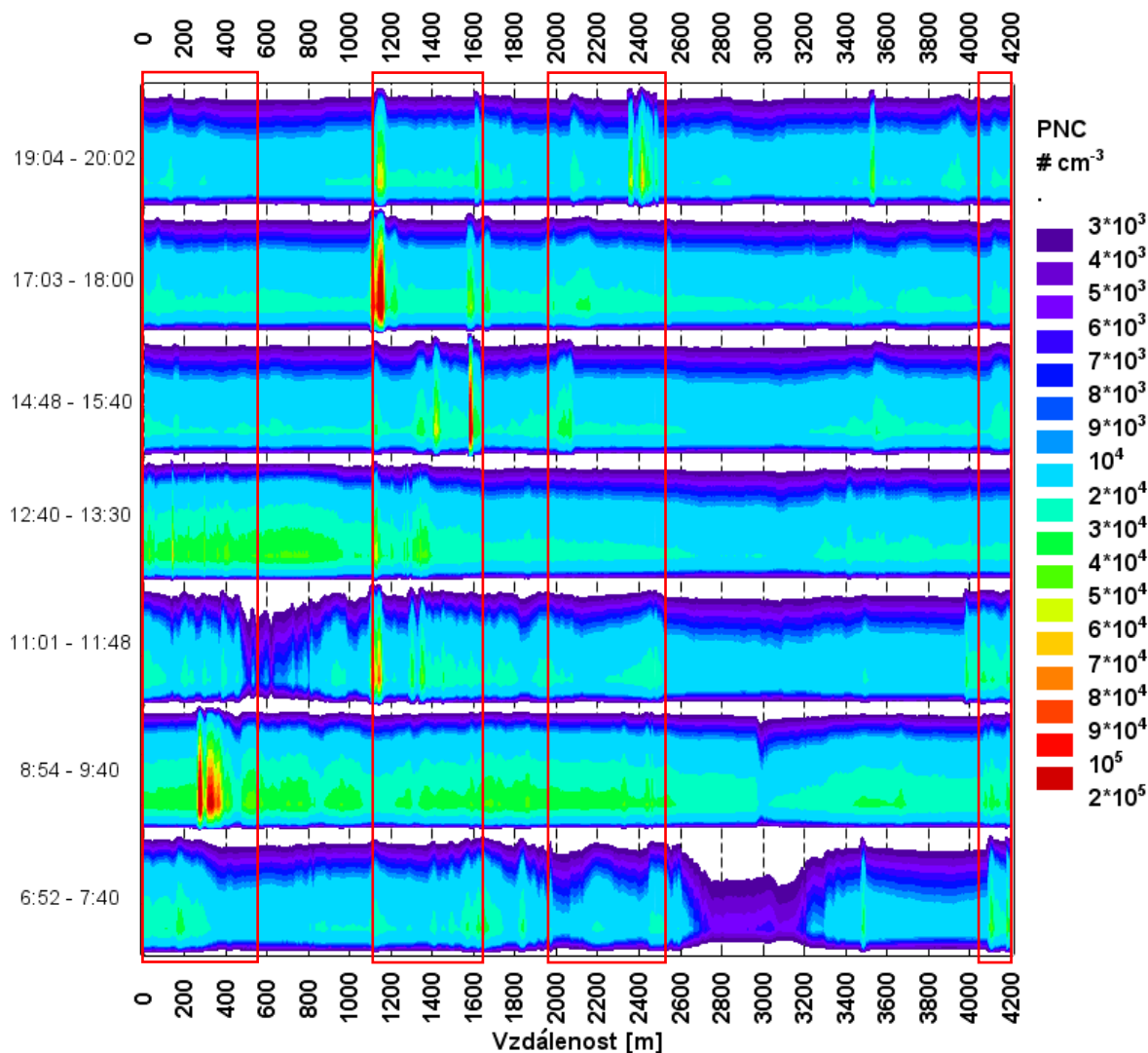
Úsek od – do [m]	Název hot-spotu $PM_{2.5}$
1050 - 1100	Na Panence
1760 - 1860	Pod Veselovem
2020 - 2050	Pod Ves. - V Zátíší
3365 - 3390	Ve Štědrém 1
3475 - 3525	Ve Štědrém 2
4040 - 4100	Ke Kačáku - Hlavní



Obrázek 9: Komín lokálního topeniště, hot-spot $PM_{2.5}$, Ve Štědrém 2, 1. procházka.

Během mobilního měření PNC docházelo k nepravidelným nárůstům v úsecích procházky 0-500 m, 1100-1600 m, 2000-2500 m a 4050-4200 m (Obrázek 10). Společnou charakteristikou těchto úseků je, že se jednalo o úseky měření u silničních komunikací v obci. Nejvýraznější nárůst nastal během 2. procházky v úseku 300 - 400 m, zároveň nejnižší hodnoty PNC panovaly během

1. procházky v úseku 2700 – 3200 m a 3 procházky v úseku 600 – 800 m. Oba tyto úseky se nachází v extravilánu obce, tedy na loukách a v lese.

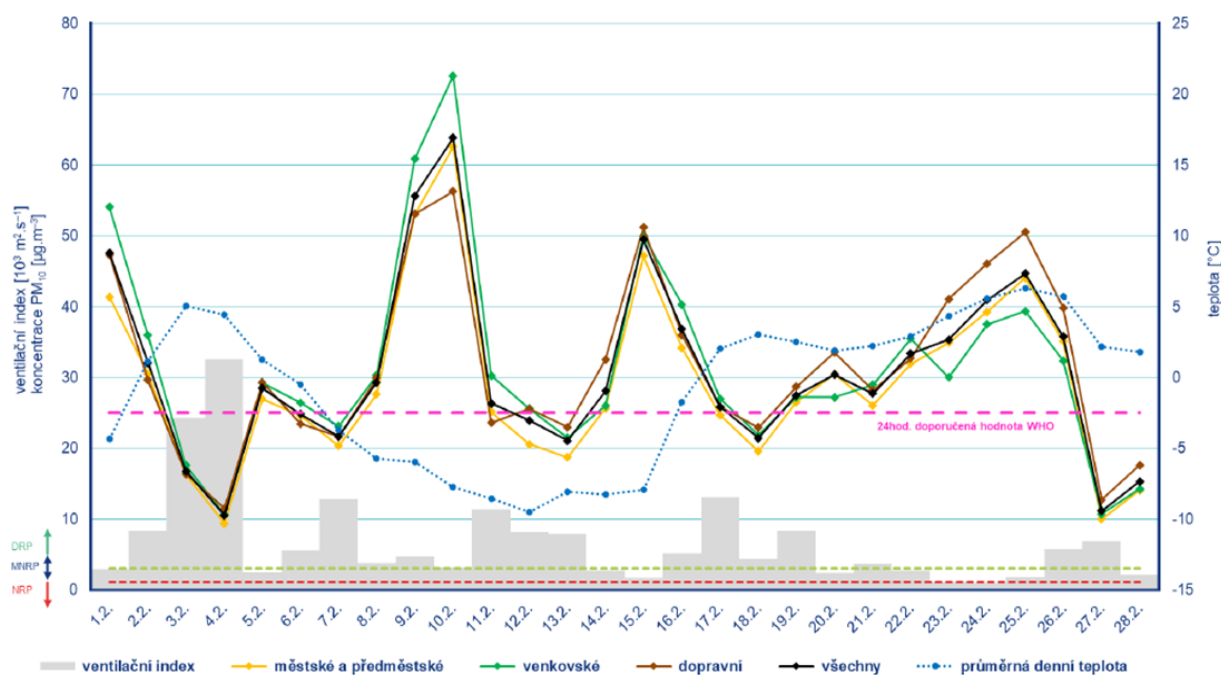


Obrázek 10: PNC v cm^{-3} během jednotlivých procházek v závislosti na uražené vzdálenosti s vyznačením úseků, ve kterých se chodilo vedle silniční komunikace.

3 Diskuse

3.1 Stacionární měření

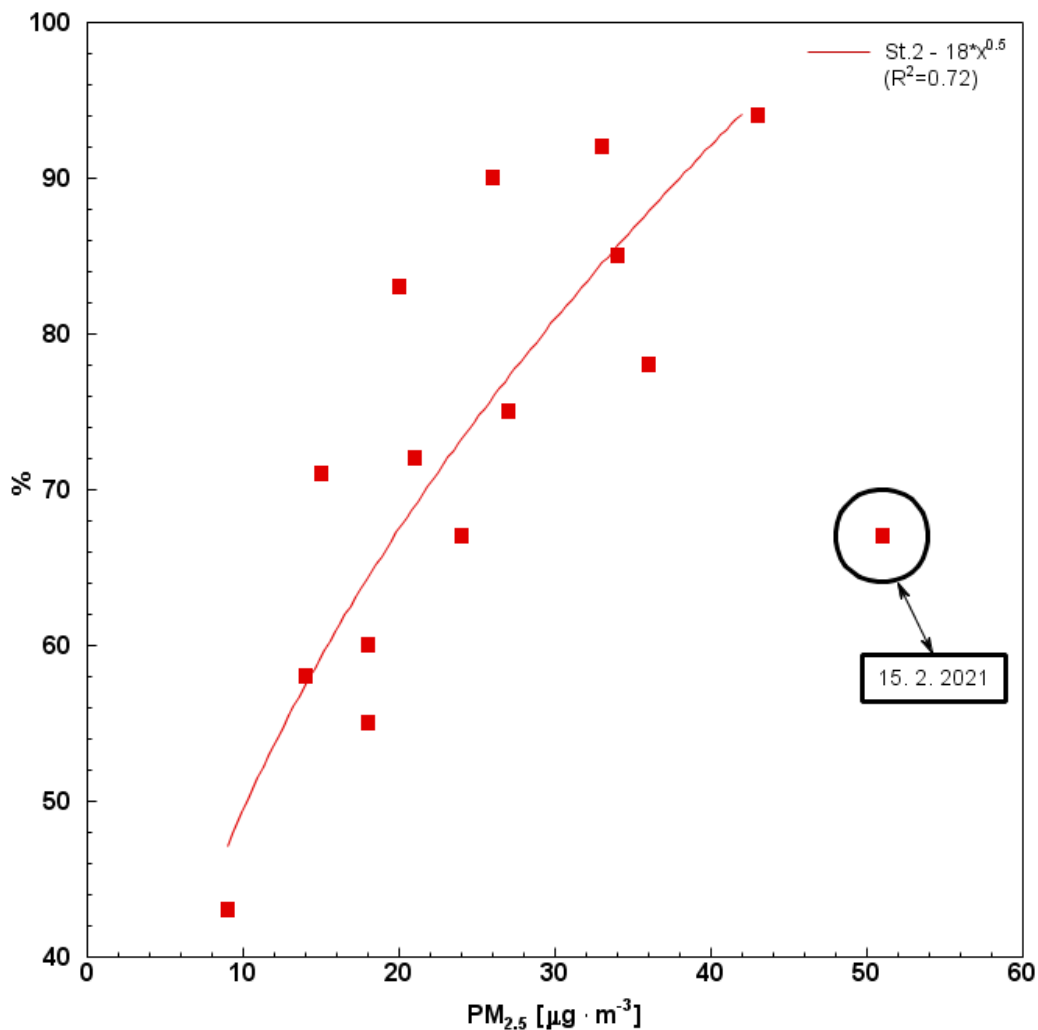
Nadlimitní průměrné denní koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ ve sledovaném období se především vyskytovaly za nízkých teplot, nízké rychlosti větru a rostoucího tlaku vzduchu. V takové situaci se emise škodlivin ze zdrojů s nízkou emisní výškou hromadí v přízemní vrstvě vzduchu (Hovorka, et al., 2016). Vzniklá meteorologická situace stabilního rázu počasí potlačuje vliv dálkového transportu škodlivin (Wallace, et al., 2010; Bendl, et al., 2017). Zároveň ale dne 15. 2. k tomuto



Obrázek 11: Celorepublikový průběh denních koncentrací $PM_{2,5}$, denního průměru teploty vzduchu a ventilačního indexu, únor 2021 (ČHMI, 2021).

zhoršení rozptylu škodlivin došlo i v regionálním měřítku na celém území ČR (Obrázek 11) v důsledku stabilního rázu počasí, charakterizovaný nízkou oblačností a slabým větrem z důvodu výskytu tlakové výše nad střední Evropou (ČHMI, 2021). Ačkoli obvykle během měřicí kampaně stoupal procentuální podíl a příspěvek lokálních topenišť k průměrné denní koncentraci $PM_{2,5}$ souběžně, dne 15. 2. vlivem stabilního rázu počasí na celém území ČR byl relativní podíl topenišť na hladinu $PM_{2,5}$ v obci nižší (Obrázek 12).

Průměrné denní koncentrace $PM_{2,5}$ na některých stanovištích v Družci byly v období měřicí kampaně vyšší než republikové průměry $PM_{2,5}$ (Obrázek 4 a Obrázek 11). Důvodem tohoto zvýšení koncentrace $PM_{2,5}$ byly emise lokálních topenišť na pevná paliva, jejichž komíny ústí několik metrů nad zemí. Krátkodobé a epizodické rychlé nárůsty a poklesy koncentrací $PM_{2,5}$, které indikují blízkost lokálního topeniště od monitoru DustTrak™ (Brantley, et al., 2014), v průměru zvyšovaly koncentrace $PM_{2,5}$ ze 61-72 % na znečištěných stanovištích, ze 40-49 % na pozadových stanovištích. Tomu odpovídá zvýšení denní koncentrace $PM_{2,5}$ o $16\text{-}25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ na exponovaných oproti $6\text{-}10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ na pozadových stanovištích.



Obrázek 12: Mocninná regrese procentuálního příspěvku lokálních topenišť k průměrné denní koncentraci PM_{2.5} v jednotlivých dnech na stanovišti 2. Den 15. 2. je odlehlý, a proto není součástí mocninné regrese. Takový trend se udál na všech stanovištích.

3.2 Mobilní měření

V průběhu ranních procházek, za velmi nízkých teplot a malé rychlosti větru, se v přízemní vrstvě vzduchu hromadily škodliviny z lokálních topenišť i po mrazivé noci. Proto jsou během ranních procházek zjištěny nejvyšší koncentrace PM_{2.5} (Tabulka 7).

Všechny možné hot-spots PM_{2.5}, kromě Pod Ves. - V Zátíší, se nacházely v zastavěných částech vesnice, kde lze předpokládat přímý vliv emisí PM_{2.5} z lokálních topenišť. Naopak oblast Pod Ves. - V Zátíší se liší od ostatních úseků z důvodu slabého zastavění svého okolí a větší otevřenosti prostranství. To může napomáhat potlačování turbulentní difuze PM_{2.5} zodpovědné

za rychlý nárůst a pokles koncentrace PM_{2.5} na stanovišti s epizodickým a krátkodobý průběhem. I přesto se ale v tomto úseku nachází možný hot-spot PM_{2.5} (Tabulka 8).

Denní chod koncentrace PM_{2.5}, tj. pokles z ranních maxim během poledne s opětovným večerním nárůstem a výskyt hot-spotů PM_{2.5}, je zapříčiněn nejenom podmínkami rozptylu škodlivin, tedy rychlostí větru a tloušťkou přízemní vrstvy vzduchu, ale i denním chodem emisní mohutnosti lokálních topenišť. Ta je dána obsluhou topeniště, stádiem hoření a intenzitou vytápění. Ráno a večer jsou občané obce doma a tomu i odpovídá zvýšená intenzita a potřeba vytápění. Spolupůsobení meteorologických a lidských faktorů pak vede ke zvýšení koncentrace PM_{2.5} v hot-spotech vůči průměrné koncentraci PM_{2.5} během ranních a večerních procházek o 2-56 % (Tabulka 9). Tento průběh je víceméně stejný pro všechny hot-spoty PM_{2.5} kromě Na Panence, kde se výrazné navýšení koncentrace PM_{2.5} objevilo pouze během první procházky a bylo pravděpodobně z části zapříčiněno projíždějícím starším modelem autobusu hromadné dopravy po blízké hlavní silnici.

Tabulka 9: Procentuální navýšení PM_{2.5} v hot-spotech PM_{2.5} nad průměrnou koncentrací PM_{2.5} během jednotlivých procházek, Družec 15. 2. 2021.

Procházka	Na Panence	Pod Veselovem	Pod Ves. - V Zátíší	Ve Štědrém 1	Ve Štědrém 2	Ke Kačáku-Hlavní
	%	%	%	%	%	%
1	63	36	56	55	39	54
2	0	44	39	29	26	8
3	0	3	0	0	0	0
4	0	12	5	9	15	10
5	0	5	0	0	5	37
6	2	24	16	2	19	42
7	0	26	29	18	13	9

Mobilní měření tedy ve výsledku potvrdilo výskyt pěti hot-spotů PM_{2.5} a to: Pod Veselovem, Pod. Ves. - V Zátíší, Ve Štědrém 1, Ve Štědrém 2, Ke Kačáku-Hlavní. V místech hot-spotů PM_{2.5} byly zároveň vyfotografovány kouřící komíny topenišť (Příloha - obrázek 4, Příloha - obrázek 5, Příloha - obrázek 6) a tím byla potvrzena příčinná souvislost mezi zvýšenou koncentrací PM_{2.5} a lokálními topeništi na pevná paliva.

Podobně s myšlenkou denního chodu lze pokračovat i v úvaze, o kolik procent naopak klesla hodnota PM_{2.5} ve srovnání s průměrnou koncentrací PM_{2.5} celé procházky při procházení extravilánem obce. Za extravilán se v tomto konkrétním případě myslí louky v uražené vzdálenosti 510 - 620 m a louka a les 2490 - 3350 m od počátku procházky (Příloha - obrázek

7Příloha - obrázek 8Příloha - obrázek 10Příloha - obrázek 11Příloha - obrázek 12Příloha - obrázek 13Příloha - obrázek 14). Obecné pravidlo, že v intravilánu dosahují znečišťující látky vyšších koncentrací než v extravilánu (Bereitschaft, et al., 2013) platí i pro měření v Družci (Tabulka 10).

Tabulka 10: Průměrný pokles koncentrace PM_{2.5} [%] v extravilánu obce vůči průměrné koncentraci PM_{2.5} během jednotlivých procházek, Družec 15. 2. 2021.

Procházka	1	2	3	4	5	6	7
Les a louky [%]	20	16	20	8	11	3	17

Situace během dne je proměnlivá a určit významnost vysokých koncentrací PM_{2.5} v krátkém časovém úseku oproti denním nebo ročním limitům pro PM_{2.5} na zdraví nelze. K tomu slouží odhad dávky PM_{2.5}. Odhad dávky PM_{2.5} je ale komplikovaný, protože závisí na mnoha faktorech jako frekvence a hloubka dýchání, zdravotní stav a věk jednotlivce a jiné. Nicméně, pro zjednodušení lze uvažovat, že za klidového režimu člověk prodýchá přibližně 10 litrů vzduchu za minutu, to je 600 litrů (0,60 m³) za hodinu a 14 400 litrů (14,4 m³) za den. Vynásobením objemu respirace limitem pro PM_{2.5} za 24/1 hod tak dostáváme pro klidový režim dýchání denní/hodinovou dávku 504/21 μg PM_{2.5}. Analogicky tak lze spočítat dávku PM_{2.5} během jednotlivé procházky a následně celkem během všech procházek (Tabulka 11). Dne 15. 2. se celková dávka PM_{2.5} během procházek (25 % času dne) blížila denní dávce PM_{2.5}.

Tabulka 11: Celková dávka PM_{2.5} (μg) během jednotlivých procházek

Procházka	Celková dávka PM _{2.5} [μg]
1	64
2	104
3	48
4	42
5	64
6	76
7	86
Celkem	484

Růst PNC indikuje, podobně jako PM_{2.5}, lokální topeniště. Je to dáno tím, že topeniště emitují aerosolové částice o aerodynamickém průměru větším i menším nežli 1 mikrometr (Obaidullah, et al., 2013). S teplotou topeniště a množstvím kyslíku obvykle klesá velikost emitovaných aerosolových částic a obráceně. Hmotnost částice roste s třetí mocninou její velikosti neboli, je-li poměr velikostí částic o aerodynamickém průměru 2,5 μm a 250 nm deset, pak poměr jejich hmotnosti je tisíc. Vysoké hodnoty PNC se tak nemusí projevit růstem koncentrace PM_{2.5} (Johansson, et al., 2007; Dahari, et al., 2021). Proto hodnoty PNC během jednotlivých procházek nerostou výhradně pouze v hot-spotech PM_{2.5}, způsobené lokálními topeništi, ale i v úsecích procházky ovlivněných mobilními zdroji částic, tím jsou automobily a doprava obecně. Například

diesellové motory emitují zejména částice o velikosti menší než 50 nm (Kittelson, 1998), a i značné hodnoty PNC tak nemusí vést ke zvýšeným koncentracím PM_{2.5}.

Závěr

Stacionární měření v obci Družec odhalilo výraznou heterogenitu koncentračního pole PM_{2.5} v prostoru a čase, zapříčiněnou zejména provozem lokálních topenišť na tuhá paliva. Během špatným rozptylových podmínek, charakterizovaných nízkou rychlostí větru a nízkou teplotou vzduchu, docházelo ke zvýraznění heterogenity koncentračního pole PM_{2.5}, což je v souladu s našimi předpoklady, a k běžnému překračování 24hod. limitu US-EPA pro PM_{2.5} v obci. Zároveň bylo odhaleno, že i hluboko v intravilánu obce lze mít ovzduší s nízkými koncentracemi PM_{2.5}.

Mobilní měření vteřinových koncentrací PM_{2.5} rozšířilo náhled do mikroměřítko obce a výsledky měřicí kampaně obohatilo o úseky vysokých koncentrací PM_{2.5}, hot-spoty PM_{2.5}. Společně s dokumentováním mobilního měření byl potvrzen předpoklad lokálních topenišť jako dominantního zdroje PM_{2.5} v obci, a navíc bylo odhaleno, že chodníky podél silničních komunikací jsou další místa možné expozice aerosolovým částicím v obci, tentokrát emitovaným z mobilních zdrojů PM_{2.5}.

Skutečný zdravotní dopad zvýšených koncentrací PM_{2.5} v ovzduší obce ale může být větší, než odpovídá pouze porovnání hmotnostních koncentrací PM_{2.5}. Aerosolové částice z topenišť na pevná paliva obsahují při špatném režimu spalování, vysoké koncentrace karcinogenního a genotoxického benzo[a]pyrenu a dalších polycyklických aromatických uhlovodíků. Limitní roční hodnota 1 ng·m⁻³ pro benzo[a]pyren tak může být snadno několikanásobně překročena (Topinka, et al., 2013), i když není překročen 24hod. limit US-EPA pro PM_{2.5}.

Pokud bychom využitou metodiku stacionárního měření, která byla použita pro stanovení koncentračního pole PM_{2.5} v ovzduší obce Družec, obohatili o anemometry a 360° kamery, dokázali bychom tak vylepšit poznatky průběhu koncentrace PM_{2.5} na jednotlivých stanovištích. S využitím anemometru, sledující rychlost a směr větru, bychom dokázali lokalizovat oblast zdroje znečištění, a pokud by byl takovýto zdroj znečištění blízký, tak by kamera při dobré viditelnosti zaznamenala digitální obraz zdroje.

Reference

- Anderson, H. (2009). Air pollution and mortality: A history. *Atmospheric Environment*, 43(1), pp. 142-152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.026>
- André, N. (2005). Air Pollution-Related Illness: Effects of Particles. *Science*, 208(5723), pp. 804-806. doi:10.1126/science.1108752
- Barmpadimos, I., Keller, J., Oderbolz, D., Hueglin, C., & Prévôt, A. (2012). One decade of parallel fine (PM_{2.5}) and coarse (PM₁₀–PM_{2.5}) particulate matter measurements in Europe: trends and variability. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(7), pp. 3189-3203. doi:10.5194/acp-12-3189-2012
- Bendl, J., & Hovorka, J. (2017). Temperature and Relative Humidity Vertical Profiles within Planetary. *IOP Conference Series-Earth and Environmental Science*, 95, p. 052003. doi:10.1088/1755-1315/95/5/052003
- Bereitschaft, B., & Debbage, K. (2013). Urban Form, Air Pollution, and CO₂ Emissions in Large U.S. Metropolitan Areas. *The Professional Geographer*, 65(4), pp. 612-635. doi:10.1080/00330124.2013.799991
- Braniš, M., Vyškovská, J., Malý, M., & Hovorka, J. (2010). Association of size-resolved number concentrations of particulate matter with cardiovascular and respiratory hospital admissions and mortality in Prague, Czech Republic. *Inhalation Toxicology*, 22 Suppl 2, pp. 21-8. doi:10.3109/08958378.2010.504758
- Brantley, H., Hagler, G., Kimbrough, E., Williams, R., Mukerjee, S., & Neal, L. (2014). Mobile air monitoring data-processing strategies and effects on spatial air pollution trends. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(7), pp. 2169-2183. doi:10.5194/amt-7-2169-2014
- Brook, R., Rajagopalan, S., Pope, C., Brook, J., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A., . . . Kaufman, J. (2010). Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease. *Circulation*, 121(21), pp. 2331-2378. Retrieved from <https://www.ahajournals.org/doi/abs/10.1161/CIR.0b013e3181dbee1>

- Buchholz, S., Andreas, K., Jürgen, J., & Günther, H. (2014). Size-Segregated Atmospheric Particle Mass Concentration in Urban Areas in Luxembourg. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(4), p. 1891. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1891-3>
- ČHMI. (2021). *Český Hydrometeorologický Institut*. Retrieved April 17, 2022, from Kvalita ovzduší na území České republiky, únor 2021: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/mes_zpravy/UNOR_2021.pdf
- Dahari, N., Muda, K., Latif, M., Dominick, D., Hussein, N., & Khan, M. (2021). Seasonal variations of particle number concentration and its relationship with PM2.5 mass concentration in industrial-residential airshed. *Environmental Geochemistry and Health*. doi:10.1007/s10653-021-01099-3
- Elminir, H. (2005). Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of The Total Environment*, 350(1), pp. 225-237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.043>
- Eurostat. (2018). *European Statistics*. Retrieved 4 17, 2022, from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/edn-20200207-1>
- Hiebl, J., & Schöner, W. (2018). Temperature inversions in Austria in a warming climate changes in space and time. *Meteorologische Zeitschrift*, 27(4), pp. 309-323. doi:10.1127/metz/2018/0899
- Hovorka, J., Cecilia, L., Dočekalová, V., Ondráček, J., & Zíková, N. (2016). Aerosol Distribution in The Planetary Boundary Layer Aloft a Residential Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 44, p. 052017. doi:10.1088/1755-1315/44/5/052017
- Hovorka, J., Pokorná, P., Hopke, P., Křůmal, K., Mlkuška, P., & Píšová, M. (2015). Wood combustion, a dominant source of winter aerosol in residential district in proximity to a large automobile factory in Central Europe. *Atmospheric Environment*, 113, pp. 98-107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.068>
- Johansson, C., Norman, M., & Gidhagen, L. (2007). Spatial & temporal variations of PM10 and particle number concentrations in urban air. *Environmental Monitoring and Assessment*, 127(1), pp. 477-487. doi:10.1007/s10661-006-9296-4

- Ki-Hyun, K., Ehsanul, K., & Shamin, K. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, pp. 136-143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Kim, E., Hopke, P., Pinto, J., & Wilson, W. (2005). Spatial variability of fine particle mass, components, and source contributions during the regional air pollution study in St. Louis. *Environmental Science & Technology*, 39(11), pp. 4172-4179. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/es049824x>
- Kittelson, D. B. (1998). Engines and nanoparticles: a review. *Journal of Aerosol Science*, 29(5), pp. 575-588. doi:[https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(97\)10037-4](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(97)10037-4)
- Kortekand, M., de Vries, J., van Berkel, P., & de Bruyn, S. (2022). Health-related social costs of air pollution due to residential heating and cooking. Retrieved from Health-related social costs of air pollution due to residential heating and cooking: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/CE_Delft_210135_Health-related_social_costs_of_residential_heating_and_cooking_Def_29march22.pdf
- MŽP. *Ministerstvo životního prostředí*. Retrieved April 17., 2022, from https://www.mzp.cz/cz/lokalni_topeniste
- Obaidullah, M., Bram, S., Verma, V., & De Ruyck, J. (2013). A Review on Particle Emissions from Small Scale Biomass Combustion. *International Journal of Renewable Energy Technology*, 2(1), pp. 147-159.
- Penner, J., Andreae, M., Annegarn, H., Barrie, L., Feichter, J., Hegg, D., . . . Pitari, G. (2001). Aerosols, their Direct and Indirect Effects. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 289-348.
- Pinto, J., Lefohn, A., & Shadwick, D. (2004). Spatial Variability of PM_{2.5} in Urban Areas in the United States. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(4), pp. 440-449. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470919>
- Pokorná, P., Leoni, C., Schwarz, J., Ondráček, J., Ondráčková, L., Vodička, P., . . . Hopke, P. (2020). Spatial-temporal variability of aerosol sources based on chemical composition and particle number size distributions in an urban settlement influenced by metallurgical

- industry. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(31), pp. 38631-38643.
Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09694-0>
- Pope 3rd, C., T. Burnett, R., J. Thun, M., E. Calle, E., Krewski, D., Kazuhito, I., & D. Thurston, G. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287(9), pp. 1132-1141. Retrieved from <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
- Susanne, B., Joleen M., S., Constantinos, S., & Flemming R., C. (2009). Response of human alveolar macrophages to ultrafine, fine, and coarse urban air pollution particles. *Experimental Lung Research*, 29(1), pp. 29-44. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01902140303762>
- Szidat, S., Prévôt, A., Sandradewi, J., Alfarra, M., Synal, H.-A., Wacker, L., & Baltensperger, U. (2007). Dominant impact of residential wood burning on particulate matter in Alpine valleys during winter. *Geophysical Research Letters*, 34(5). doi:<https://doi.org/10.1029/2006GL028325>
- Topinka, J., Milcová, A., Schmuczerová, J., Kroužek, J., & Hovorka, J. (2013). Ultrafine particles are not major carriers of carcinogenic PAHs and their genotoxicity in size-segregated aerosols. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 754(1), pp. 1-6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.12.016>
- Wallace, J., Corr, D., & Kanaroglou, P. (2010). Topographic and spatial impacts of temperature inversions on air quality using mobile air pollution surveys. *Science of The Total Environment*, 408(21), pp. 5086-5096. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.020>

Přílohy



Příloha - obrázek 1 Umístění monitorů PM_{2.5} na stanovišti 2, Škola (vlevo) a na stanovišti 3, Starosta (vpravo).



Příloha - obrázek 2: Umístění meteostanice (vlevo) na stanovišti 3, Starosta a monitoru PM_{2.5} na stanovišti 4, Hlavní (vpravo).



Příloha - obrázek 3: Umístění monitoru PM_{2.5} na stanovišti 5, V Zátíší (vlevo) a na stanovišti 6, K Chatám (vpravo).



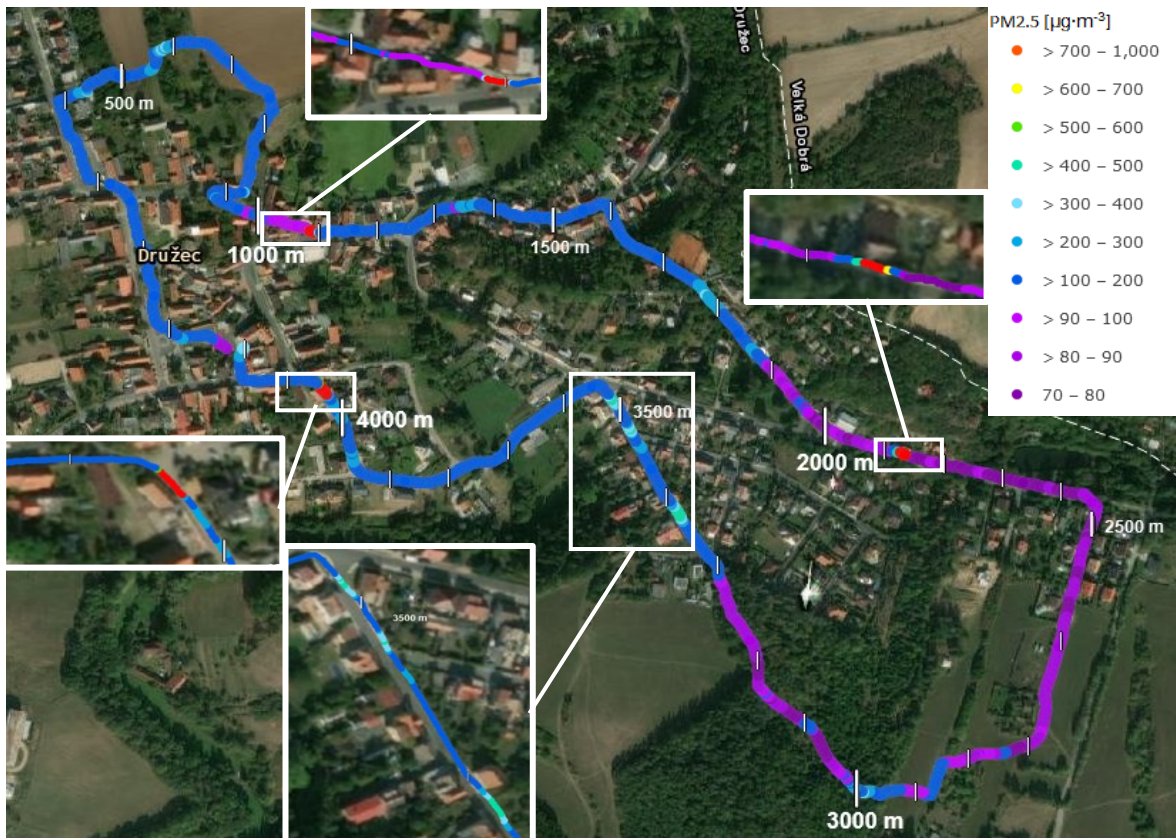
Příloha - obrázek 4: Na Panence, 1. procházka.



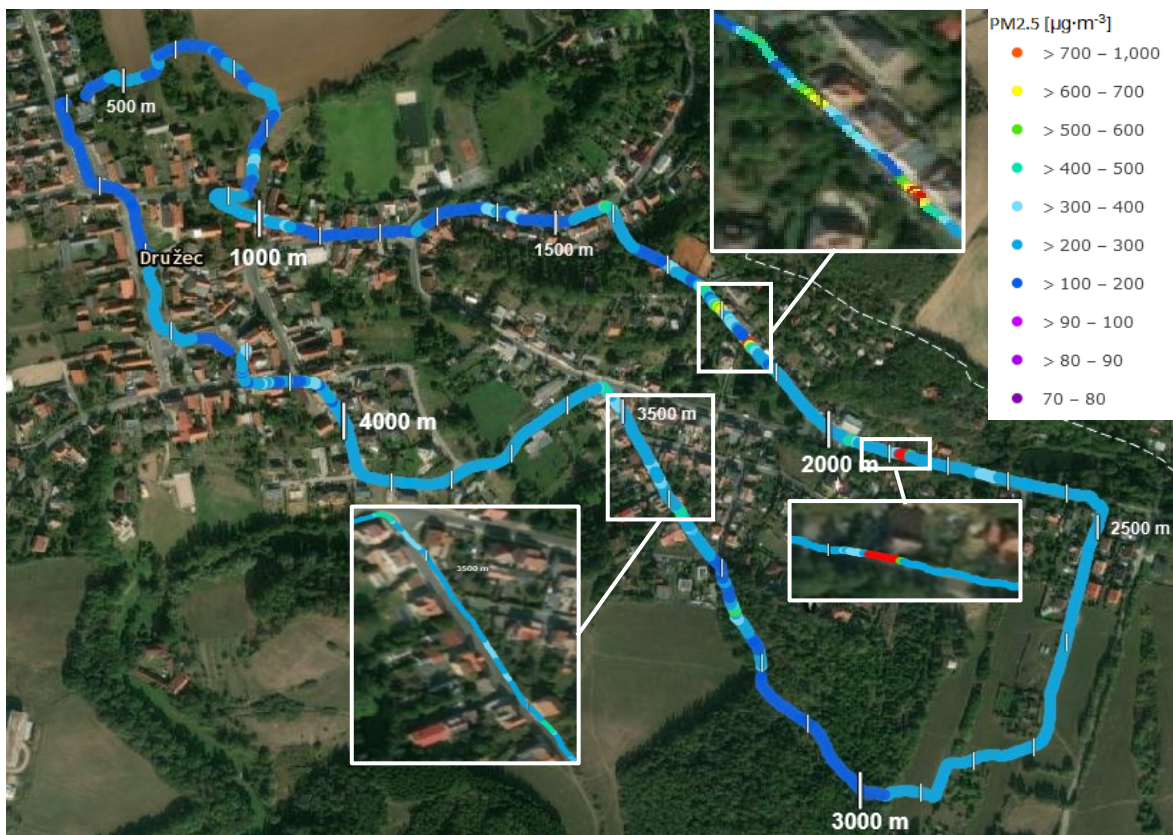
Příloha - obrázek 5: Komín topeniště, Pod Veselovem, 2. procházka.



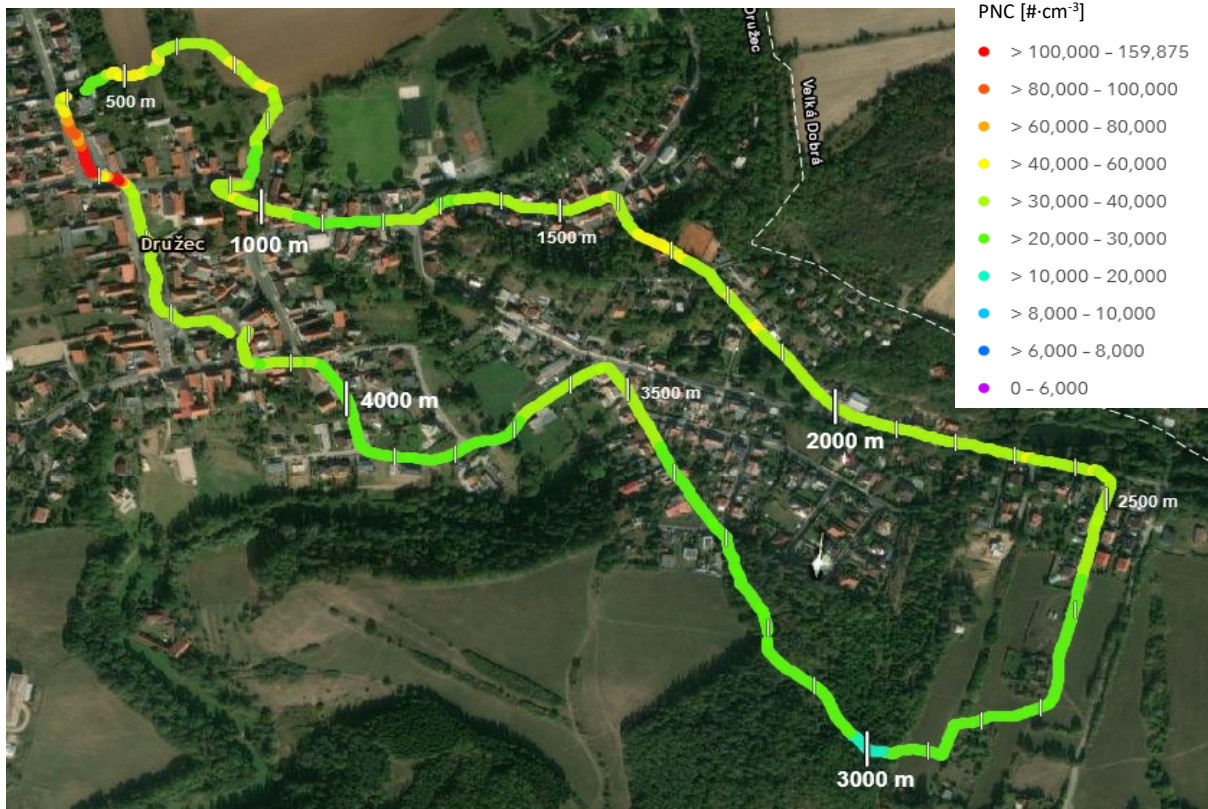
Příloha - obrázek 6: Komín topeniště, Pod Ves. - V Zátíší, 1. procházka.



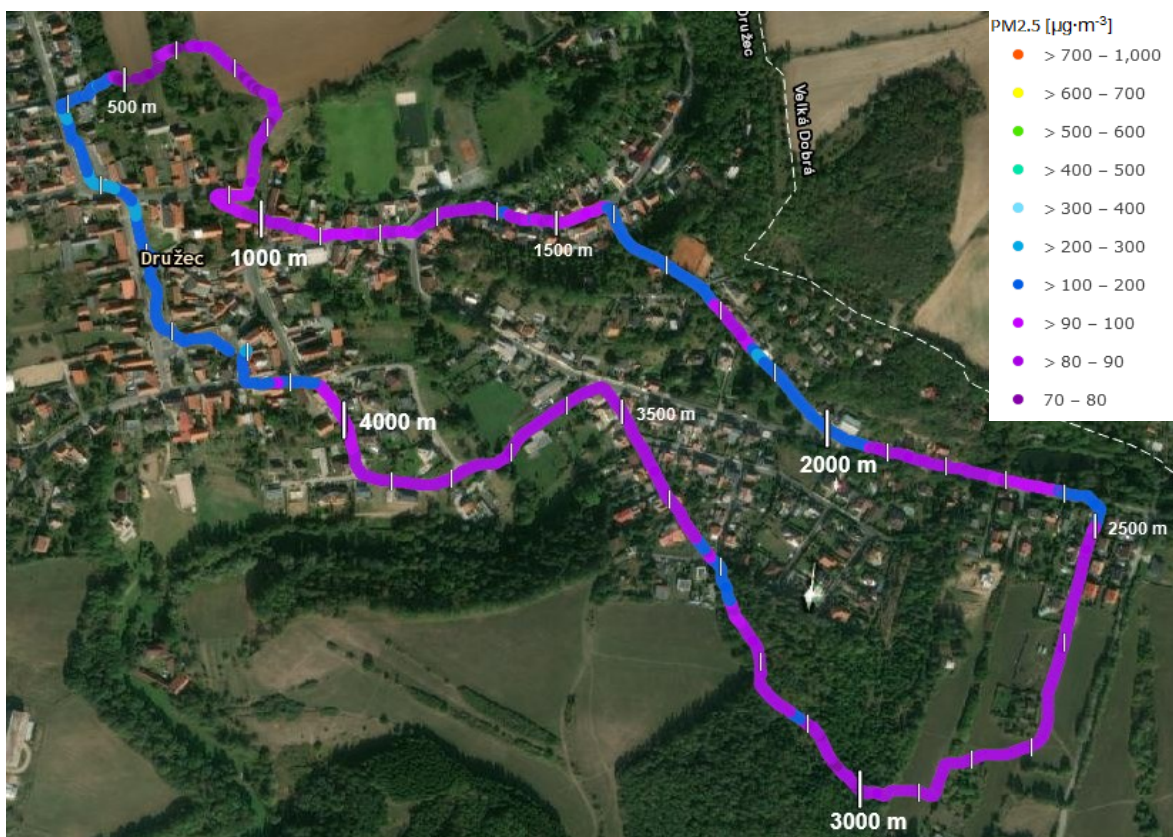
Příloha - obrázek 7: Průběh koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ během 1. procházky s vyznačenými úseky vysokých koncentrací $\text{PM}_{2.5}$.



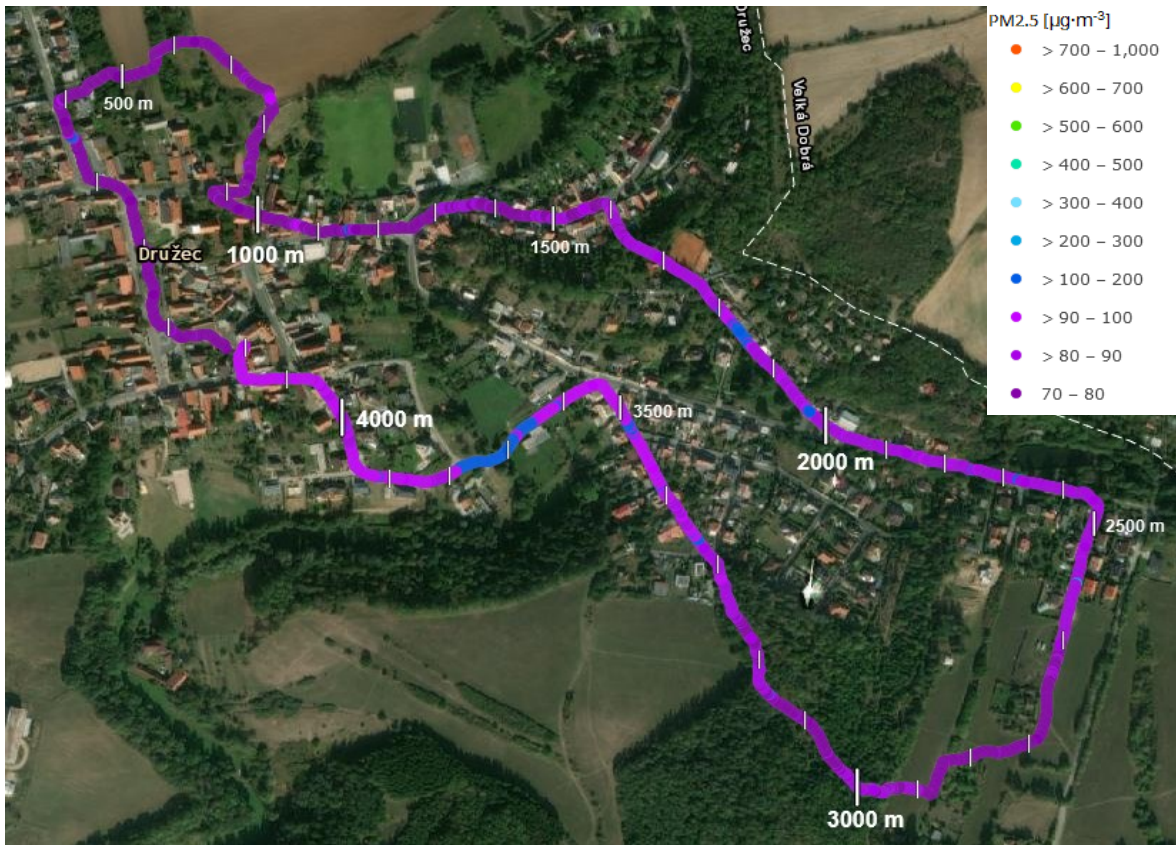
Příloha - obrázek 8: Průběh koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ během 2. procházky s vyznačenými úseky vysokých koncentrací $\text{PM}_{2.5}$.



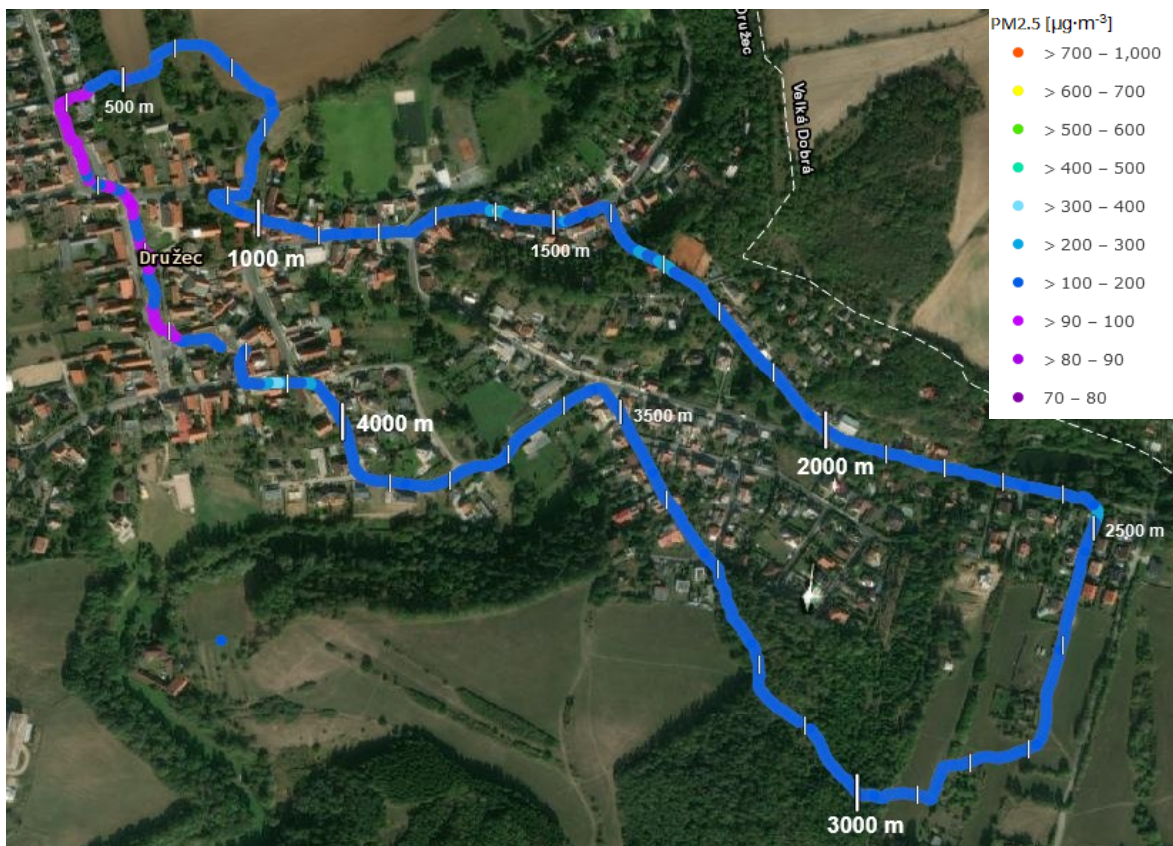
Příloha - obrázek 9: Průběh PNC během 2. procházky.



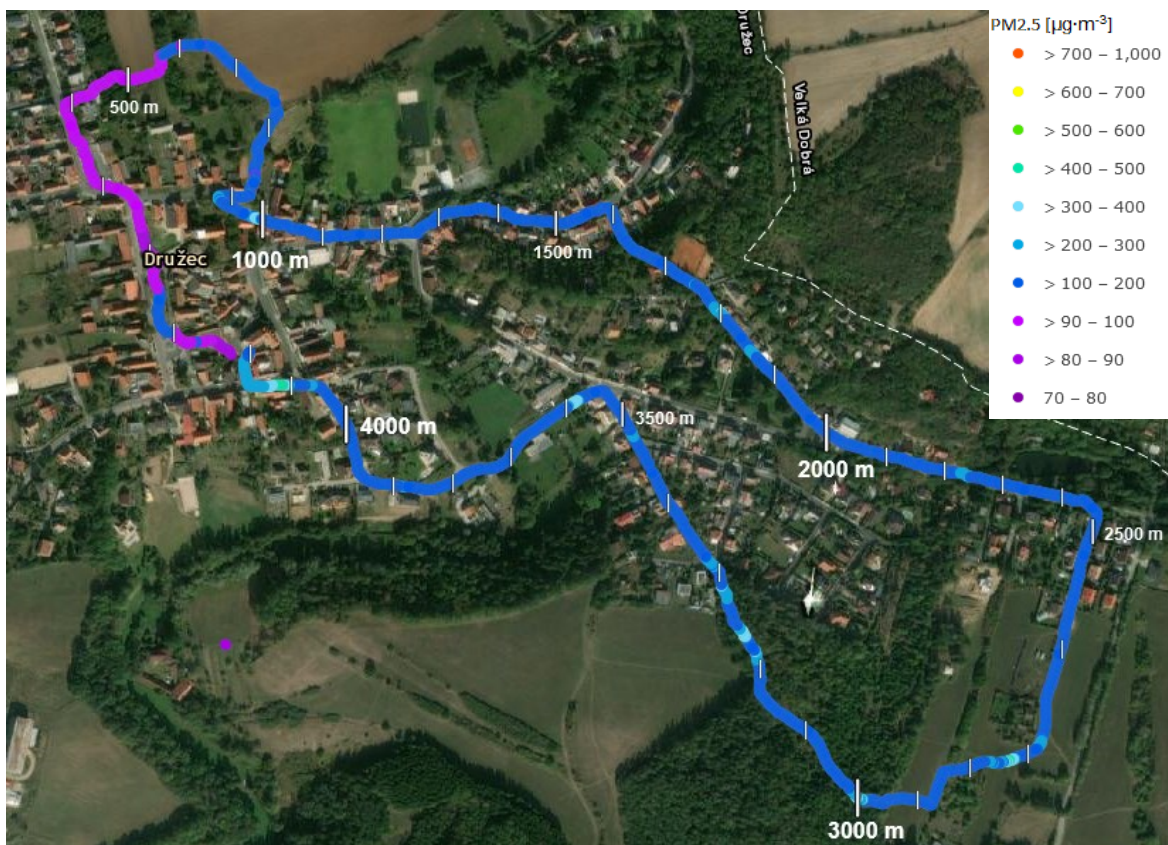
Příloha - obrázek 10: Průběh koncentrace PM_{2.5} během 3. procházky.



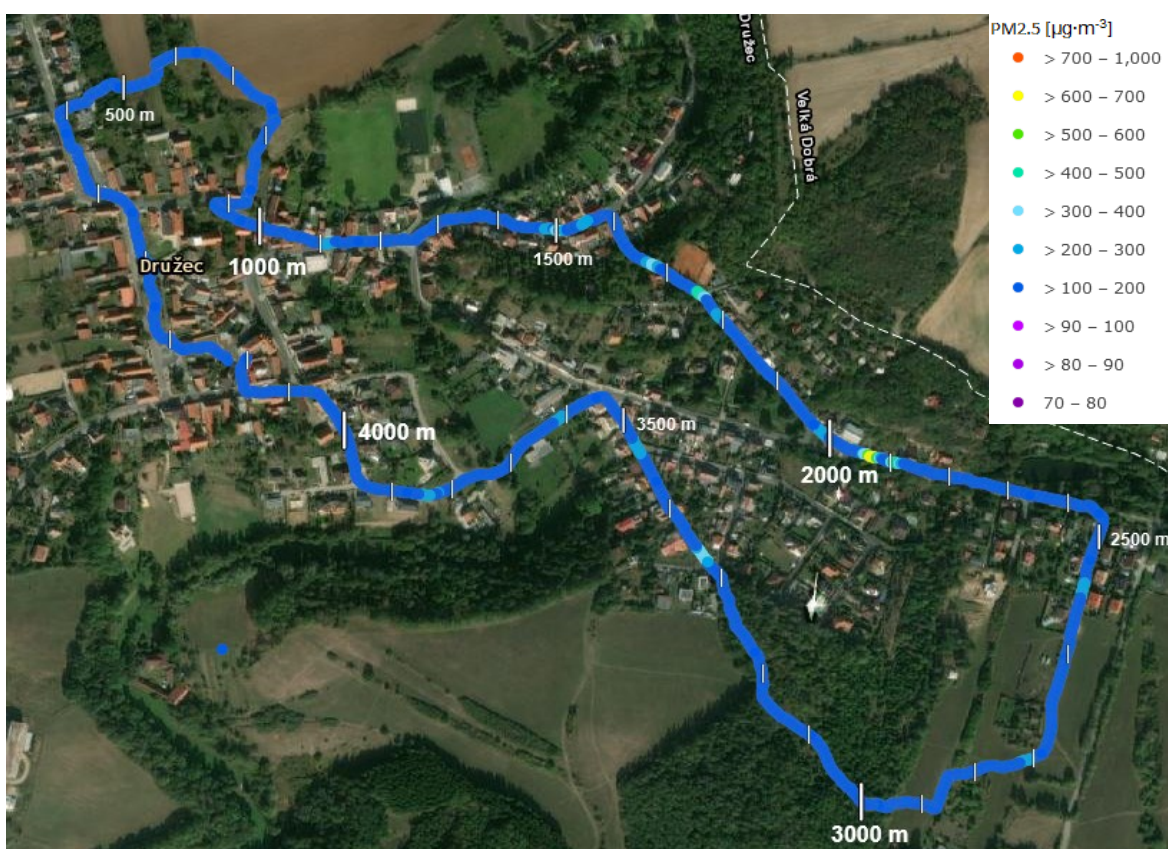
Příloha - obrázek 11: Průběh koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ během 4. procházky.



Příloha - obrázek 12: Průběh koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ během 5. procházky.



Příloha - obrázek 13: Průběh koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ během 6. procházky.



Příloha - obrázek 14: Průběh koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ během 7. procházky.