



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MORFOLOGIE ČÁSTIC POLÉTAVÉHO PRACHU

AEROSOL PARTICLES MORPHOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslava Odehnalová Šamanová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	Bc. Jaroslava Odehnalová Šamanová
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Morfologie částic polétavého prachu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Každý den přichází člověk do kontaktu s nepředstavitelným množstvím mikroskopických částic, volně poletujících v ovzduší kolem nás. Vzhled těchto částic je dán zejména jejich původem a podrobným zkoumáním pak lze rozlišit částice ze spalovacích či jiných technologických procesů, otěrů brzd a pneumatik, práce na poli, ale také částice biologického původu jako jsou pylly či výtrusy hub. Cílem rešeršní části bude shmout specifika polétavého prachu v ovzduší a uvést procesy, kterými částice ve vzduchu prochází. Praktickou částí pak bude odběr vzorků částic z různých zdrojů, které budou následně pod odborným dohledem zkoumány mikroskopicky. Ze získaných dat bude sestaven katalog typických částic daného zdroje. Následně budou vyhodnoceny dostupné záznamy imisního monitoringu ve vztahu k předpokládaným významným zdrojům částic a parametrům významně ovlivňujícím koncentraci částic v ovzduší.

Cíle diplomové práce:

1. Rešeršním způsobem představit problematiku aerosolových částic přítomných v ovzduší.
2. Experimentálně realizovat odběry vzorků částic z různých zdrojů a vyhodnotit jejich morfologii, koncentraci v ovzduší a další dostupné vlastnosti.
3. Vyhodnotit dostupné záznamy imisního monitoringu ve vztahu k předpokládaným významným zdrojům částic a parametrům významně ovlivňujícím koncentraci částic v ovzduší.

Seznam doporučené literatury:

HINDS, William C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. 2nd ed. New York: John Wiley, 1999, 483 s. ISBN 0-471-19410-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce se zabývá tématem polétavého prachu, který denně obklopuje každého člověka a jeho morfologii, velikostí a koncentracemi v ovzduší. Úvodní část práce obsahuje rešeršně popsané základní pojmy, vlastnosti, zdravotní rizika spojená s částicemi aerosolu a stručná legislativní stanoviska. V druhé, experimentální části práce jsou nejdříve popsány použité přístroje, následně jsou zde prezentovány výsledky příkladů emisních odběrů a odběry imisí s porovnáním naměřených koncentrací ve třech vybraných lokalitách – v obci, ve městě a v rodinném domě. Třetí část práce analyzuje volně dostupná data imisního monitoringu znečištění ovzduší, dlouhodobá data i mimořádné události jako například novoroční ohňostroje nebo požár lesa v Národním parku České Švýcarsko. Závěr práce shrnuje dosažené výsledky a přílohu práce tvoří Katalog prachových částic, ve kterém se nachází veškeré emisní odběry, které byly uskutečnány v rámci experimentální části.

Klíčová slova

Znečištění ovzduší, aerosol, suspendované částice, morfologie částic, imisní monitoring.

ABSTRACT

This thesis focuses on airborne Particulate Matter (PM), the floating dust that surrounds human beings every day, its composition, morphology, size and concentrations in the air. The first, introductory part of the thesis, describes the basic concepts, properties and health risks associated with aerosol particles, and relevant legislation. The second, experimental part of the thesis, describes the instruments used, followed by the results of emission sampling and immission sampling, and a comparison of measured concentrations in three selected locations: in a village, in a city, and in a family house. The third part, the analysis, investigates freely available air pollution immission monitoring data, including long-term data, data from occasional events such as New Year's fireworks, or sporadic occurrences such as a forest fire in České Švýcarsko national park. The conclusion summarises the achieved results, and the appendix consists of a catalogue of dust particles, in which all emission samplings carried out within the experimental part of the thesis are listed.

Key words

Air pollution, aerosol, suspended particles, particle morphology, immission monitoring.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ODEHNALOVÁ ŠAMANOVÁ, Jaroslava. *Morfologie částic polétavého prachu*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157869>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D., za skvělé vedení, cenné rady a možnosti zapůjčení a přístupu k optickému čítači částic a optickému mikroskopu, které byly použity během experimentu. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Tomáši Sitkovi, za jeho poznámky, odborný dohled při výzkumné části a možnost využití elektronového mikroskopu.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Polétavý prach.....	10
1.1 Rozdělení částic dle velikosti.....	10
1.2 Původ částic a procesy jimiž prochází v ovzduší.....	11
1.3 Nejvýznamnější zdroje znečišťování ovzduší.....	11
1.4 Resuspenze.....	12
1.4.1 Faktory ovlivňující vznik resuspenze	13
1.4.2 Zdroje resuspenze	13
1.4.3 Opatření proti vzniku resuspenze.....	14
1.5 Znečišťující látka a vliv na zdraví živého organismu	14
1.6 Legislativa a možná problematika s ní spojená	18
2 Experimentální část.....	20
2.1 Technologie použité pro odběr, zkoumání částic a měření koncentrací	21
2.1.1 Gorenje SVC216FR	21
2.1.2 Digitální mikroskop KEYENCE VHX-7100.....	22
2.1.3 Rastrovací elektronový mikroskop Tescan Lyra3	22
2.1.4 Optický přístroj TSI OPS 3330	23
2.2 Ukázka z emisních odběrů a katalogu polétavého prachu	24
2.2.1 Úlet z dílenských kamen	24
2.2.2 Výfukové emise	27
2.2.3 Poloautomatické svařování metodou MAG.....	29
2.3 Imisní odběr a měření koncentrací částic v ovzduší	32
2.3.1 Odběr v obytné zóně – vesnice	33
2.3.2 Odběr v obytné zóně – město.....	36
2.3.3 Odběr ve vnitřních prostorech rodinného domu	39
2.4 Shrnutí výsledků imisních odběrů a měření koncentrací	42
3 Analýza imisního monitoring.....	43
3.1 Klasifikace stanic imisního monitoringu	43
3.2 Stanice imisního monitoringu v Brně	44
3.3 Specifikace města Brna.....	45
3.4 Analýza dat stanic imisního monitoringu	45
3.4.1 Závislosti koncentrací částic na klimatických podmínkách – stanice imisního monitoringu Výstaviště, rok 2016.....	45
3.4.2 Závislosti koncentrací částic na klimatických podmínkách – stanice imisního monitoringu Svatoplukova, rok 2019.....	50

3.4.3 Stanice imisního monitoringu online, 2024, přímý vliv srážek.....	53
3.4.4 Centrum dopravního výzkumu – lokality Česká a Kuřim.....	54
3.4.5 Mimořádné události – požár Národního parku České Švýcarsko	57
3.4.6 Mimořádné události – ohňostroje.....	58
3.4.7 Mimořádné události – Saharský prach	59
3.5 Shrnutí výsledků analýzy imisního monitoringu.....	62
ZÁVĚR.....	63
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	64
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A JEDNOTEK.....	68
SEZNAM OBRÁZKŮ	69
SEZNAM TABULEK	71

ÚVOD

Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující zdraví každého živého jedince je znečištění ovzduší. Imisní a emisní limity znečišťujících látek se postupně zpřísňují a ovzduší se pro zdraví v posledních desetiletích výrazně lepší, avšak tato problematika bude vždy aktuální, protože nelze dosáhnout nulových hodnot znečišťujících látek.

Ve vzduchu se vyskytují některé částice přírodního původu – například pyl, výtrusy nebo částice způsobené sopečnou činností či požáry, a částice původu antropogenního – nejčastěji průmyslové a spalovací procesy. Tyto částice se od sebe liší velikostí, tvarem, koncentrací a dalšími vlastnostmi. Obecně však platí pravidlo, že čím menší velikosti částice mají, tím hlouběji se dostávají do živého organismu, a tím nebezpečnější mohou být. Zvyšují mortalitu týkající se převážně kardiovaskulárních a respiračních onemocnění. Mimo jiné aerosoly ovlivňují i viditelnost, smog a téměř veškeré meteorologické procesy.

Cílem této diplomové práce je rešeršně představit problematiku aerosolových částic přítomných v ovzduší, experimentálně realizovat odběry vzorků částic z různých zdrojů a vyhodnotit jejich morfologii, koncentraci a další dostupné vlastnosti a vyhodnotit dostupné záznamy imisního monitoringu ve vztahu k předpokládaným významným zdrojům částic a parametrům významně ovlivňujícím koncentraci částic v ovzduší.

1 Polétavý prach

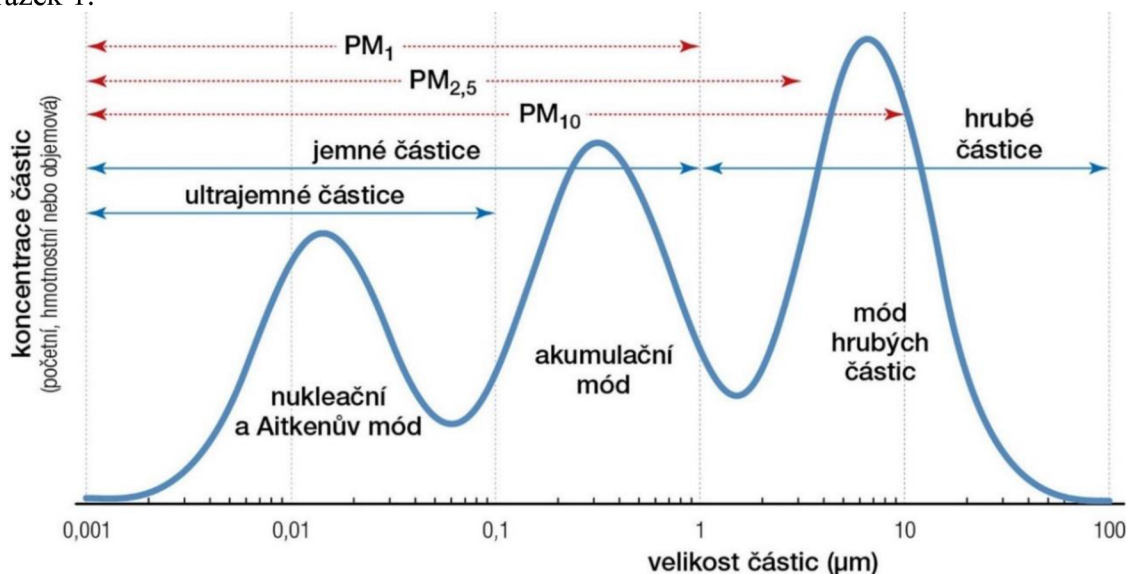
Polétavý prach je téměř synonymem k mnoha výrazům, které se používají v této problematice, nejčastěji užívaným pojmem je zřejmě aerosol („aero“ neboli vzduch a „solution“ neboli roztok) významově odpovídá heterogenní směsi malých pevných nebo kapalných částic obsažených v plynu v rozsahu velikostí 1 nm až 100 μm .

Další využívané pojmy pro pevné částice z ovzduší: tuhé znečišťující látky (TZL), tuhý aerosol, pevný aerosol nebo suspendované částice (SPM).

1.1 Rozdělení částic dle velikosti

Pro začlenění částic do velikostních kategorií se určuje tzv. aerodynamický průměr, který je dle norem definován jako průměr koule o hustotě 1 g cm^{-3} se stejnou konečnou rychlostí způsobenou gravitační silou v klidném ovzduší, jako má částice za obvyklých podmínek teploty, tlaku a relativní vlhkosti [1]. Umožňuje určit průměr i velmi tvarově nepravidelných částic.

Základní rozdělení člení částice na jemný a hrubý aerosol, pro drobnější klasifikaci se užívají velikostní módy (nukleární a Aitkenův mód, akumulární mód a mód hrubých částic). Jiné velikostní členění definuje zkratka PM (Particulate Matter) a číslo v dolním indexu, které udává maximální aerodynamický průměr částice v dané frakci v jednotkách μm . Vizte obrázek 1.



Obrázek 1: Koncentrace částic v závislosti na velikosti, velikostní kategorie [2].

Jemné částice se od hrubých výrazně liší původem i vlastnostmi. Jemné částice zahrnují převážně částice sekundárního původu (vizte kap. 1.2) a částice pocházející ze spalování, pH se pohybuje nejčastěji v kyselé oblasti, jsou částečně rozpustné a obsahují ve velké míře uhlíkaté sloučeniny, soli, sulfáty a nitráty. V ovzduší vydrží díky jejich nízké hmotnosti několik dní a vytváří tím tzv. stabilní aerosol. [4]

Hrubé částice patří obvykle mezi zásadité látky, vznikají spalováním, mechanickými procesy nebo jsou například rozptylovány sekundární prašností. Díky jejich vyšší hmotnosti často nedochází k jejich rozšíření do širokého okolí a sedimentují v řádu minut případně hodin do vzdálenosti nejvíce desítek kilometrů od zdroje znečištění. [2], [4]

1.2 Původ částic a procesy jimiž prochází v ovzduší

Částice dle původu lze rozdělit do dvou hlavních skupin, a to na primární – přímo emitované do atmosféry, a sekundární – vznikají reakcemi primárních částic bezprostředně v ovzduší, případně se jedná o znovu zvířené částice, které v minulosti již sedimentovaly.

Velký podíl primárních částic zaujímají částice antropogenního původu, které jsou tvořeny nebo způsobovány lidmi. Patří sem například: spalování (dřeva, uhlí, tuhých zbytků atd.), skládky odpadů, cementárny, vápenky, motorová vozidla, zemědělství (orba, hnojení apod.), těžba, cigaretový kouř, výpary z barev a laků, stavební práce nebo například vaření.

V globálním spektru převažuje podíl přírodních zdrojů primárních částic (obecně čím méně obydlené oblasti, tím větší podíl částic přírodního původu). K významným přírodním procesům, jež emitují částice do atmosféry patří například sopečné výbuchy, lesní požáry, eroze půdy, šíření pylů, virů, bakterií, výtrusů, mořského aerosolu nebo písečné a prachové větrné bouře. [2], [3]

Sekundární částice vznikají fyzikálními a chemickými procesy, případně se jedná o resuspendované částice, tedy částice, které se znovu se vrací do ovzduší zvířením v důsledku lidské činnosti nebo větru. Princip vzniku je důvodem, proč mohou sekundární částice vznikat i ve velkých vzdálenostech od zdrojů primárních částic. Nukleací a kondenzací plynů vznikají pevné částice nejmenší frakce zahrnující velikostní mód nukleační a Aitkenův. Složky těchto módů se dále srážejí a důsledkem koagulace, pohlcení plynů a další kondenzace zvětšují svoji velikost a přecházejí do akumulárního módu a dále. [2], [3], [4]

Mimo proudění větru, kdy se jedná o nejdůležitější faktor, je pohyb částic v ovzduší vyvolán i působením třecích a tlakových sil na jejich povrch. Tato teoretická odporová síla lze vyjádřit Stokesovým zákonem a případně jej korigovat faktorem zohledňující vlastní pohyb molekul plynné fáze a tvarovým faktorem, pakliže se nejedná o kulové částice. Tok nejjemnějšího aerosolu může být vyvolán i difuzí a je orientován opačným směrem než gradient koncentrací částic. Naopak částice větší, než nejjemnější aerosol podléhají spíše vlivu tíhových sil, který se projevuje pádovou rychlostí částic. [47]

Děj, při kterém částice opouští vzdušný prostor se nazývá depozice. Depozici probíhající v atmosféře lze rozdělit na suchou nebo mokrou. Nejúčinnějším způsobem odstranění částic z ovzduší je právě mokrá depozice, která se v přírodě děje v podobě dešťových srážek. Dostanou se však po tomto procesu zdraví škodlivé prvky, které původně byly v ovzduší do vod a půdy. [47]

1.3 Nejvýznamnější zdroje znečištění ovzduší

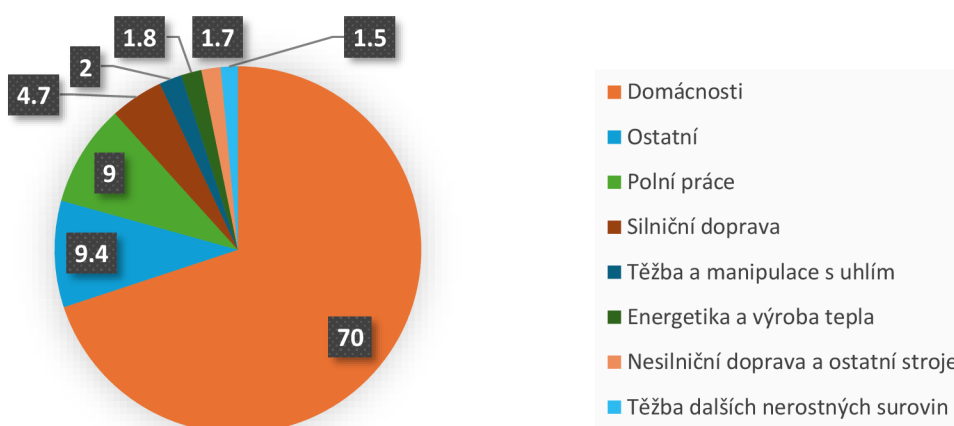
Sumárně patří k nejvýznamnějším zdrojům lokální topeniště, nejvyšší mírou spalování pevných paliv. Domácností se podílí na emisích částic kategorie PM_{2,5} každoročně asi 80 %. I přes dodržování veškerých zásad správného vytápění (přebytek kyslíku, kvalita paliva, údržba topeniště a tak dále), kotle, kamna a krby emitují velké množství tuhých částic. Mimo tuhé znečišťující látky lokální topeniště emitují do ovzduší až 98 % benzo(a)pyrenu. [15]

Dalším významným zdrojem znečištění je doprava. Kromě suspendovaných částic PM se do ovzduší dopravou dostávají ve velké míře oxidy dusíku, oxid uhelnatý a uhlovodíky. Prachové částice z dopravy pochází ve velké míře z výfukových cest, ale také z otěru brzdových destiček, otěru pneumatik, abrazií vozovky a v neposlední řadě velký podíl částic, které se dostávají do ovzduší dopravou může být způsoben resuspenzí již usazených částic. Na koncentraci látek vypouštějících do ovzduší dopravou má velký vliv intenzita dopravy, ale i plynulost dopravní situace. [15]

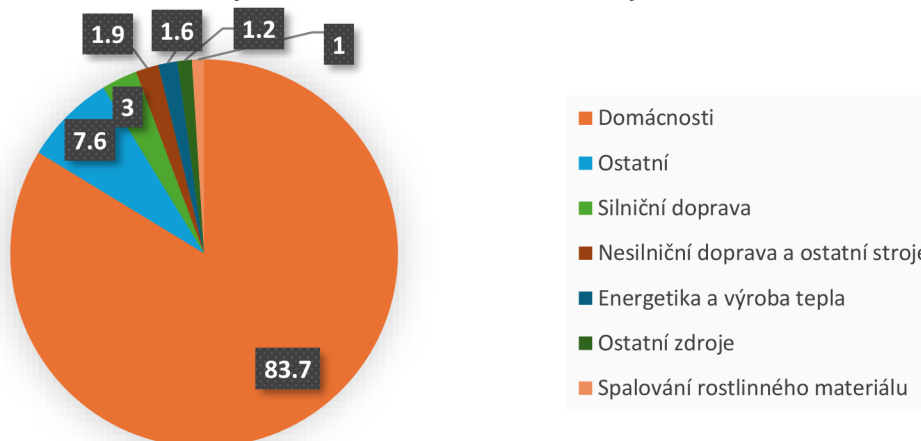
V průmyslu a energetice se jedná o střední a velké zdroje, které mají legislativně přísnější limity znečišťujících látek proti malým zdrojům (rodinné domy, veřejné budovy...). Provozovatelé těchto stacionárních zdrojů znečištění mají zákonem udělenou ohlašovací povinnost ohlašovat údaje z hlediska ovzduší související s jejich provozem. Tyto zdroje mají i zákonnou povinnost měřit koncentrace vypouštěných látek a některé z nich jsou zpoplatněny. Významnými zdroji suspendovaných částic jsou uhelné elektrárny a spalovny, ale patří do této kategorie i různé výroby, podniky zpracovávající různé materiály atd. Z hlediska prachových částic jsou nejvýznamnější zdroje, které pracují s vysokoteplotními procesy. [15]

V České republice poměrně velký podíl rozlohy zauímají zemědělské plochy, které také emitují znečišťující látky. Zákonem ČR je v oboru zemědělství kontrolována úroveň znečištění amoniakem. [15]

Na následujících obrázcích lze vidět zdroje znečištění suspendovaných částic PM_{2,5} a PM₁₀ vydané v roce 2022 Českým hydrometeorologickým ústavem ve shrnutí a ročence za rok 2021.



Obrázek 2: Zdroje částic PM₁₀ dle sektorů, údaje z CHMI [39].



Obrázek 3: Zdroje částic PM_{2,5} dle sektorů, údaje z CHMI [39].

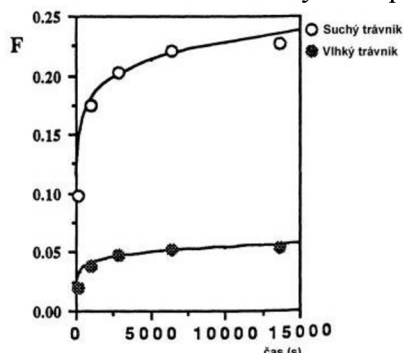
1.4 Resuspenze

Resuspenze neboli sekundární prašnost způsobena zviřením sedimentovaných částic a jejich následným rozptýlením do ovzduší. Dle původu lze částice rozdělit do dvou skupin, a to na částice ze zdrojů přírodních, případně antropogenních, které v minulosti již sedimentovaly na povrchu a na částice vzniklé erozí, rozpadem.

1.4.1 Faktory ovlivňující vznik resuspenze

Vznik resuspenze je ovlivněn několika faktory – vlastnostmi usazených částic, meteorologickými podmínkami a charakterem povrchu na kterém částice sedimentovaly.

Vlhkost povrchu, na kterém částice deponovaly značně ovlivňuje podíl sekundárních částic. Při rostoucí vlhkosti se částice shlukují, zvyšuje se jejich hmotnost a klesá pravděpodobnost zviření. Na mokřím povrchu nedochází ke zviření a s postupným vysycháním povrchu se zvyšuje počet resuspendovaných částic. Na následujícím obrázku lze vidět závislost zviřených částic v čase nad suchým a vlhkým trávníkem, kde F odpovídá kumulativnímu vyjádření podílu zviřených částic vůči částicím usazeným na povrchu. [13]



Obrázek 4: Podíl částic zviřených prouděním vzduchu nad travnatým povrchem [13].

Charakter povrchu jako celek ovlivňuje počet znovu zviřených částic do ovzduší. Vegetace (keře, stromy i travnaté porosty) účinně omezuje zviření a zároveň částice pohlcuje. Každý typ vegetace je specifický, avšak u nízkého trávníku (10 cm) podíl uvolněných částic do ovzduší roste s nárůstem rychlosti větru, kdežto u vysokého trávníku (25 cm) zůstává podíl uvolněných částic konstantně na nízkých hodnotách. [13]

Nejvíce sledovaným faktorem vzhledem k sekundární prašnosti je rychlost proudění vzduchu. Lze velmi těžko určit tzv. mezní rychlost větru při které sekundární prašnost vzniká, a to z důvodu změn v aktuálních podmínkách – vlhkost, povrch, a zároveň se mění pro různé velikostní kategorie částic. Z mnohých měření vyplývá fakt, že pro zvyšující se rychlost proudění větru roste podíl zviřených částic. Rovněž však při vyšších rychlostech větru dochází k účinnějšímu rozptýlení částic do vyšších hladin, což způsobuje jejich nižší koncentraci. Existuje tedy jistý interval v rychlostech proudění větru, kdy i přes rozptýlení částic nedochází k lineárnímu snižování jejich koncentrací, a to je způsobeno právě resuspenzí. [13]

1.4.2 Zdroje resuspenze

Za nejvýznamnější zdroje resuspenze lze uvést dopravu, stavební činnost, manipulaci se sypkými materiály a působení větru.

Dopravní prostředky emitují do ovzduší některé znečišťující látky přímo, a to nejvíce procesem spalování při spalování pohonných hmot. Dále produkují částice, které vznikají při otěru pneumatik, brzdových destiček i komunikace a víří prach již usazený na komunikacích. Množství zviřených částic je závislé na intenzitě dopravy, hmotnosti jednotlivých prostředků, jejich rychlosti a vlhkosti povrchu. Velmi těžko lze přesně určitě poměr částic, které byly znovu zviřeny a přímé emise, ale studie z Paříže uvádí, že částic PM_{10} , které se do ovzduší dostanou zviřením může být 3 až 7 krát násobně větší množství než částic, které jsou emitovány přímo z výfuků vozidel. Podle jiných studií tvoří resuspenze dokonce 84 % celkových emisí z dopravy.

Staveniště a stavební činnost oproti dopravě obvykle bývá časově ohraničena, dočasně však může způsobovat velké znečištění, a to různými činnostmi, které jsou součástí výstavby. Například navážení a odvoz sypkých materiálů, i materiálů obecně, manipulace se stroji a materiály přímo na stavbě, hromadění sypkých materiálů, i další činnosti – demolice a odstranění stávajících částí staveb, broušení, atd. Oproti dlouhodobým zdrojům znečištění, proti kterým se dělají různá opatření (například plánovaná čištění silnic, zdi kolem komunikací a podobně) je staveniště zdrojem, který v jistém časovém intervalu znečišťuje i oblasti, ve kterých je za normální podmínek považována minimální pravděpodobnost vzniku prašnosti.

Mimo manipulaci se sypkými materiály na stavbě dochází kontinuálně k sekundární prašnosti v blízkosti výroben, skladišť a továren, které syké materiály dále používají. Jedná se především o těžby (nejvíce povrchové), cementárny, skládky odpadů, výroby stavebních materiálů. Kvantita částic, které resuspendují je poté závislá na granulometrii dané látky. [13]

1.4.3 Opatření proti vzniku resuspenze

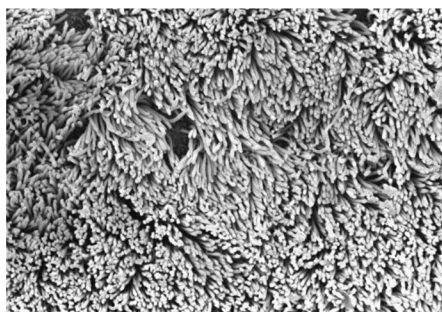
Běžná opatření proti polétavému prachu vznikají obvykle přímo u zdrojů vzniku prašnosti. U velkoobjemových vzniků prašnosti tvoří opatření zdi, různé filtry na zařízeních, přikrývání sypkých materiálů.

Proti sekundární prašnosti vznikající dopravou je neúčinnějším opatřením mimo rostlinné bariéry a zdi pravidelné čištění komunikací v důležitých termínech, a to po zimním období, kdy na komunikacích zůstává písek a sůl z posypových materiálů, nebo v období staveb, kdy komunikace slouží jako příjezdová cesta ke stavbě a podléhá většímu znečištění. Dalším obdobím, kdy vzniká dle zákona povinnost čištění komunikace je při mimořádném znečištění po různých haváriích. V některých oblastech vyšší prašnosti je doporučeno čištění nadlimitní, častější – pravidelně se jedná o lokalitu v Moravskoslezském kraji v oblasti Ostravy, kde dlouhodobě a stabilně bývají naměřeny vyšší hodnoty koncentrací znečišťujících látek. Dle Správy silnic Moravskoslezského kraje z uplynulých let vyplývá, že bylo mimořádným čištěním zameteno asi 1372 tun částic, které by se resuspenzí případně mohly dostat znovu do ovzduší. [16]

1.5 Znečišťující látka a vliv na zdraví živého organismu

Vliv na zdraví živočicha či člověka závisí na velikosti, tvaru a chemickém složení dané částice. Čím menší částice je, tím hlouběji do organismu pronikne a tím více může organismus poškodit. Průměrná koncentrace částic v městském ovzduší je 10 000 částic/cm³. Člověk jich denně vdechne asi sto miliard, z nichž se dostane až polovina do plic. [7]

Hrubé částice pronikají v lidském těle do průdušek. Prochází postupně ústy, případně nosní dutinou, hltanem, hrtanem, průdušnicí a průduškou. Vzduch proudící touto cestou se čistí pomocí řasinkového epitelu (obrázek 5), na kterém se částice zachycují.



Obrázek 5: Bronchus (průduška), cylindrický řasinkový epitel [5].

Částice PM_{2,5} pronikají dále z průdušek do průdušinek jež ústí do plicních sklípků v jejichž stěnách probíhá výměna plynů mezi plicemi a krví. Částice PM₁ mohou pronikat až do krevního řečiště. Tyto jemné částice, které doputují až do plicních sklípků, respektive krevního řečiště na sebe častěji navazují karcinogenní látky a škodliviny – například arzen, kadmium, olovo nebo těžké kovy, sírany či uhliky. [7], [8]

Dle Ministerstva zdravotnictví ČR a organizace WHO¹ bylo prokázáno spojení mezi polévatým prachem a různými chorobami. Krátkodobé působení aerosolu obecně se podílí na zvýšení mortality, zejména kojenecké, zvýšení počtu onemocnění kardiovaskulárními a respiračními chorobami, zvýšení symptomů kašle a ztížení dýchání. A z dlouhodobého hlediska jsou důsledky vlivu aerosolu vyšší mortalita na kardiovaskulární a respirační choroby, zvýšení počtu chronických onemocnění plic u dětí i dospělých (např. CHOPN²), rakovinová onemocnění, poruchy plodnosti, zvýšení počtu pacientů s diabetem II. typu, neurologické poruchy. Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny (IARC) zařadila polévatý prach mezi látky s prokázaným karcinogenním působením. [8], [9], [10]

Znečišťujících látek v ovzduší i polévatém prachu se nachází velké množství, ale některé látky s prokázanými škodlivými účinky na lidské zdraví jsou měřeny a je legislativně limitován jejich výskyt a potvrzeno zdravotní riziko. Tyto látky se na polévatý prach mohou vázat a způsobovat konkrétní zdravotní rizika. Charakteristika zdravotního rizika lze u bezprahově působících látek vyjádřit tzv. populačním rizikem. Jde o látky s předpokladem, že i nejmenší množství znečištění působí na lidské zdraví. Jedná se o pravděpodobnostní princip, kdy vyšší expozice vede k vyšší pravděpodobnosti vzniku nemoci, nikoli její závažnosti. Směrnice rakovinového rizika tvoří lineární závislost mezi dávkou a účinkem a je získána extrapolací z experimentálně vysokých dávek naměřených obvykle na pracovištích. U látek s prokazatelným karcinogenním účinkem se jedná o počet statisticky předpokládaných případů onemocnění na počet exponovaných osob nad výskyt neovlivněné populace. U látek bez karcinogenního potenciálu se předpokládá tzv. prahový účinek a lze interpretovat dávku, která pro lidský organismus je bezpečná a hranici expozice kdy již vzniká nebezpečí. U látek, které nemají karcinogenní účinky, ale jsou toxické a ohrožují člověka na jeho zdraví se používá předpověď výskytu zdravotních účinků. [9]

Z důvodu, že u žádného zdroje znečištění nevznikají jen pevné částice jsou zmíněny i samotné oxidy. Rovněž z důvodu, že nejjemnější pevné prachové částice vznikají nukleací prekurzorů, kterými jsou zejména oxidy síry a dusíku, případně mohou vznikat kondenzací plynů nebo mohou pevné částice plyn takzvaně pohltnout a navýšit tak svůj objem.

WHO¹ = nezávislá mezinárodní organizace působící v rámci Spojených národů (OSN). Koordinuje a řídí mezinárodní zdravotnickou činnost a soustředí se na organizaci celosvětových programů pro kontrolu, prevenci a odstranění nemocí a epidemií a celkové zlepšení kvality života populace. [30]

CHOPN² = chronická obstrukční plicní nemoc, při které se trvale zužují dýchací cesty. [31]

Ozón

Vzniká v ovzduší fotochemickými reakcemi oxidů dusíku a není do ovzduší přímo emitován. Je nebezpečný, pokud se jedná o přízemní neboli troposférický ozón. Má silné dráždivé účinky, způsobuje ztížené dýchání a zvyšuje riziko astmatických záchvatů. Zvýšené koncentrace ozónu mohou dosahovat míry ovlivnění zdravotního stavu převážně v létě, při tzv. letním smogu, případně losangeleském nebo fotochemickém či oxidačním, v zimě s přízviskem londýnský smog. Vzniká při podmínkách slunečního záření a zvýšené dopravy. Ultrafialové záření působí na exhalace z dopravy za vzniku radikálů kyslíku, které reagují s molekulovým kyslíkem.

V České republice se smogová situace vyhláší při hodnotě koncentrace hodinového průměru 180 mikrogramů na metr krychlový a dochází k této situaci velmi zřídka. Letní dlouhodobý průměr měřených koncentrací v ČR se pohybuje mezi hodnotami 60 až 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a v zimním období okolo 30 až 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. [9], [32]

Oxid dusičitý

Je emitován převážně při spalování. Nejvyšší koncentrace oxidu dusičitého se nachází v oblastech zatížených dopravou a vytápěním, ale významným znečišťovatelem je také zemědělství. Oxid dusičitý provází nepříznivé účinky na zdraví jako je zvýšení celkové, kardiovaskulární a respirační úmrtnosti a snížení odolnosti vůči infekcím a snížení celkové imunity. Avšak i v městských lokalitách bez přímého vlivu dopravy, průmyslu nebo tepelných zdrojů nebyl vzhledem k naměřeným koncentracím v ČR Státním zdravotním ústavem označen jako zdroj zdravotního rizika. [9], [33]

Oxid siřičitý

Jedovatá, vysoce dráždivá látka vznikající hořením síry – palivem s obsahem síry. Používá se jako součást bělidel, dezinfekcí a jako konzervant. Nežádoucí účinky se mohou projevit jako bolesti žaludku, hlavy a problémy respirační, astmatické. Extrémně dráždí oči, při vdechnutí může poškodit hlasivky, způsobit dráždivý kašel, dušnost až smrt. Není prozatím dostatek studií, aby mohla být látka označena za karcinogenní. Jako přijatelná denní dávka je označeno hmotnostní množství 0 až 0,7 mg na kilogram tělesné hmotnosti člověka. [34], [35]

Arsen

Látka emitovaná při spalování. Mimo vdechování se do těla dostává i potravou a vodou. Arsen se ukládá v kůži, vlasech a nehtech a vylučován je močí. Kritickým účinkem po expozici vdechováním je rakovina plic. Populační riziko přepočtené na deset a půl milionu obyvatel České republiky v roce 2022 představovalo 0,34 případu za rok. [9]

Nikl

Do ovzduší se nikl uvolňuje při procesech spalování, těžby a zpracování niklových rud. Nejvíce emitují do atmosféry nikl specifické zdroje – galvanovny a ocelárny. Všechny typy sloučenin niklu vyvolávají podráždění a poškození dýchacích cest a některé typy sloučenin mají vysoký karcinogenní potenciál s nejčastějším rizikem vzniku rakoviny dýchacího traktu. Populační riziko přepočtené na deset a půl milionu obyvatel České republiky v roce 2022 představovalo 0,04 případu za rok. [9], [11]

Kadmium

Kadmium je do ovzduší emitováno těžbou, výrobou a jeho zpracováním a procesem spalování, zemědělskou činností a sklářským průmyslem. Přírodní zdroj kadmia tvoří výbuchy podmořských sopek. Kritický orgán po expozici jsou ledviny a játra, ve kterých dochází k poškození a ohrožení funkcí. Kadmium je toxické, ohrožuje funkčnost a kvalitu spermií a poškozuje varlata, celkový imunitní a kardiovaskulární systém. Populační riziko přepočtené na deset a půl milionu obyvatel České republiky v roce 2022 představovalo 0,01 případu za rok. [9], [12]

Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)

Mnohé patří mezi toxické, mutagenní či karcinogenní látky. Vyskytují se v ovzduší v plynné i pevné formě, nejčastěji navázané na částice PM_{2,5}. Do ovzduší se dostávají z přírodních zdrojů – rozkladu půdy, biosyntézy, lesních požárů, i ze spalovacích procesů za vysokých teplot a dopravy. Ovlivňují u těhotných žen porodní váhu plodu a růst plodu, mohou mít dráždivé účinky. Nejvíce používaným zástupcem těchto prvků je benzo[*a*]pyren (BaP), jenž je prokázanou karcinogenní látkou. Koncentrace benzo[*a*]pyrenu v ovzduší je téměř konstantní hodnotou a lze interpretovat dlouhodobě stabilní zátěží. Populační riziko BaP přepočtené na deset a půl milionu obyvatel České republiky v roce 2022 (střední hodnota – 0,84 ng/m³) představovalo 11 případů za rok. [9], [36]

Benzen

Nejzávažnějším účinkem při dlouhodobé expozici benzenem je karcinogenní působení. V souvislosti s benzenem a jeho expozicí byly popsány nádory jater, prsu, nosní dutiny a leukémie. Benzen se do ovzduší dostává především průmyslovou činností, výrobou koksu a zpracováním chemických produktů. Populační riziko přepočtené na deset a půl milionu obyvatel České republiky v roce 2022 (střední hodnota benzenu – 1,1 µg/m³) představovalo 1 případ za rok. [9], [37]

PM₁₀ a PM_{2,5}

Částice obecně při vdechnutí mohou způsobit širokou škálu zdravotně nežádoucích účinků na respirační a kardiovaskulární ústrojí. Na tyto pevné částice, u kterých je definicí velikost, se navazují i výše zmíněné znečišťující látky, a to z nich tvoří nejrozmanitější a nejvýznamnější environmentální faktor pro zvýšení úmrtnosti. Samostatné částice PM jsou od roku 2013 zařazeny Světovou zdravotnickou organizací WHO mezi prokazatelné karcinogeny přispívající ke vzniku rakoviny plic. Předpokládanou hranici, při které se začínají projevat zdravotní účinky, tvoří hodnota 5 µg/m³, která je vedena jako cílová směrná hodnota Evropskou směrnicí pro kvalitu ovzduší. Dle Státního zdravotního ústavu České republiky přispěla expozice částic PM₁₀ k navýšení celkové předčasné úmrtnosti od 0 do 6,7 % dle oblasti. Nejvyšší procentuální hodnota náleží městským lokalitám, které jsou zvláště intenzivně zatížené dopravou a průmyslem. Odhad navýšení celkové předčasné úmrtnosti částicemi PM_{2,5} se opět dle míry znečištění konkrétní lokality v České republice pohybuje od 1,7 do 15,6 %. Střední hodnota koncentrace částic v ČR v roce 2022 – 17,4 µg/m³ odpovídá navýšení předčasné úmrtnosti z jiných příčin o 10 %. [9]

1.6 Legislativa a možná problematika s ní spojená

Z pohledu legislativy ohledně znečištění ovzduší je základní právní normou Zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. Upravuje hodnocení a řízení kvality ovzduší a provoz zdrojů znečišťování ovzduší v České republice.

Dle úvodního ustanovení první části se ochranou ovzduší rozumí předcházení znečišťování ovzduší a snižování úrovně znečišťování tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší.

Dle druhé části – znečištění a znečišťování jsou mimo jiné definovány emisní limity a přípustné četnosti jejich překročení (příloha č. 1 tohoto zákona) a přípustná úroveň znečišťování, která je určena emisními limity, emisními stopy, technickými podmínkami provozu a tmavostí kouře. [25]

Emisní limity dle přílohy č. 1 tohoto zákona vizte v následujících tabulkách.

Tabulka 1: Emisní limity pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení [25].

Znečišťující látka	Doba průměrování	Emisní limit	Max. počet překročení
Oxid siřičitý	1 hodina	350 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	24
Oxid siřičitý	24 hodin	125 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	3
Oxid dusičitý	1 hodina	200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	18
Oxid dusičitý	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Oxid uhelnatý	maximální denní osmihodinový průměr ³	10 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Benzen	1 kalendářní rok	5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Částice PM ₁₀	24 hodin	50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	35
Částice PM ₁₀	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Částice PM _{2,5}	1 kalendářní rok	20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Olovo	1 kalendářní rok	0,5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0

Poznámka:

³⁾ Maximální denní osmihodinová průměrná koncentrace je stanovena posouzením osmihodinových klouzavých průměrů počítaných z hodinových údajů a aktualizovaných každou hodinu.

Tabulka 2: Emisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace [25].

Znečišťující látka	Doba průměrování	Emisní limit
Oxid siřičitý	kalendářní rok a zimní období (1. října - 31. března)	20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Oxidy dusíku	1 kalendářní rok	30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

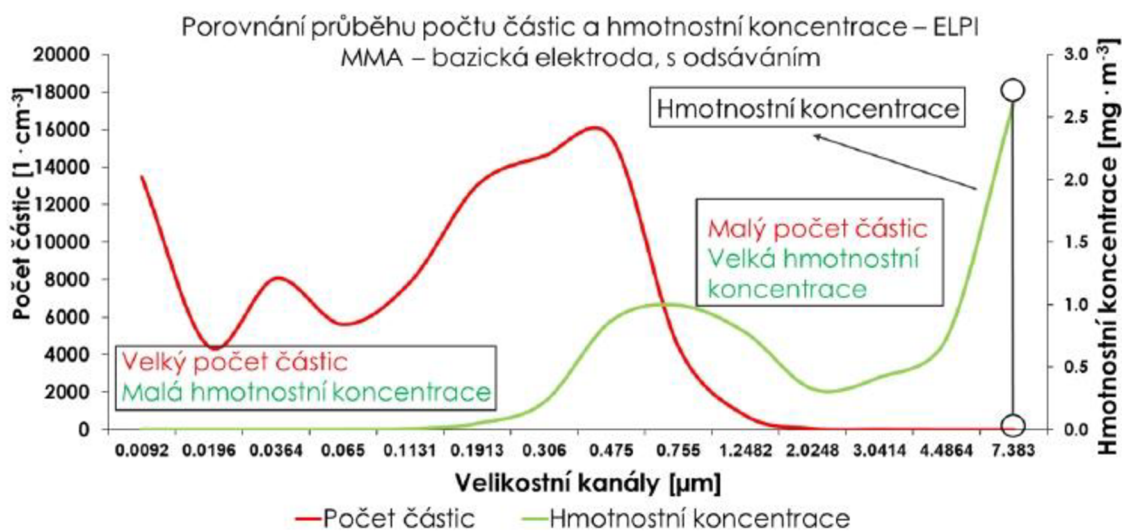
Tabulka 3: Imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM₁₀ vyhlášené pro ochranu zdraví lidí [25].

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit
Arsen	1 kalendářní rok	6 ng.m ⁻³
Kadmium	1 kalendářní rok	5 ng.m ⁻³
Nikl	1 kalendářní rok	20 ng.m ⁻³
Bezno(a)pyren	1 kalendářní rok	1 ng.m ⁻³

Mimo Zákon o ochraně ovzduší Česká republika stanovuje i limity na produkci různých druhů emisí – například na produkci svářečských zplodin (Nařízení vlády 361/2007 Sb.). Toto nařízení stanovuje expoziční limity pracovníka, které jsou označovány jako PEL a nejvyšší přípustné koncentrace NPK-P. Svářečský plyn má limitní hodnotu PEL 5 mg/m³. Jde tedy o metodu založenou na hmotnosti emitovaných částic bez ohledu na jejich velikostní kategorii. [26], [38]

Celkově se současná legislativa zabývá mnohdy částicemi gravimetrickou metodou (limitem dle hmotnosti), případně velikostní metody se primárně zaměřuje na částice PM₁₀ a PM_{2,5}. Avšak dle poznatků vlivu na zdraví člověka i organismů by zřejmě měly být limitovány i částice PM₁, které se hůře detekují, a i to je zřejmě jedním z důvodů, proč prozatím nejsou limitovány, a to ani na úrovni Evropské unie.

Jako příklad možných problémů při měření různými metodami může sloužit obrázek, vizte níže, na kterém lze porovnat počet částic a jejich hmotnostní koncentraci. Při téměř nulové hmotnostní koncentraci, která je sledována Nařízením vlády 361, může svářeč vdechovat i miliardy částic, které se díky své malé velikosti dostanou do lidského těla nejhluběji a jsou nejnebezpečnějšími. V tomto případě i z hlediska, že se na ně mnohdy vážou těžké kovy, které se při svařování uvolňují.



Obrázek 6: Porovnání průběhu počtu částic a hmotnostní koncentrace [26].

2 Experimentální část

Jedním z cílů diplomové práce je experimentálně realizovat odběry vzorků částic z různých zdrojů a vyhodnotit jejich morfologii, koncentraci v ovzduší a další dostupné vlastnosti. Odběr částic probíhal pomocí ručního akumulátorového přístroje Gorenje, vizte kapitolu 2.1.1., který byl upraven. Z nádoby na odebírané látky byl vyjmut originální HEPA filtr a byla vložena odběrová nádoba s příslušným filtračním papírem. Filtračních papírů existuje mnoho typů, při experimentu v této diplomové práci byl použit typ s póry o velikosti 800 nm, případně typ s póry o velikosti 100 nm dle velikosti částic při příslušném odběru. Z odběrů byla pod mikroskopem, a to buď optickým nebo elektronovým, které jsou také uvedeny v této práci, určena morfologie, velikost částic a u některých odběrů prvkové složení. Pro vyhodnocení koncentrací byl použit přístroj Optical particle sizer neboli optický čítač částic, který zaznamenává počet částic různých velikostních kategorií ve stanoveném intervalu a je rovněž představen v následující kapitole.



Obrázek 7: Optical particle sizer (OPS) [28].

Odebrané vzorky přístrojem Gorenje, u kterých byl realizován odběr přímo u zdroje znečištění/částic a byly zkoumány pod mikroskopem byly následně zařazeny do katalogu částic, který je přílohou této diplomové práce. Odběry přímo u zdrojů částic a jejich katalogizace slouží i k následujícímu úkolu, a to k rozboru odebraných imisních částic.

Hlavní problém při odebírání částic způsobuje doba odběru. U zdrojů s nízkou koncentrací částic je nutný delší časový interval pro získání analyzovatelného vzorku. Příliš krátká doba odběru není dostačující a filtr může být zcela prázdný, naopak při příliš dlouhé době odběru může dojít k přesycení filtru částicemi a poté lze pod mikroskopem velmi těžko určit hranici jednotlivé částice, a tím i morfologii, velikost a tak dále. Na obrázku níže vizte nádoby s filtry s odebranými vzorky.



Obrázek 8: Nádoby s filtry s odebranými vzorky.

2.1 Technologie použité pro odběr, zkoumání částic a měření koncentrací

2.1.1 Gorenje SVC216FR

Pro odběr vzorků byl upraven ruční akumulátorový přístroj značky Gorenje. Úprava spočívala ve vyjmutí originálního HEPA filtru a zajištění odběrové nádoby s filtračním papírem. Parametry přístroje uváděné výrobcem vizte v tabulce 4.



Obrázek 9: Gorenje SVC216FR, Cyclonic, 2v1 [14].

Tabulka 4: Technické parametry přístroje Gorenje SVC216FR dle výrobce [14].

Materiál skříně	plast
Typ baterie, počet článků	Li-Ion, 6 článků
Výkon motoru (max.)	130 W
Doba provozu bez nabíjení	60 min
Průtok vzduchu	11,5 l/s
Objem nádoby na prach	0,6 l
Úroveň hluku	82 dB(A)
Napětí	21,6 V

Experimentálně byl změřen průtok přístroje s odběrovou nádobou a filtračním papírem s velikostí pórů 800 nm a podložkou. Na odběrovou nádobu byla připevněna trubice vedoucí k senzoru (Sensirion, typ: SFM4100-air, obrázek 10) měřícímu průtok, který byl zobrazován v programu ControlCenter.



Obrázek 10: Senzor průtoku vzduchu.

Výsledný průtok pro tuto kompozici se odchyloval od střední hodnoty 3,95 l/min v rozmezí 3,8 – 4,1 l/min. Je tedy třeba případně v odebíraných vzorcích počítat s možnou chybou a odchylkou od středních hodnot koncentrací, případně odchylkou u odebraného objemu vzduchu.

2.1.2 Digitální mikroskop KEYENCE VHX-7100

Při této diplomové práci byl použit digitální mikroskop VHX-7000 s otočnou hlavou, tedy 7100. Přístroj umožňuje zvětšení 20 až 2500krát – první hlava v rozmezí hodnot 20 až 80krát, druhá 100 až 400krát a třetí 500 až 2500krát. Tyto hlavy se otáčejí automaticky při nastavení požadovaného zvětšení. Mikroskop má zabudovaných několik typů osvětlení a režimů a jeho součástí je software VHX. [29]



Obrázek 11: Mikroskop Keyence VHX-7000 [29].

2.1.3 Rastrovací elektronový mikroskop Tescan Lyra3

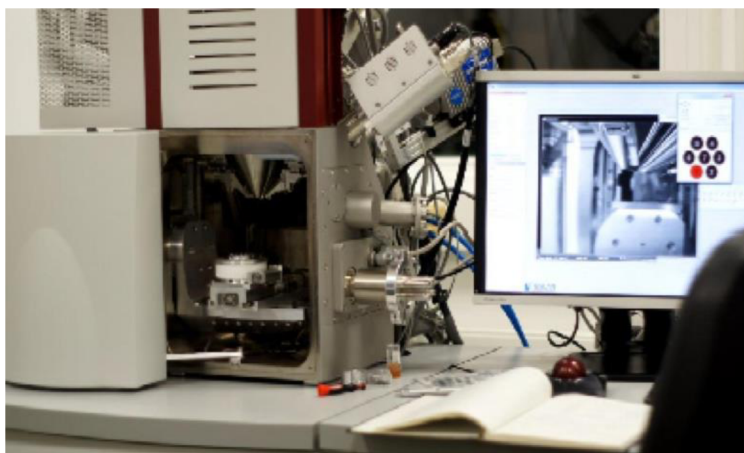
Principem funkce rastrovacího elektronového mikroskopu je svazek elektronů, který dopadá postupně na všechna místa vodivého vzorku. Následně jsou dle vybavení konkrétního přístroje rozlišovány čtyři skupiny elektronů opouštějící povrch vzorku.

- Zpětně odražené elektrony – určují topografii a materiálové složení. Jejich rozlišovací schopnost je 50-200 nm.
- Sekundární elektrony – určují hlavně topografii. Rozlišovací schopnost je 5-15 nm.
- Augerovy elektrony – vychází z materiálu, lze pomocí nich provádět prvkovou (kvalitativní) analýzu.
- Primární elektrony – rozlišovací schopnost je 0,5 nm.

Mimo tyto elektrony lze detekovat i rentgenové záření i viditelné světlo. [27]

Na elektronový mikroskop, který byl použit během zkoumání částic v této práci, typu SEM, musí být odebrané vzorky připravovány, a to z důvodu potřebné vodivosti vzorku při rastrování. Při použití mikroskopu k této diplomové práci byly nasbírané částice zvodivěné napařením kovu – zlata, vrstvou několika nm, okem téměř neviditelnou, a to přístrojem Leica EM ACE 600, systémem pro povlakování SEM/TEM. Povlakování probíhá pod vakuem a na vzorky v této práci byla použita vrstva asi 15 nm zlata.

Elektronový mikroskop použitý na snímky a zkoumání vzorků během této práce se nachází na půdě instituce CEITEC a jedná se o mikroskop Tescan Lyra3 plně vybavený možným příslušenstvím.



Obrázek 12: CEITEC, rastrovací elektronový mikroskop Tescan Lyra3 [41].

2.1.4 Optický přístroj TSI OPS 3330

Pro měření koncentrací tuhých znečišťujících látek, což je jedním z cílů této diplomové práce, byl použit již zmíněný přístroj optický spektrometr, konkrétněji model TSI OPS 3330. Zařízení využívá optických vlastností částic a na základě množství světla, které částice rozptýlí je zařazuje do velikostních kategorií. Měřící rozsah přístroje je 0,3-10 μm . Výstupem přístroje je počet impulzů v čase na jeden centimetr krychlový. Naměřené hodnoty byly v rámci této diplomové práce pro lepší porovnatelnost hodnot přepočítány na hmotnostní koncentraci jednotlivých velikostních kategorií, které se běžně používají (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10}) a jemnějších. Přepočet proběhl podle vztahu níže.

$$C = \frac{N_i}{Q_n \cdot (t_s - DTC \cdot t_D)} \quad (1)$$

V uvedeném vztahu C odpovídá koncentraci částic v dané velikostní frakci, N_i počtu impulzů, Q_n vstupnímu objemovému průtoku, t_s délce jednoho intervalu měření, DTC faktoru korekce mrtvého času a t_D mrtvému času.

Přístroj sčítá jednotlivé impulzy z fotodetektoru. Při vyšších koncentracích znečištění dochází k tomu, že se impulzy překrývají a pokud jednotlivá částice vstoupí do snímaného prostoru, dokud tento objem částice neopustí, není možné počítat další částice. Reálná doba odběru se tedy reguluje na čas blokace, a to veličinou nazývanou mrtvý čas. Při velmi vysokých koncentracích částic se zvyšuje hodnota mrtvého času, a i faktoru korekce mrtvého času a snižuje se přesnost reálného měření. Tato schopnost přístroje se dá deaktivovat, pro tuto práci je však mrtvý čas využit a je ve výpočtech zahrnut s hodnotou faktoru mrtvého času rovno jedné.

2.2 Ukázka z emisních odběrů a katalogu polétavého prachu

2.2.1 Úlet z dílenských kamen

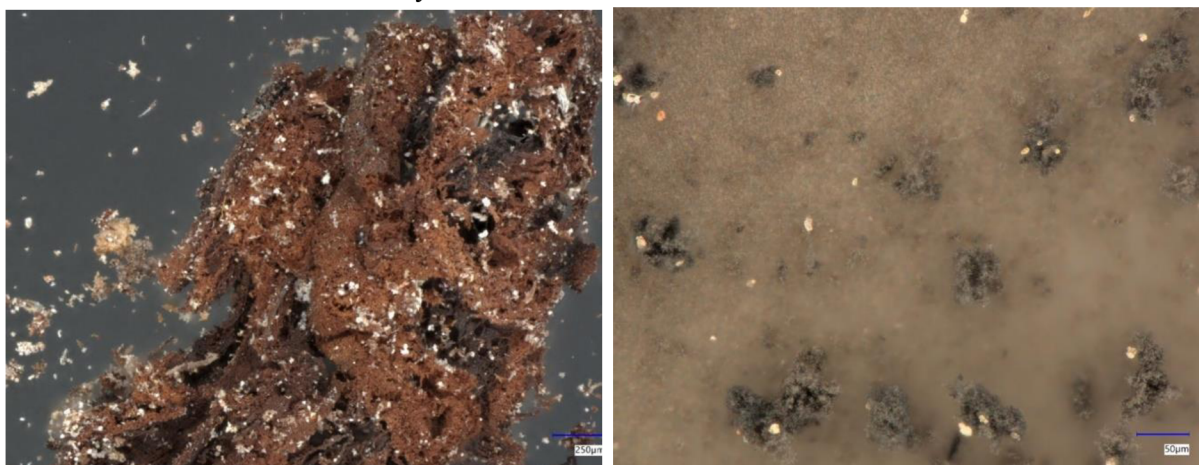
Z dílenských kovových kamen, ve kterých je zatápěno převážně suchým dubovým dřevem byl odebrán i popel z nádoby na něj určené a byla zkoumána jeho struktura. Velké částice, které byly odebrány z nádoby, se do ovzduší nedostanou díky své hmotnosti. Následující odběr byl realizován u komínu, dvakrát. Při prvním odběru cca 20 litrů vzduchu byl filtr přesycen, vizte druhý obrázek. Při druhém odběru (následující snímky) bylo odebráno asi 7,9 litrů vzduchu.

Úlet, který prochází komínem do vzduchu má velmi malé rozměry, vizte následující snímky, ale částice se často shlukují. Proti rozměrům (průměr shluku) mají relativně velkou měrnou plochu na kterou se mohou navázat nebezpečné a karcinogenní látky.

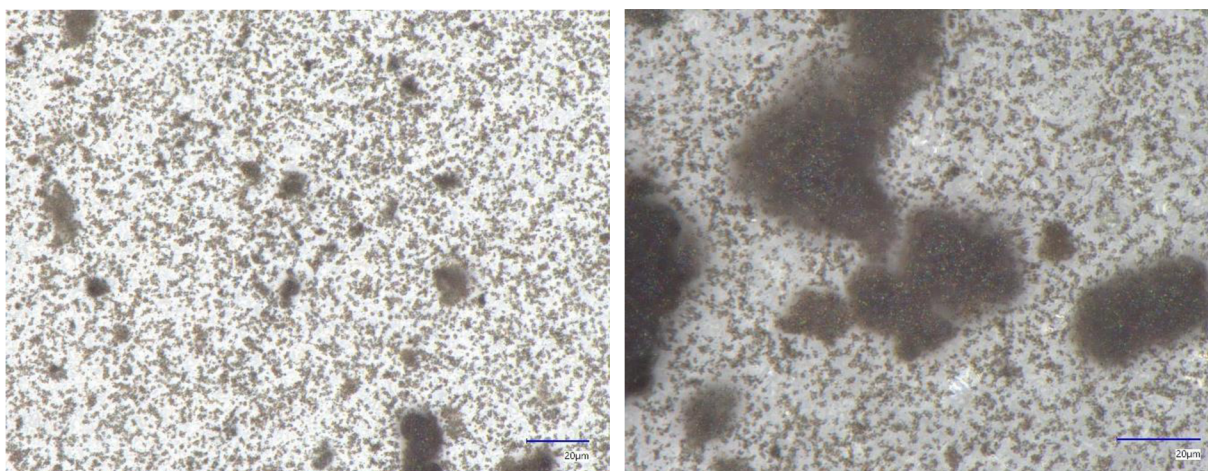
Jednotlivé částice, které se v úletu nacházejí nejčastěji, jsou kulového tvaru a jejich průměr měří zpravidla desítky nanometrů.

Tvar nejpočetnějších částic: kulový.

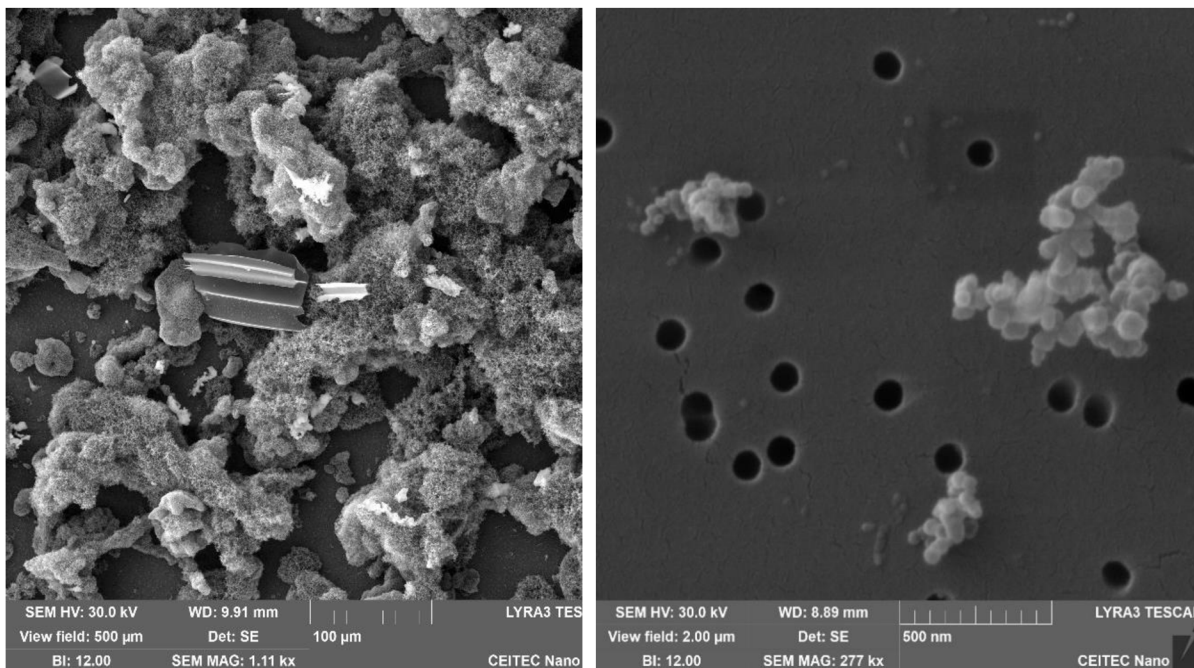
Velikost částic v ovzduší: desítky nanometrů.



Obrázek 13: Popel z dílenských kamen, dřevěný zbytek a přesycený filtr s úletem z komínu.



Obrázek 14: Úlet z komínu z dílenských kamen, okraj a střed filtru.



Obrázek 15: Úlet z komínu z dilenských kamen, vlevo střed filtru a netypická částice, vpravo nejčastější kulové částice.

Na snímcích s označením patnáct nebo šestnáct lze pozorovat, že se většina částic shlukuje, a to patrně ještě v ovzduší, než dorazí k filtru a zároveň že se mezi typickými kulovými částicemi sazí objevují různorodé částice tvarem i velikostí, které jsou většinou sazí obklopené. V kamnech, ze kterých byl úlet odebrán se mimo dřeva zatápí mnohdy spalitelným odpadem, který v kutilské dílně vzniká. V době odběru bylo páleno dřevo, avšak nebyly předtím vyjmuty zbytky z předchozího zatápění, kde se mohlo objevit dřevo ošetřené syntetickým nátěrem nebo třeba obaly od cigaret.

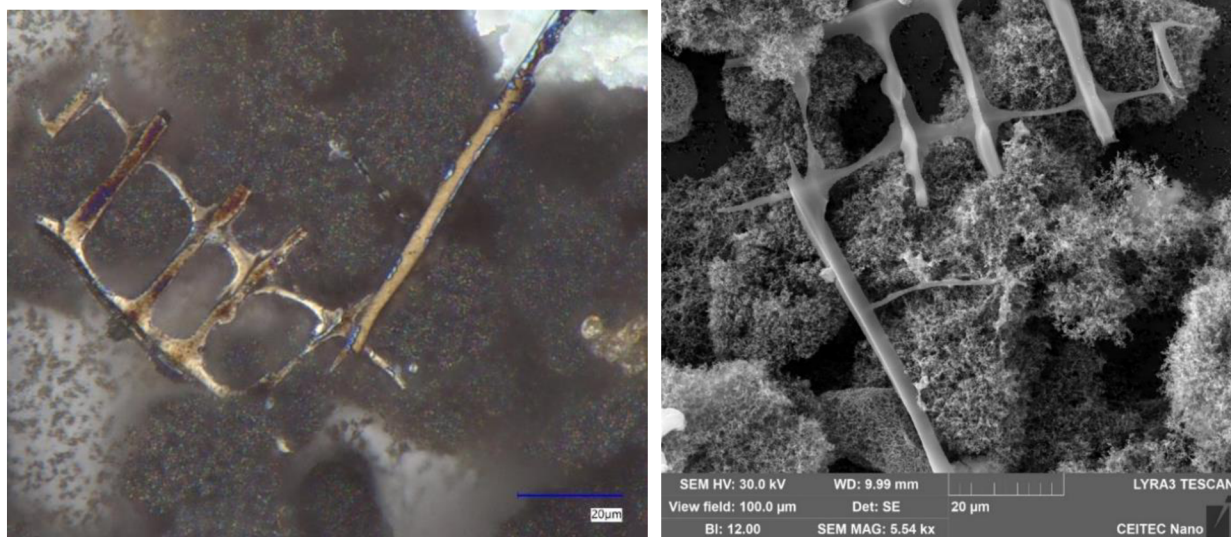
U těchto netypických částic byl za pomoci elektronového mikroskopu proveden prvkový rozbor, ve kterém se mimo jiné objevuje i zlato, a to z důvodu pokovení. Tento výsledek byl proto přepočten bez podílu zlata. V prvním případě rozboru se jedná o částici, která se nachází téměř na středu levého snímku 15 a je netypická svým tvarem.

Tabulka 5: Prvkový rozbor částice na obrázku 15.

Prvek	C	O	Si	Cl	K	Ca	Fe	Zn
Hmotnostní procento (%)	94,71	1,72	0,17	1,51	0,50	0,75	0,15	0,49

Z prvkové analýzy vyplývá, že se jedná o téměř 95% uhlík, zbylé podíly tvoří největší mírou kyslík a chlór. Vzhledem k obsahu látek, včetně chlóru a plastickému tvaru částice se mohlo původně jednat o plast, případně pojivo.

Další velmi netypickou částici se podařilo zachytit elektronovým i optickým mikroskopem a rovněž byl pro částici proveden prvkový rozbor. Při porovnání snímků z různých zařízení je parné, že pod optickým mikroskopem se na částici jeví olejové skvrny, pod mikroskopem elektronovým částice nejeví žádné známky necelistvosti nebo skvrn. Jednou z možností skvrn je, že se jedná o látku, která je obsažena v celé sktruktuře, ale v oblastech skvrn s nejvyšší mírou, druhou možností je, že se zachytil během spalování na částici jiný prvek, který vznikl rozkladem jiné věci a původně částici netvořil.

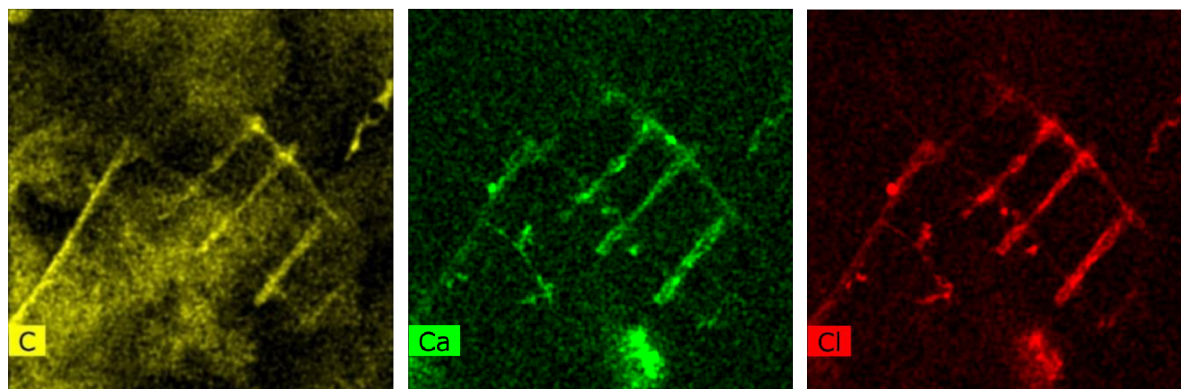


Obrázek 16: Úlet z komínu z dilenských kamen, netypická částice, vlevo pod optickým mikroskopem, vpravo pod elektronovým mikroskopem.

Tabulka 6: Prvkový rozbor částice na obrázku 16.

Prvek	C	Mg	Si	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Zn
Hmotnostní procento (%)	84,60	0,51	0,09	7,30	1,03	5,26	0,18	0,55	0,50

Po prvkové analýze byl na celém snímku proveden prvkový rozbor s konkrétními již známými prvky, které částice obsahuje. Největší podíl tvoří uhlík, který je obsažen v celé částici a rovněž typických kulových částicích úletu. Prvky chlór (7,3 %) a vápník (5,26 %) zvýrazňují části, na kterých se pod optickým mikroskopem jevíly skvrny. Zřejmě tedy skvrny mohly být vytvořeny během procesu spalování tavením původně jiné částice, případně kondenzací převážně plynného chlóru. Zbylé prvky tvoří velmi malé procentuální podíly. Některé látky mohou být přirozeně i v palivu (třeba nikl, zinek). Mnoho látek obsahují syntetické nátěry, kterými dřevo mohlo být opatřeno (například draslík, hořčík).



Obrázek 17: Prvkový rozbor netypické částice úletu z komínu – C, Ca a Cl.

2.2.2 Výfukové emise

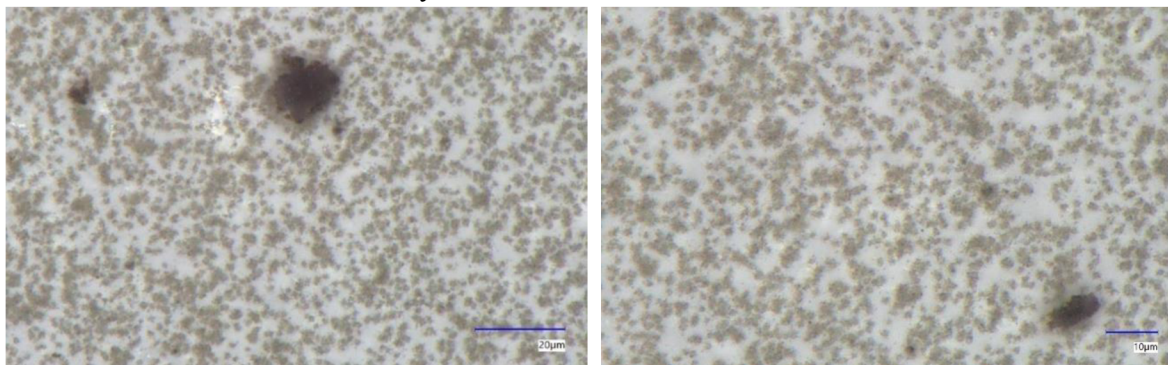
Výfukové emise byly odebrány při volnoběhu ze zahřátého motoru po jízdě asi 10 km, z automobilu Volkswagen Polo s motorizací 1.6 TDI, 66 kW a rokem výroby 2011. Odběr částic pochází asi z 20 litrů vzduchu přímo u výfuku. Při větším přiblížení stejně tak jako na snímcích z elektronového mikroskopu je patrné, že se jedná o shlukování kulových částic z procesu spalování kolem pórů filtru.

Tento konkrétní vůz prošel státní technickou kontrolou a měřením emisí asi měsíc před tímto odběrem. Výsledky z emisního měření dosahovaly vyšších hodnot, avšak v zákoně stanoveném limitu. Technik z STK doporučil kontrolu filtru pevných částic DPF (Diesel particulate filter).

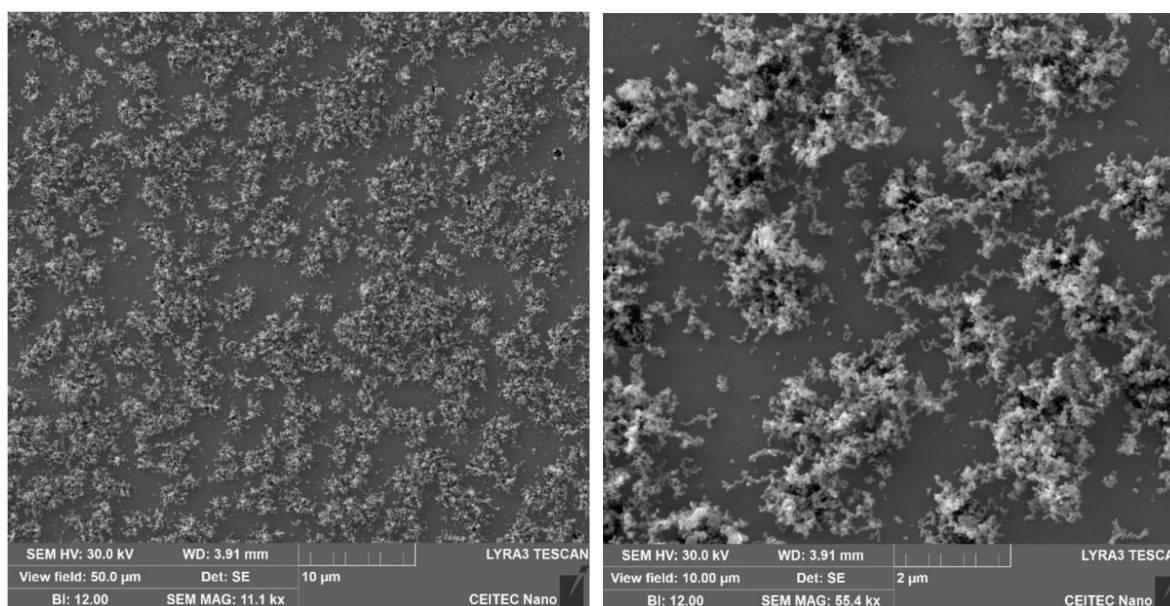
Jednotlivé částice, které se ve vzorku nacházejí nejčastěji, jsou kulového tvaru a jejich průměr měří zpravidla desítky nanometrů. Na snímcích je patrné, jak se částice jednotlivě snažily projít póry, které v některých případech téměř ucply. Plochy filtru mimo póry jsou téměř čisté a lze na nich velmi dobře pozorovat tvar a velikost jednotlivých částic – kulové částice s velikostí v řádech desítek nanometrů.

Tvar částice: kulový.

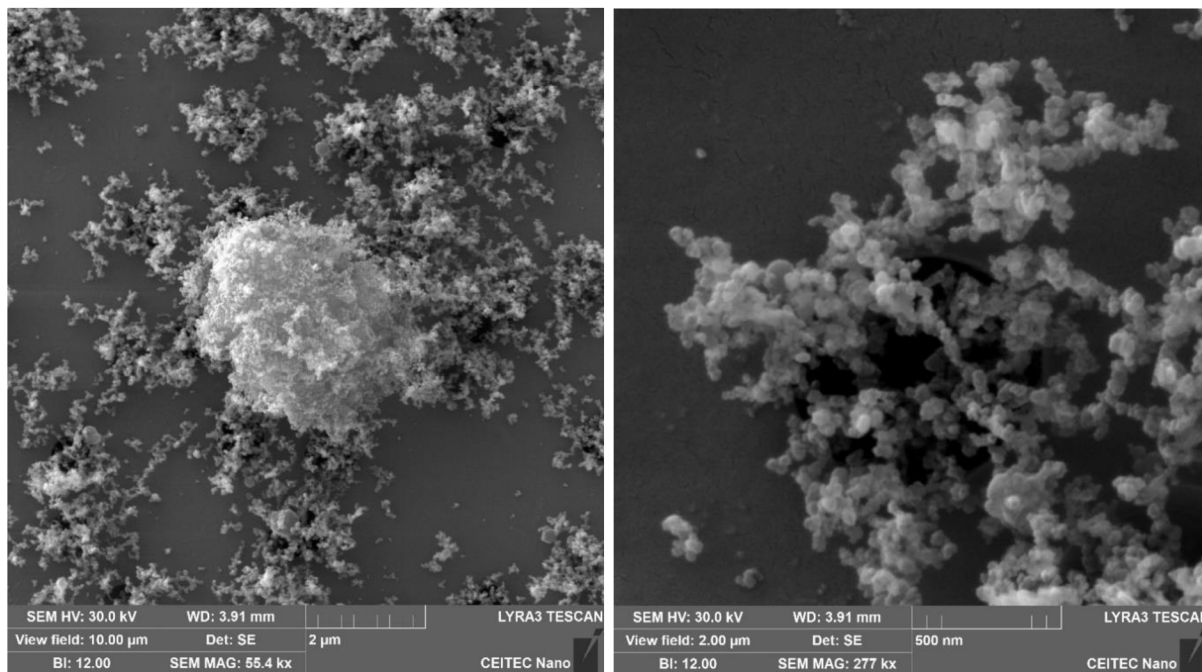
Velikost částic v ovzduší: desítky nanometrů.



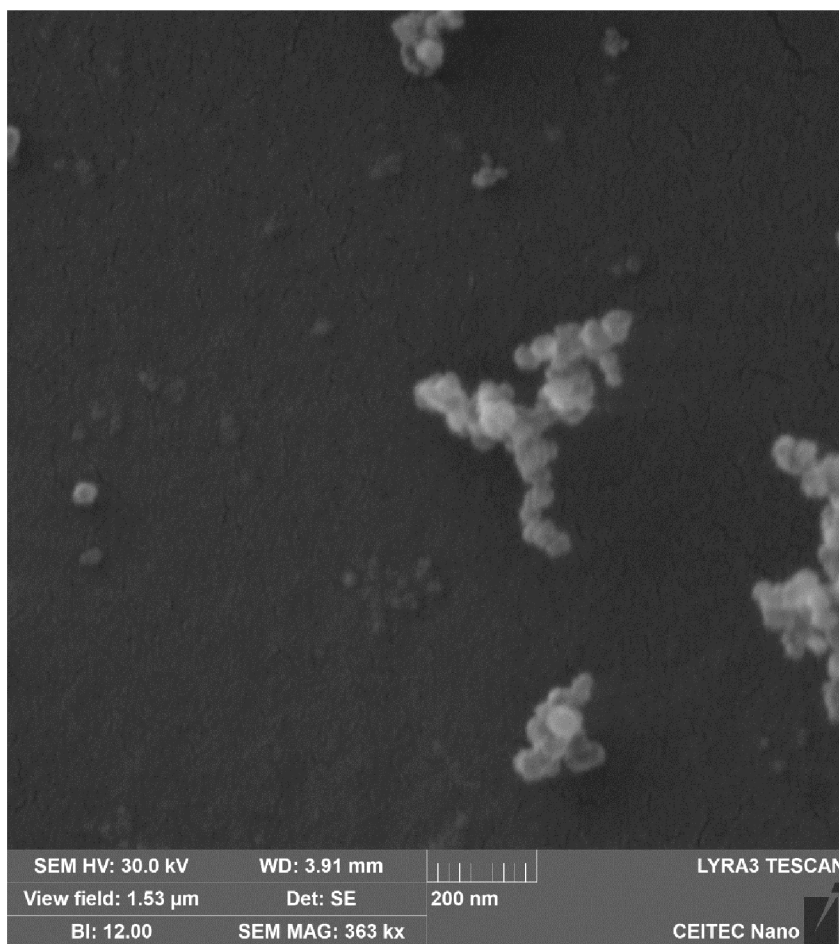
Obrázek 18: Výfukové emise, měřítko 20 µm a 10 µm, optický mikroskop.



Obrázek 19: Výfukové emise, měřítko 10 a 2 µm, elektronový mikroskop.



Obrázek 20: Výfukové emise, kulová částice a měřítko 500 nm, elektronový mikroskop.



Obrázek 21: Výfukové emise, měřítko 200 nm, elektronový mikroskop.

2.2.3 Poloautomatické svařování metodou MAG

Odběr částic probíhal v těsné blízkosti svářeče v otevřeném prostoru při rozptylových podmínkách rychlosti větru asi 1 m/s. Odběr proběhl dvakrát, při odběru asi 20 litrů vzduchu byl filtr mírně přesycen, proto byl odběr opakován s odebráním asi 8 litrů.

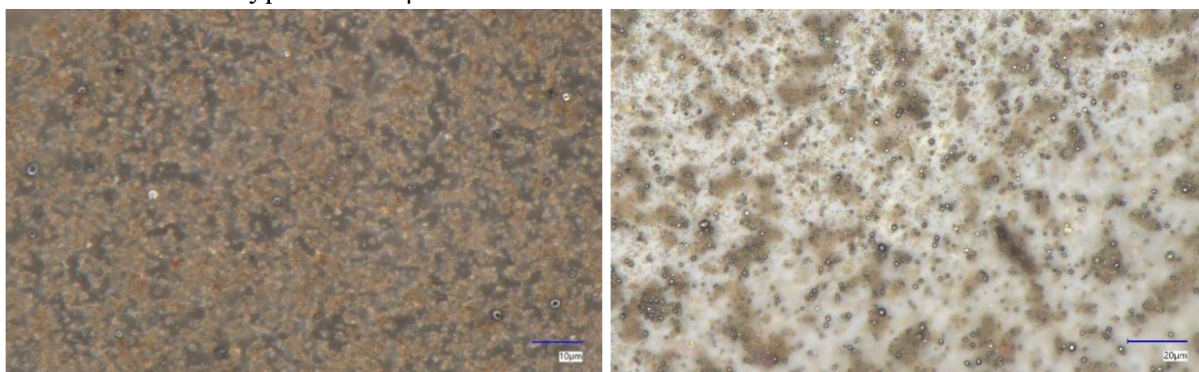
Při svařování metodou MAG (s aktivním plynem CO₂) se část materiálu, který se svařuje, v důsledku vysokých teplot odpařuje rovněž jako materiál drátové elektrody navinuté na cívce. Svařovaným materiálem byla běžná lehce svařitelná ocel třídy 11.

Na snímcích lze pozorovat dva typy nejčastějších částic. Oba jsou kulové. Menší částice náleží do velikostní kategorie desítek nanometrů a velmi se podobají částicím z prvních dvou procesů – spalování v kamnech a výfukovým emisím. U většího typu částic se velmi těžko hledá nejmenší možný průměr, a to z důvodu výskytu prvního typu částic. Je proto uveden maximální průměr, který byl ve vzorku nalezen.

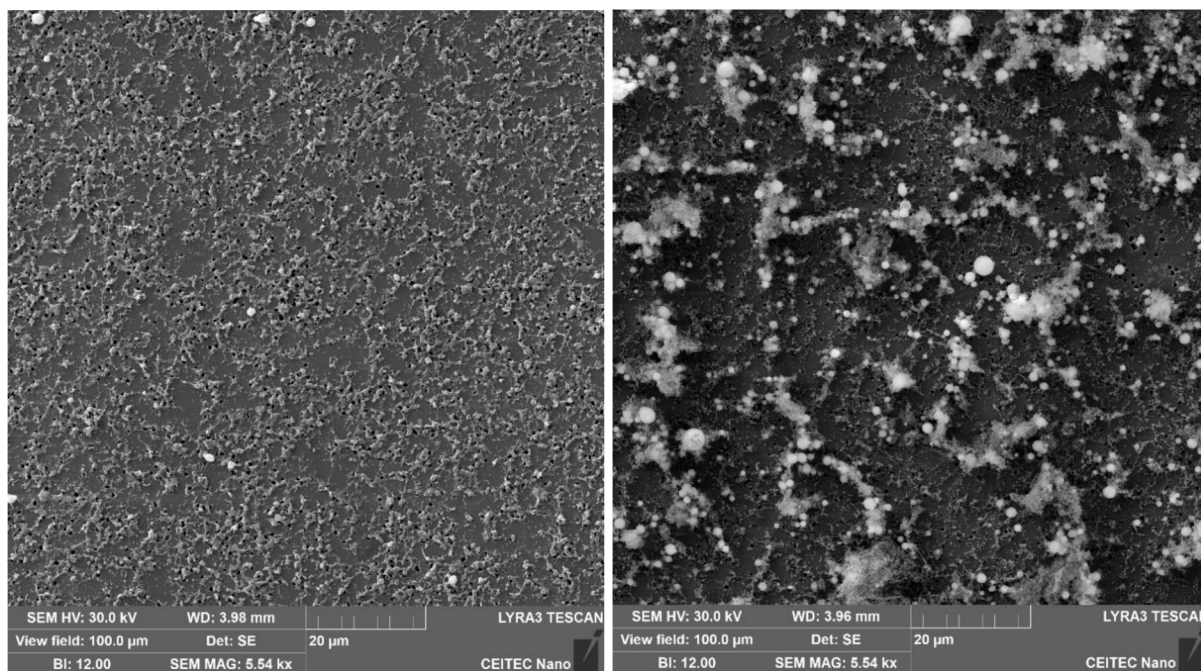
Tvar částic: kulový.

Velikost částic I. typu: Ø desítky nm.

Velikost částic II. typu: Ø až 7 µm.

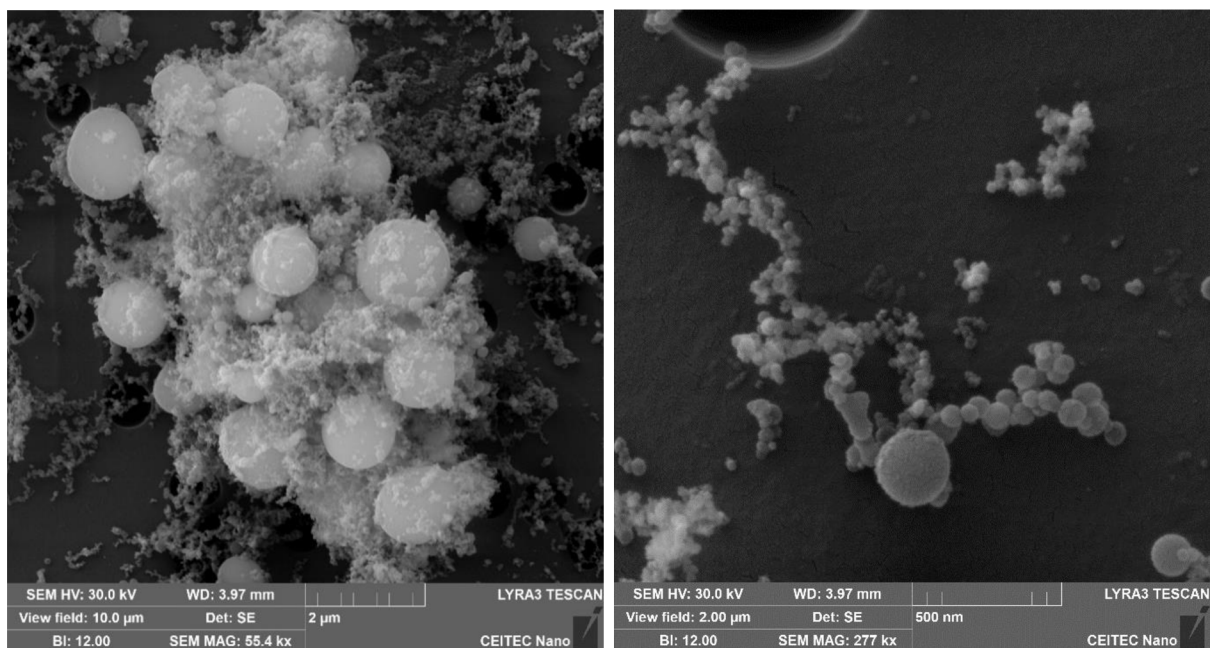


Obrázek 22: Svařování MAG odběr z 20 a 8 litrů vzduchu.

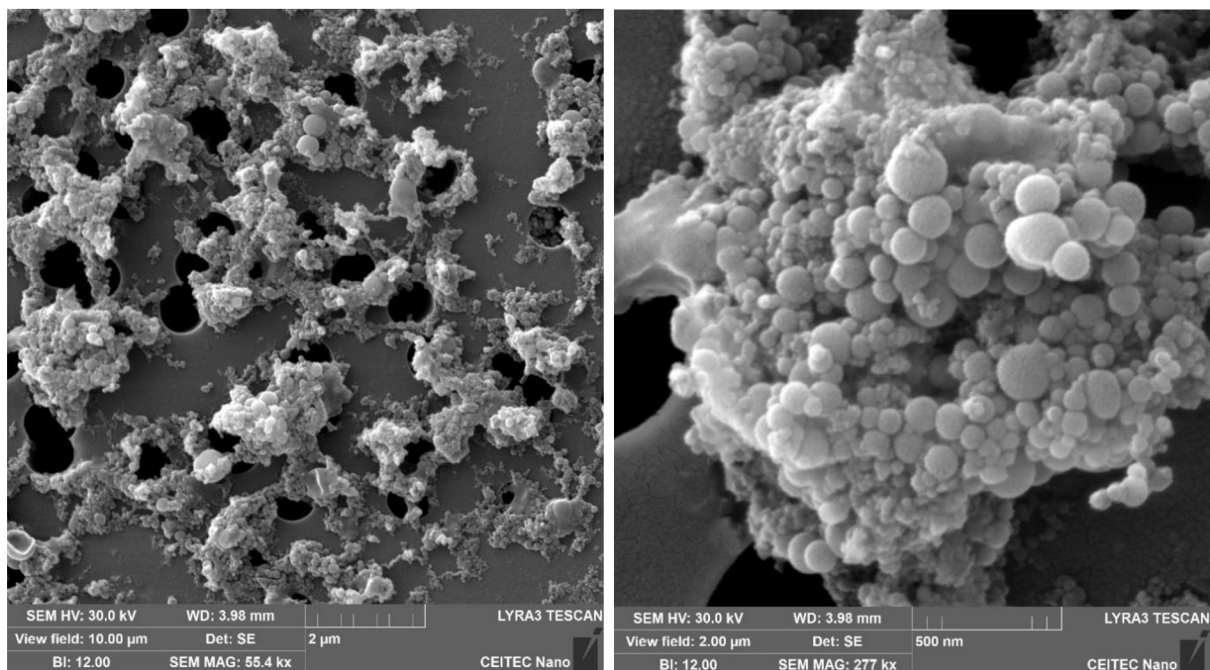


Obrázek 23: Svařování MAG odběr z 20 a 8 litrů vzduchu, elektronový mikroskop.

Při porovnání snímků z elektronového mikroskopu při stejném zvětšení a jiném odběru objemu vzduchu, které byly umístěny nad sebe na této straně, vizte níže, lze pozorovat velké rozdíly. Částice při větším objemu vzduchu a delším procesu svařování jsou na sebe mnohem více nahuštěny a mají tendence se více shlukovat do větších rozměrů. A to zřejmě ještě v ovzduší. Vyšší koncentrace velmi malými částicemi tedy nemusí znamenat větší nebezpečí pro zdraví člověka, vizte kapitolu o vlivu znečištění na lidský organismus. V tomto případě se při vyšších koncentracích nejmenších částic částice snáze shlukují a stávají se většími celky.



Obrázek 24: Svařování MAG, odběr 8 litrů vzduchu, měřítko 2 µm a 500 nm.



Obrázek 25: Svařování MAG, odběr 20 litrů vzduchu, měřítko 2 µm a 500 nm.

U odběru osmi litrů vzduchu byla na některých částicích provedena prvková analýza, ve které se mimo jiné objevuje i zlato, a to z důvodu pokovení. Tyto výsledky byly proto přepočteny bez podílu zlata. Prvky uhlík, kyslík a křemík obsahuje i filtr. V neposlední řadě je důležité zmínit, že odběr probíhal v otevřeném prostoru a ne každý stopový prvek nutně musel vzniknout během procesu svařování.

V prvním bodě prvkové analýzy byly dle největšího podílu po nejmenší nalezeny tyto prvky: uhlík (asi 83 %), železo (asi 4 %), přes 2 hmotnostní procenta chlóru a draslíku, dále titan, sodík, křemík, kyslík, síra a méně než 1 % vápníku, manganu a hliníku.

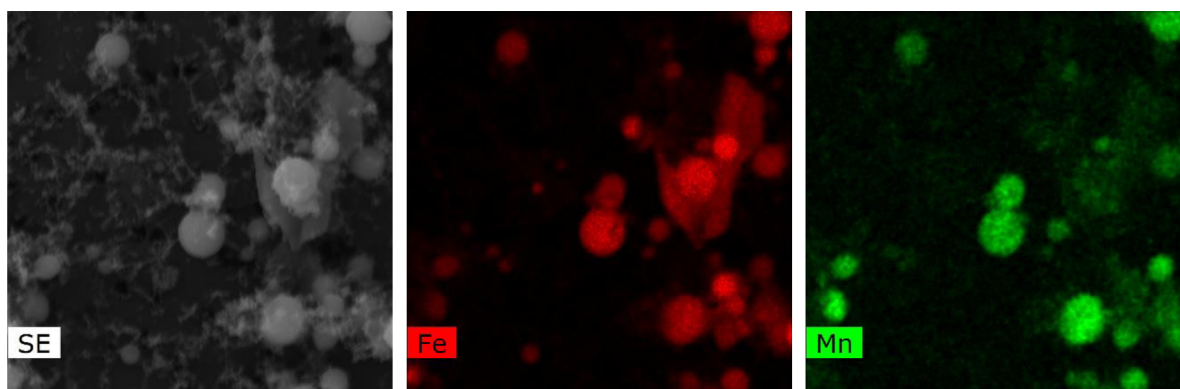
Bod druhý obsahoval mnohem méně prvků a zhruba ze 64 % byl tvořen železem. Následně opět uhlíkem (asi 23 %), manganem (asi 10%) a méně než dvěma procenty hliníkem a kyslíkem.

Velké rozdíly mezi těmito analýzami potvrzují fakt minimálně dvou typů částic. Částice spalování tvoří větší podíl uhlíku, kdežto částice pocházející z tavení svařovaného materiálu a drátové elektrody mají velký podíl železa, případně jiných kovových prvků a mohou dosahovat větších rozměrů. Výsledky prvkové analýzy byly zaneseny do tabulky níže.

Tabulka 7: Prvkový rozbor částic svařování.

Prvek/ hmotnostní procento	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Bod 1	83,07	1,20	1,39	0,21	1,27	1,02	2,66	2,23	0,67	1,61	0,51	4,17
Bod 2	23,22	1,39	0	0	1,49	0	0	0	0	0	9,97	63,93

Po prvkové analýze konkrétních bodů byla provedena analýza snímku na určité, již známé prvky, které by snímek měl obsahovat. Zvolenými prvky byl prvek železo a mangan. Při bližším zkoumání snímku se zvýrazněnou koncentrací železa lze pozorovat, že i některé velmi malé částice, řádově v desítkách nanometrů, obsahují železo, vizte červený „závoj“ na pravé straně prostředního snímku kolem dvou sytě zbarvených červených kulových částic. Při porovnání snímků se zvýrazněnou koncentrací železa a manganu lze dojít k závěru, že větší typ kulových částic obsahuje kovové prvky, z nichž všechny obsahují nějaké množství železa, ale ne každá kovová částice obsahuje i mangan.



Obrázek 26: Prvkový rozbor částic svařování – originál, Fe a Mn.

Další emisní odběry byly pro přehlednost zařazeny do samostatné přílohy této diplomové práce – Katalog polétavého prachu.

Pro odběry byly vybrány ty procesy, které v nejvyšší míře ovlivňují celkové koncentrace tuhých znečišťujících látek, a to procesy spalování. Tyto procesy jsou doplněny technologickými procesy, které se využívají při výrobě produktů – svařování, broušení, pájení, nanášení syntetické barvy. Dále byl realizován odběr z procesu ze stavby, kdy vzniká velké množství prachu, a to z demolice obvodových zdí domu. Ze zemědělských činností je prokazatelně jednou z nejvíce znečišťujících orba a příprava půdy, ze které byl rovněž uskutečněn odběr a nachází se v katalogu společně s dalšími procesy, včetně částic z přírodních zdrojů jako je Saharský prach, sopečný prach nebo pyly a výtrusy.

Z pylů i vytrusů hub byly vybrány rody bylin a dřevin, které se v České republice běžně vyskytují a silné alergen. Vždy je zobrazena hydratovaná i suchá varianta pylových zrn, a to z důvodu, že v některých případech se ve velké míře liší. Obvyklá je stejná struktura, ale není výjimkou i naprosto odlišný složitý tvar suchých zrn. Výtrusy nejběžnějších hub jsou doplněny o spóry potravinové plísně.

Kompletní seznam odběrů nacházejících se v katalogu:

- Úlet z komínu z dílenských kamen.
- Výfukové emise.
- Ruční obloukové svařování bazickou elektrodou MMA.
- Poloautomatické svařování metodou MAG.
- Měkké pájení.
- Broušení zkorodované oceli.
- Nanášení syntetické barvy ve spreji.
- Stavba: demolice obvodových zdí.
- Zemědělská činnost: orba.
- Sopečná činnost.
- Saharský písek na území České republiky.
- Řezání dřeva.
- Bavlněná vlákna.
- Polystyrenová vlákna.
- Polyamidová, elastinová a polypropylenová vlákna.
- Lidská kůže.
- Pyly.
- Výtrusy.

2.3 Imisní odběr a měření koncentrací částic v ovzduší

Po odběrech emisí přímo u zdrojů znečištění následovaly odběry imisní, kdy se v bezprostřední blízkosti nenachází žádný konkrétní zdroj a rovněž probíhalo měření koncentrací částic přístrojem OPS. Katalog polétavého prachu by měl sloužit k rozpoznání různých druhů částic a k případnému přiřazení k jejich primárním zdrojům. Imisní částice byly odebrány a zkoumány ze tří různých lokací, z vesnice s asi 150 obydlými domy, z města, a to z Brna, z ulice nacházející se poměrně blízko jednomu z hlavních dopravních tahů a z vnitřních prostorů rodinného domu v malé obci. Ve všech třech lokacích byly měřeny i koncentrace pevných částic v ovzduší přístrojem OPS, který byl představen v úvodu experimentální části této diplomové práce.

2.3.1 Odběr v obytné zóně – vesnice

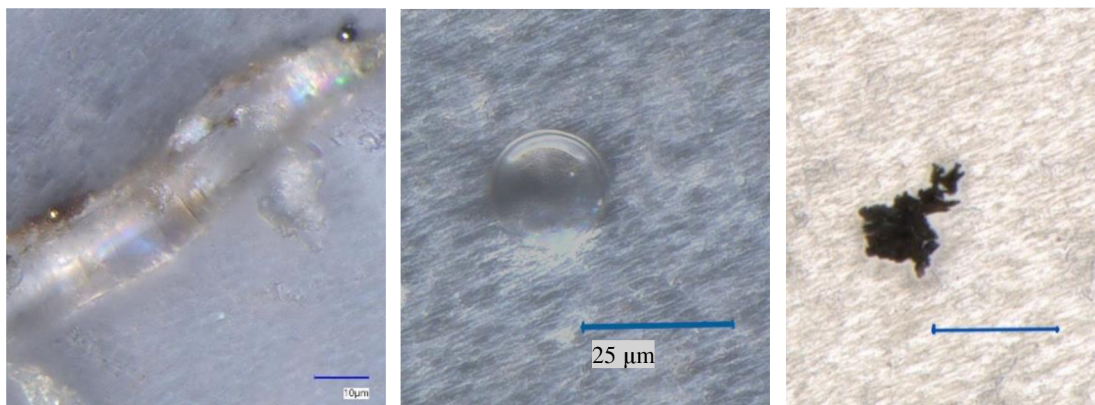
Odběr probíhal v obci Železné, ve které se nachází dle Veřejné databáze Českého statistického úřadu 170 domů, z čehož 152 obydlých. [40] Přímo obec obklopují převážně lesy, zemědělské půdy a nejbližším městem je dva kilometry vzdálený Tišnov. Odebráno bylo asi 240 litrů vzduchu u domu číslo 31, v centru obytné zóny.

Odběr byl realizován v neděli, 24.3.2024, započal kolem 18:00, průměrné meteorologické podmínky k datu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 8: Meteorologické podmínky v obci Železné.

Teplota	7 °C
Srážky	0 mm
Relativní vlhkost	89 %
Směr větru	severozápadní
Rychlost větru	6 m/s

Před odběrem pršelo a vzhledem k teplotě a času během odběru byly téměř všechny domy vytápěny. Filtr nezachytil velké množství částic, a to může být způsobeno předchozím lehkým deštěm, při kterém některé částice sedimentovaly, ale i krátkou dobou odběru.

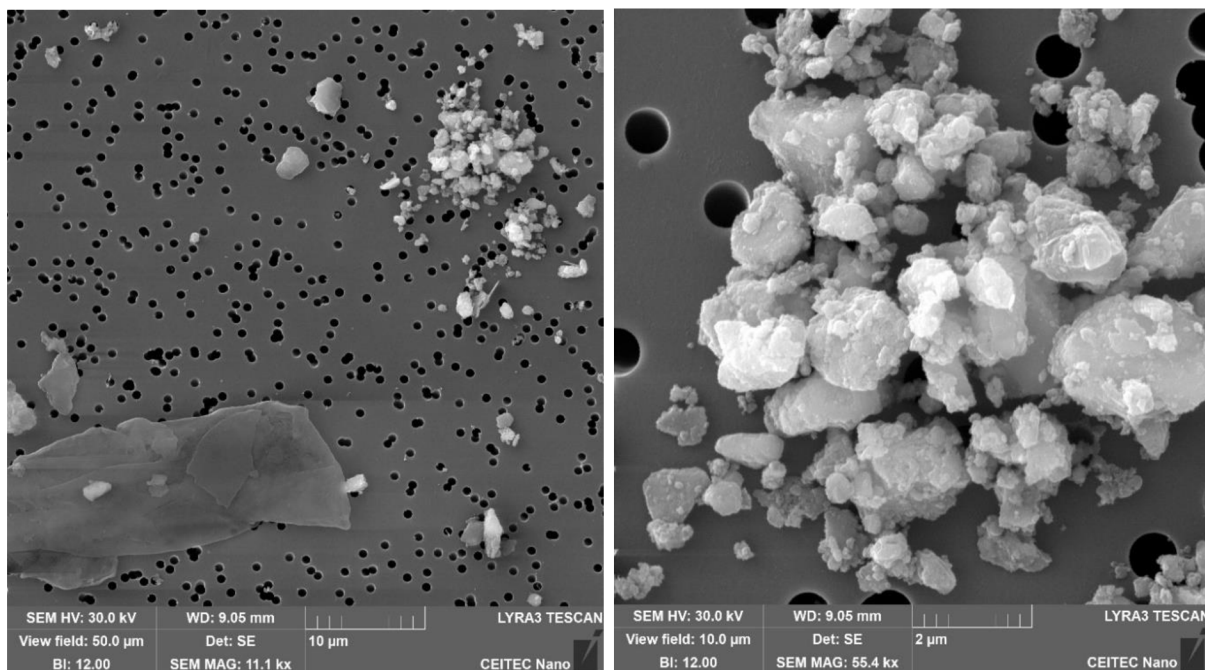


Obrázek 27: Venkovské imise.

První, levý snímek obrázku 27 zobrazuje částice kovového zbarvení. Kulové částice mají velikost průměru asi 2,5 μm . Morfologie, velikost i zbarvení pod optickým mikroskopem odpovídá kovovým částicím, které vznikají například při svařování nebo broušení. Zřejmě se tedy jedná o částice obsahující kovový prvek.

Na středu obrázku je zachycena nahromaděná vlhkost do kulového útvaru – kapky, o průměru asi 20 μm .

Snímek vpravo z obrázku 27 znázorňuje černé částice, zřejmě produkty spalování, uskupené do útvaru o délce asi 25 μm a šířce asi 15 μm . Dle těchto rozměrů by se mohlo jednat o produkt vytápění ze staršího kotle na pevná paliva, dílenských kamen nebo otevřeného ohně, případně o částice, které se shlukly po opuštění zdroje – výfuku, modernějšího systému vytápění. Morfologii odpovídají částicím spalování. Z katalogu byly podobné částice – barvou, tvarem i velikostí, odebrány při spalování v kamnech, u výfuku osobního automobilu a při svařování různými metodami.



Obrázek 28: Venkovské imise pod elektronovým mikroskopem.

Na největší částici, která se nachází na levém snímku obrázku 28 vlevo dole, dlouhé asi 35 μm a široké asi 15 μm byl proveden prvkový rozbor, který byl přepočítán na hmotnostní procenta bez podílu zlata, které bylo použito na pokovení. Na některých místech částice prosvítají póry filtru, které se nachází pod částicí, je tedy velmi tenká. Filtrační papír obsahuje prvky uhlík, kyslík a křemík, které v tomto případě zřejmě ovlivňují procentuální zastoupení jednotlivých prvků, avšak veškeré naměřené prvky částice obsahuje a jsou uvedeny v tabulce 9.

Jedná se o částici v nejvyšší míře tvořenou uhlíkem, následně kyslíkem, křemíkem, vápníkem a méně než jednoprocenním podílem i železem, sodíkem, draslíkem, chlórem a hořčíkem. Vzhledem ke vzhledu částice a prvkovému složení se částice z katalogu nejvíce podobá částicím ze stavby, z demolice, případně ze zemědělské činnosti, tyto částice však mají velmi rozdílné rozměry, i patnáctkrát menší.

Tabulka 9: Prvkový rozbor imisní částice na obrázku 28.

Prvek	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
Hmotnostní procento (%)	83,40	4,11	0,73	0,47	2,23	3,82	0,65	0,66	3,06	0,86

Následně byly prvkové analýzy na filtru provedeny ještě dvakrát, a to na náhodných částicích z odebraného množství. Výsledky těchto analýz jsou zaneseny do tabulky 10 jako body jedna a dva. V částicích bylo nalezeno velké množství prvků. Bod jedna vykazuje velké množství uhlíku, ale stopové množství prvků jako sodík, hliník, křemík, draslík nebo například titan. V bodě dva byl analyzován velký podíl železa, asi 56 % a kromě uhlíku a kyslíku prvky jako vápník, křemík, hořčík, hliník, nebo měď a zinek.

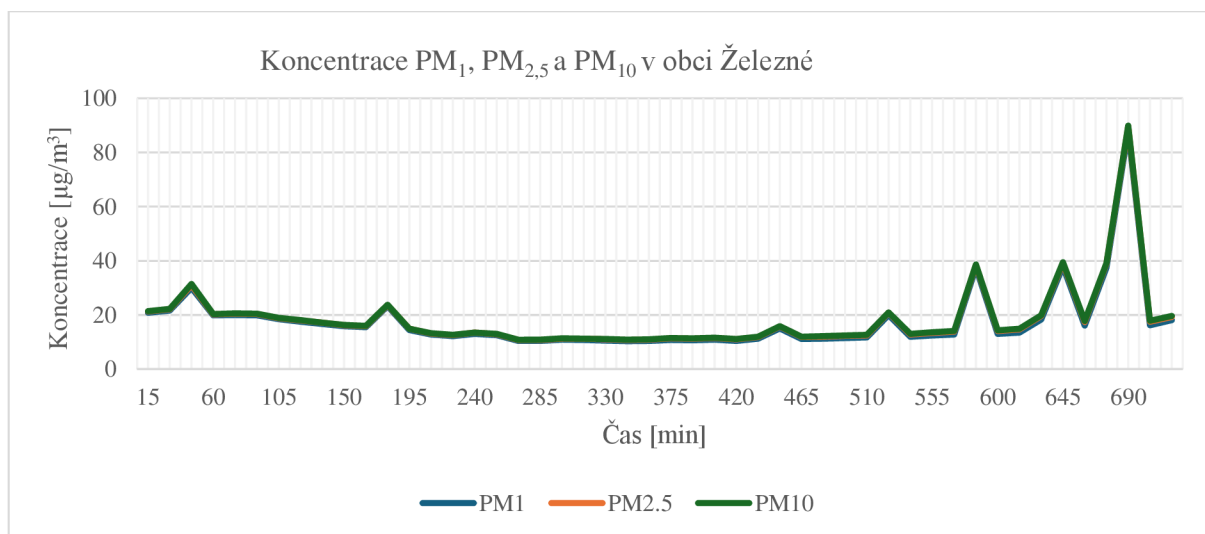
Většina z těchto prvků je běžně obsažena v zemské kůře a mohla se do ovzduší dostat erozí – kyslík, křemík, železo, hliník, vápník, draslík, hořčík, sodík. Zbylé prvky z tabulky 10 jsou chlór, titan, měď, zinek a síra. Chlór se do ovzduší může dostávat při spalování uhlí, odpadů, z průmyslu, kdy je chlór využíván k dezinfekci, bělení, nebo při výrobě některých produktů. Titan se rovněž může nacházet v zemské kůře, i když v mnohem menším měřítku než výše zmíněné prvky. Do ovzduší se může dostávat i během výroby titanu a zpracování rud, z letecké dopravy, v některých případech ze sportovních automobilů nebo kol a z pyrotechniky. Měď se může nacházet rovněž v zemské kůře, mimo ni a erozi může být emitována do ovzduší u těžby, zpracování mědi, i při různých chemických postřicích které měď obsahují. Zinek patří mezi často průmyslově vyráběné kovy, je emitován továrnami, které s ním pracují, rovněž při těžbě a zpracování rud obsahujících zinek, nebo při spalování fosilních paliv. Síru také obsahují fosilní paliva a většina je do ovzduší uvolňována při jejich spalování.

Tabulka 10: Prvkový rozbor imisních částic z venkova.

Prvek/ hmot. %	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Cu	Zn	S
Bod 1	90,26	2,61	1,06	0	0,28	0,29	1,54	1,49	0,45	0,31	0,91	0	0	0,78
Bod 2	34,73	1,70	0	0,65	0,43	2,15	0,16	0,24	2,41	56,17	0	0,33	0,67	0

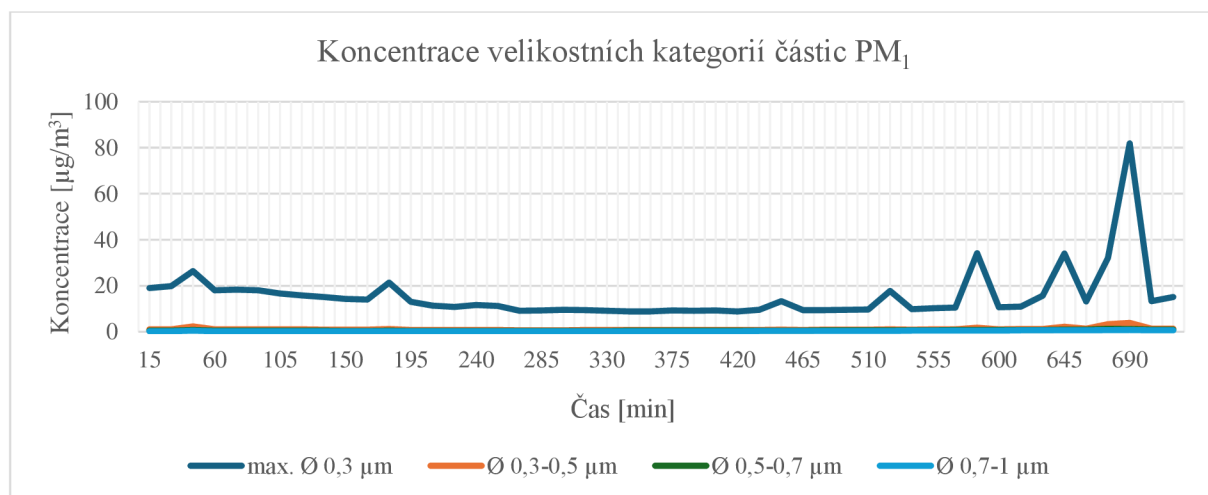
V této lokaci byla po dobu dvanácti hodin měřena koncentrace prachových částic pomocí optického přístroje TSI 3330, který je představen v úvodní části experimentu. Přístroj byl nastaven na rozřazení částic do 12 velikostních kategorií, které byly následně pro snazší porovnání hodnot sumarizované a přepočítané i na koncentraci velikostních kategorií částic PM₁, PM_{2,5} a PM₁₀, které jsou používané nejběžněji.

Při porovnání koncentrací částic PM₁, PM_{2,5} a PM₁₀ v grafu níže lze pozorovat, že se trendy koncentrací téměř shodují, z čehož vyplývá, že téměř všechny částice spadají velikostně do kategorie s průměrem do 1 μm. Procentuálním průměrem všech hodnot měření odpovídá těmto částicím PM₁ 94,88 % všech naměřených částic.



Obrázek 29: Koncentrace PM₁, PM_{2,5} a PM₁₀ v obci Železné.

Vzhledem k velkému podílu nejmenších částic bylo využito většího množství velikostních kategorií a koncentrace částic PM_{10} v grafu níže lze pozorovat jako koncentrace částic o velikosti průměru menšího než $0,3 \mu m$, částice s průměrem $0,3$ až $0,5 \mu m$, částice s průměrem $0,5$ až $0,7 \mu m$ a $0,7$ až $1 \mu m$. I z tohoto grafu vyplývá, že se v nejvyšší míře na koncentracích podílí nejmenší sledovaná kategorie, a to částice o průměru menším než $0,3 \mu m$. Průměrně ze všech hodnot měření tvoří tato kategorie $82,78 \%$ všech naměřených částic.



Obrázek 30: Koncentrace velikostních kategorií částic PM_{10} v obci Železná.

Zákonem stanovené limity pro pevné částice, které se nachází v první části této práce jsou průměrné roční koncentrace pro částice $PM_{2,5}$ a PM_{10} a průměr za 24 hodin pro částice PM_{10} , tento denní limit je $50 \mu g/m^3$, roční limity tvoří hodnoty 20 a $40 \mu g/m^3$.

Průměrné hodnoty koncentrací během tohoto dvanáctihodinového měření jsou $41,32 \mu g/m^3$ pro částice $PM_{2,5}$ a $41,63 \mu g/m^3$ pro částice PM_{10} . Je však patrné z grafu, že nejčastější naměřenou hodnotou je hodnota v rozmezí od 10 do $20 \mu g/m^3$ a hodnoty vysokého průměru jsou následkem několika vrcholů, které mohly být způsobeny tím, že se místo měření nachází nedaleko od kuřáckého prostoru.

2.3.2 Odběr v obytné zóně – město

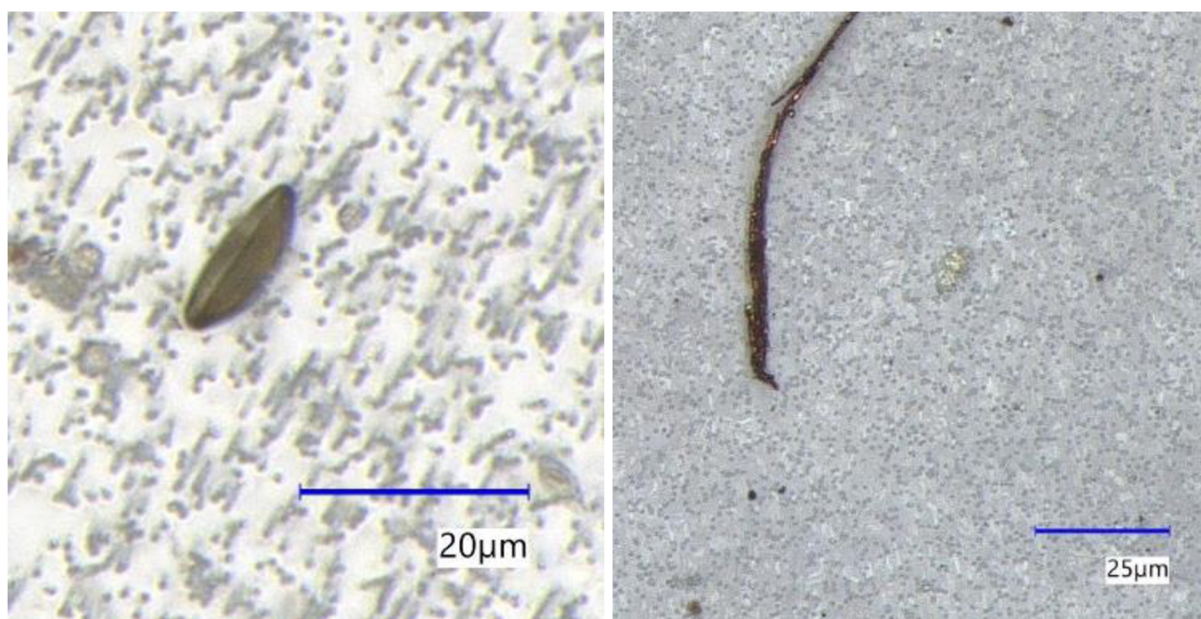
Druhý odběr probíhal ve městě Brno v Králově Poli, na křižovatce ulic Technická a U Vodárny nedaleko od budov Vysokého učení technického. Asi $150 m$ od místa odběru se nachází velmi frekventovaná silnice E461, která však je zastíněna přílehlými budovami firem a podniků, v opačném směru se nachází převážně obytná zóna. Odebráno bylo asi 240 litrů vzduchu.

Odběr byl realizován v úterý $16.4.2024$, započal kolem $15:00$, kdy průměrné meteorologické podmínky jsou zaznamenány v tabulce 11.

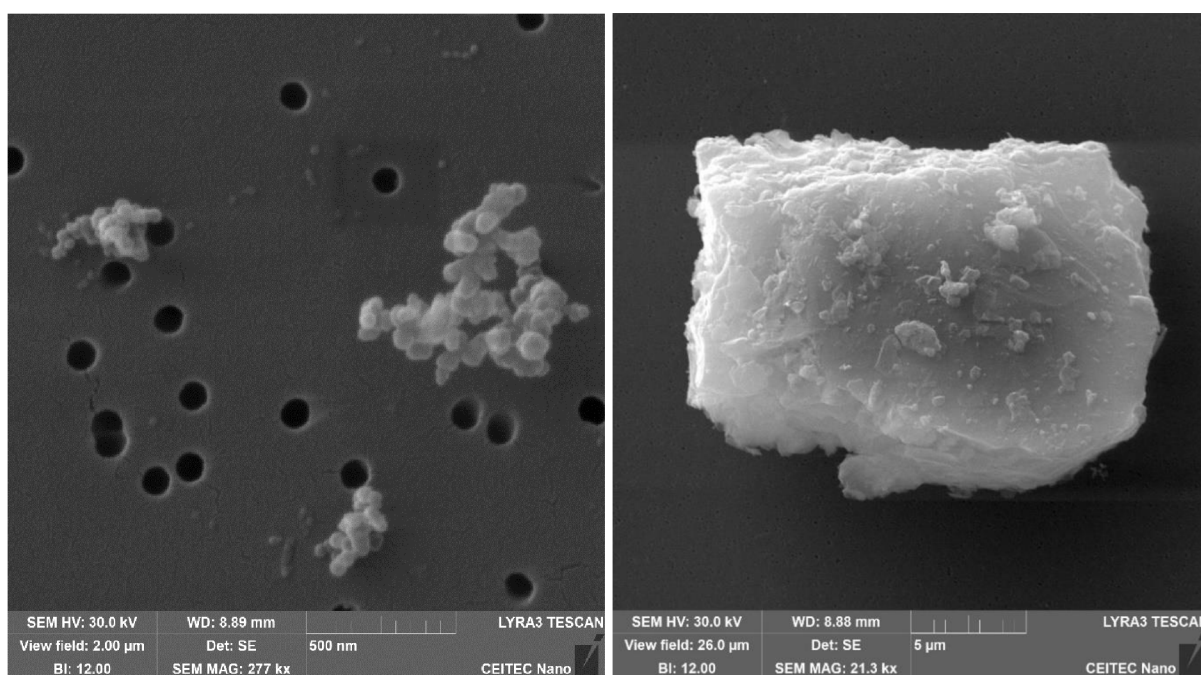
Tabulka 11: Meteorologické podmínky v Brně.

Teplota	$12 \text{ }^\circ\text{C}$
Srážky	0 mm
Relativní vlhkost	91%
Směr větru	jihozápadní
Rychlost větru	3 m/s

Na filtru bylo nalezeno zřejmě pylové zrno o velikosti necelých dvacet mikrometrů. Strukturou se jeví jako hladké, tvarově podlouhlé, oválné. Na snímku 31 na pravé straně lze pozorovat podlouhlou částici dlouhou asi 70 μm o průměru asi 3 μm . Mimo tuto částici se na snímku nachází několik černých částic mnohem menších rozměrů a téměř na středu částice, která zřejmě pochází z eroze půdy, případně stavby. Jeví se jako krystal. Vzhledem pod optickým mikroskopem i velikostí odpovídá některým částicím z katalogu – půdě při orbě, případně částicím z demolice obvodových zdí. Černé částice i dle následujícího snímku pod elektronovým mikroskopem odpovídají vzhledem, tvarem i velikostí částicím ze spalování, které se v katalogu imisí nachází na filtrech při odběru z komínu, výfuku automobilu a při svařování.



Obrázek 31: Městské imise.



Obrázek 32: Městské imise pod elektronovým mikroskopem.

Obrázek 32 vpravo zobrazuje kvádrovou částici, která z vrchního pohledu měří asi 20 μm na délku a 13 μm na šířku a strukturou tenkými vrstvami je z katalogu nejpodobnější částicím z půdy, případně demolici obvodových zdí, avšak je mnohem větších rozměrů.

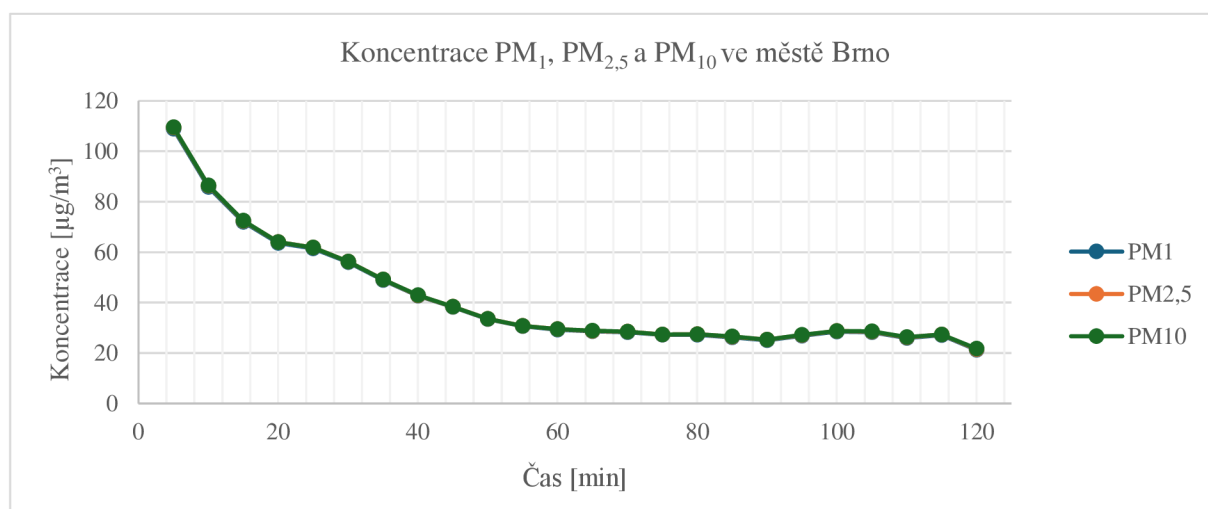


Obrázek 33: Městské imise – různorodost částic.

Na snímku 33 lze pozorovat různorodost odebraných částic, tvarově i velikostně.

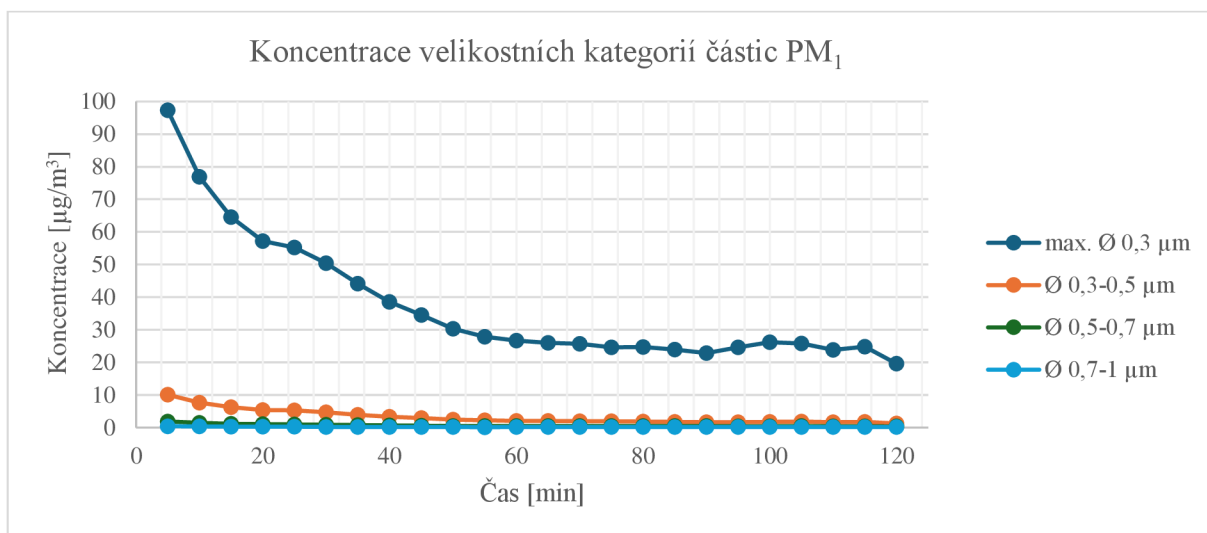
V této lokaci byla rovněž po dobu dvou hodin měřena koncentrace prachových částic pomocí optického přístroje TSI 3330, který je představen v úvodní části experimentu. Přístroj byl nastaven na rozřazení částic do 12 velikostních kategorií, které byly následně sumarizované a přepočítané i na koncentraci částic PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_1 , které jsou měřeny nejčastěji.

Při porovnání koncentrací částic PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10} v grafu níže lze pozorovat, že se trendy koncentrací opět téměř shodují, z čehož vyplývá, že téměř všechny částice spadají velikostně do kategorie s průměrem do 1 μm . Procentuálním průměrem všech hodnot měření odpovídá těmto částicím PM_1 celých 99,16 % všech naměřených částic.



Obrázek 34: Koncentrace PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10} ve městě Brno.

Vzhledem k velkému podílu nejmenších částic bylo využito většího množství velikostních kategorií a koncentrace částic PM_{10} v grafu níže lze pozorovat jako koncentrace částic o velikosti průměru menšího než $0,3 \mu m$, částice s průměrem $0,3$ až $0,5 \mu m$, částice s průměrem $0,5$ až $0,7 \mu m$ a $0,7$ až $1 \mu m$. I z tohoto grafu vyplývá, že se v nejvyšší míře na koncentracích podílí nejmenší sledovaná kategorie, a to částice o průměru menším než $0,3 \mu m$. Průměrně ze všech hodnot měření tvoří tato kategorie $89,87 \%$ všech naměřených částic.



Obrázek 35: Koncentrace velikostních kategorií částic PM_{10} ve městě Brno.

Zákonem stanovené limity pro pevné částice, které se nachází v první části této práce jsou průměrné roční koncentrace pro částice $PM_{2,5}$ a PM_{10} a průměr za 24 hodin pro částice PM_{10} , tento denní limit je $50 \mu g/m^3$, roční limity tvoří hodnoty 20 a $40 \mu g/m^3$.

Průměrné hodnoty koncentrací během tohoto dvouhodinového měření jsou $41,64 \mu g/m^3$ pro částice $PM_{2,5}$ a $41,70 \mu g/m^3$ pro částice PM_{10} . Je však patrné z grafu, že první hodinu má po celou dobu křivka klesající trend a během druhé hodiny došlo k částečnému ustálení, kdy se průměrná hodnota koncentrace již pohybovala mezi 20 až $30 \mu g/m^3$. Nutno také vzít v potaz, že k nejnižším hodnotám koncentrací prachových částic dochází obvykle během noci a poměrně krátký čas měření, tudíž by s největší pravděpodobností i tato lokace v den měření mohla splňovat dlouhodobé emisní limity stanovené zákonem.

2.3.3 Odběr ve vnitřních prostorech rodinného domu

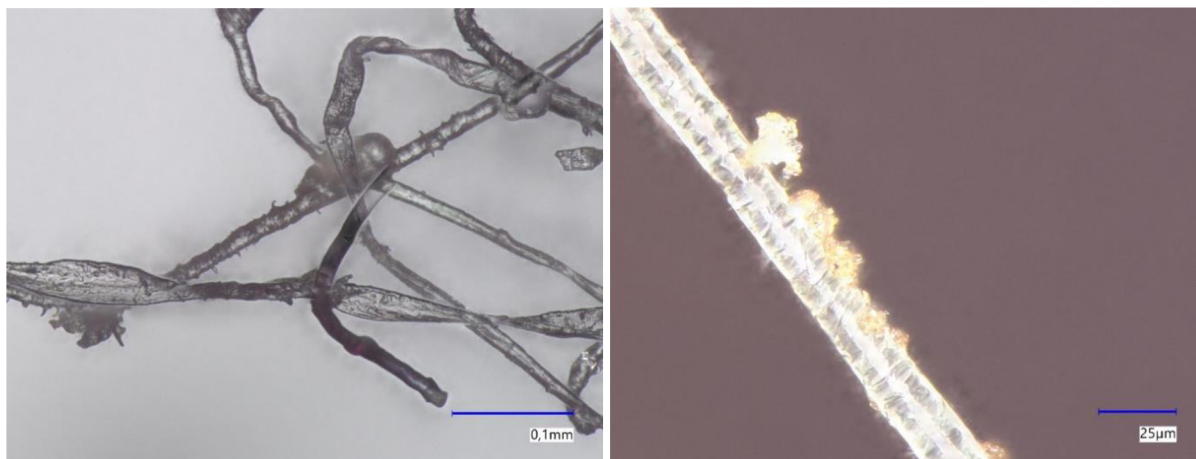
Třetí odběr probíhal v obci Železné, rovněž jako první odběr, avšak uvnitř rodinného domu v prostorech chodby, která není přímo oddělena od kuchyně. Prostor mezi chodbou a kuchyní je oddělen pouze otvorem ve zdi, v šířce asi 100 cm a výšce 210 cm. Dohromady kuchyň s chodbou vykazují výměru asi 22 m².

Odběr a měření koncentrací částic bylo realizován ve středu, 1.5.2024, započalo kolem $10:00$, průměrné meteorologické podmínky uvnitř domu v čase odběru a měření koncentrací pevných částic jsou zaneseny do následující tabulky.

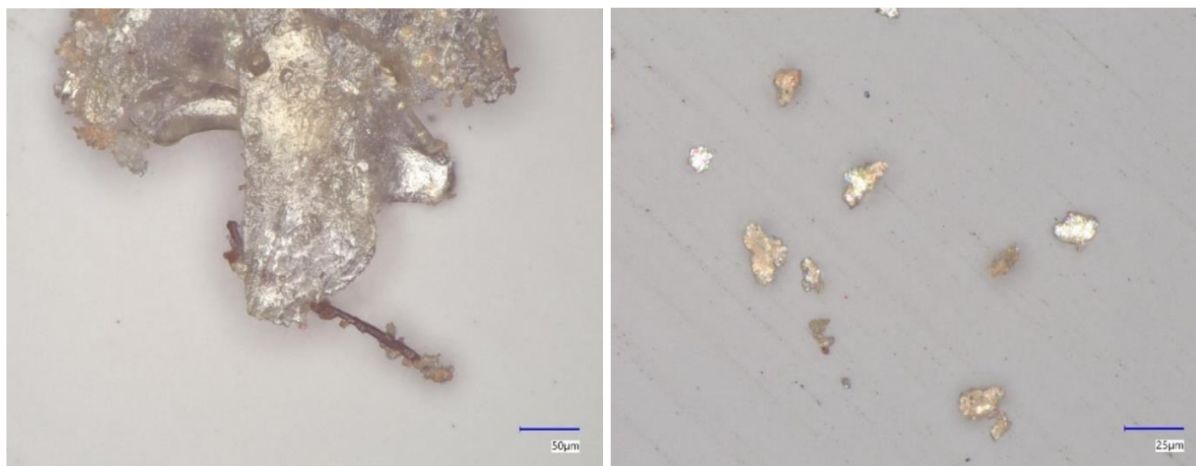
Tabulka 12: Meteorologické podmínky v rodinném domě.

Teplota	$26 \text{ }^\circ\text{C}$
Relativní vlhkost	55%

Tento odběr byl realizován dlouhodobě a depozičně, byly tedy částice nechány sedimentovat na předem očištěný povrch. Největší podíl částic tvoří vlákna různých typů, především umělá, na kterých lze pozorovat částice, které se na nich usazují, například na snímku 36 vpravo lze pozorovat na vlákně s průměrem asi 20 mikrometrů i velmi jemné prachové částice s velikostí jednotek mikrometrů. Tyto částice i částice na následujících dvou snímcích vzhledem k místu odběru a příslušným odehrávajícím se dějům na těchto místech (zalévání květin, obutí bot, mytí nádobí, příprava pokrmů...) pochází s největší pravděpodobností z procesu vaření, pečení a přípravy pokrmů.



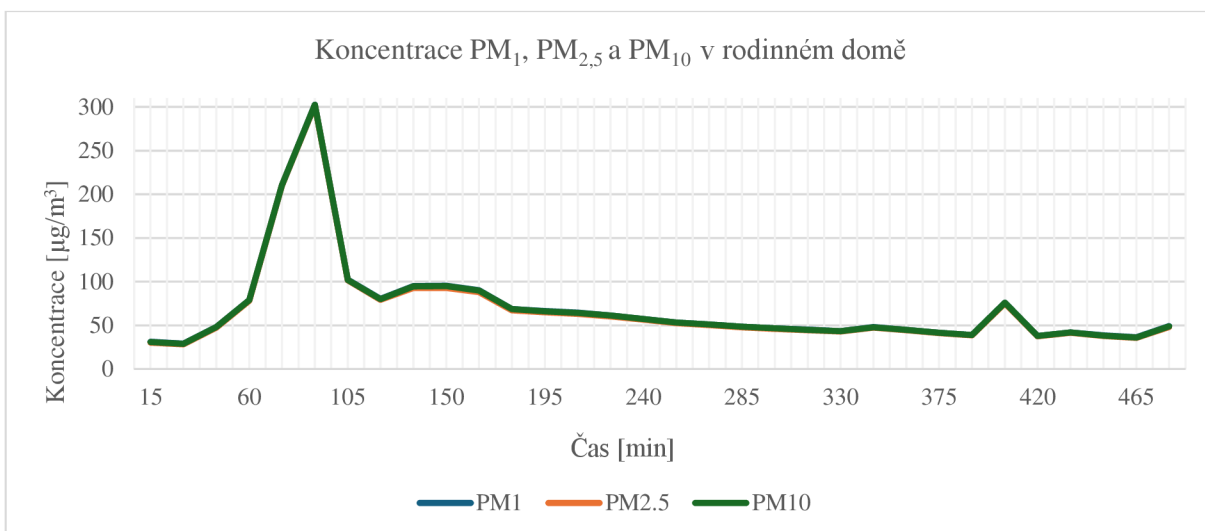
Obrázek 36: Imisní odběr v domě, vlákna a částice na vlákně.



Obrázek 37: Imisní odběr v domě, obří částice s krystaly a kusem vlákna a oblast s částicemi o velikosti jednotek až desítek mikrometrů.

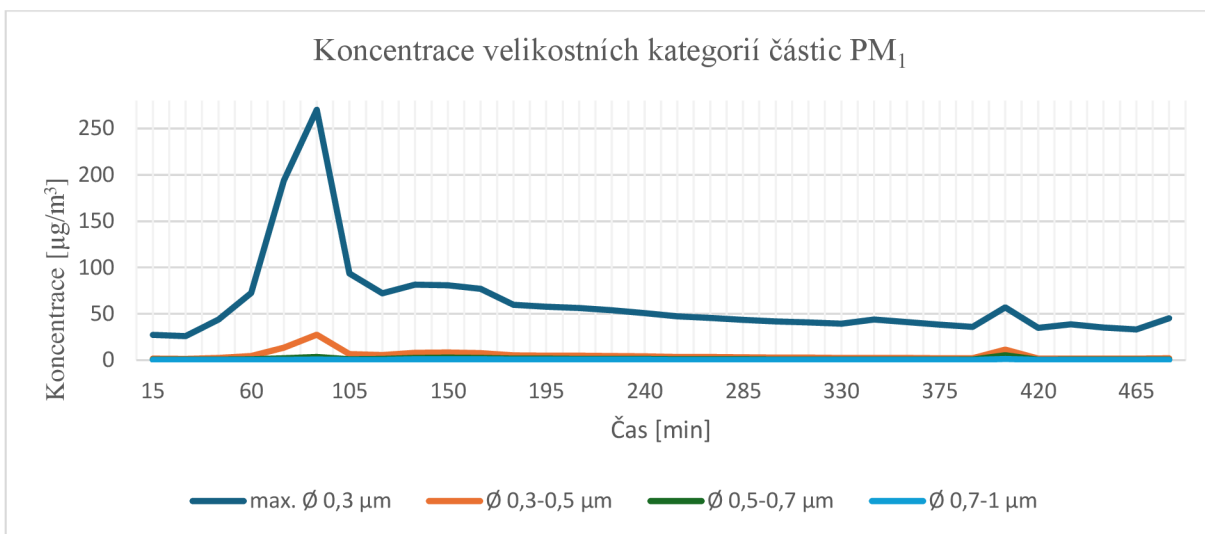
V této lokaci, uvnitř domu byla rovněž po dobu osmi hodin měřena koncentrace prachových částic pomocí optického přístroje TSI 3330, který je představen v úvodní části experimentu. Přístroj byl nastaven na rozřazení částic do 12 velikostních kategorií, které byly následně sumarizované a přepočítané i na koncentraci částic PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 , které jsou měřeny nejčastěji.

Při porovnání koncentrací částic PM_1 , $PM_{2,5}$ a PM_{10} v grafu níže lze pozorovat, že se trendy koncentrací opět téměř shodují, z čehož vyplývá, že téměř všechny částice spadají velikostně do kategorie s průměrem do 1 µm. Procentuálním průměrem všech hodnot měření odpovídá těmto částicím PM_1 98,45 % všech naměřených částic.



Obrázek 38: Koncentrace PM_1 , $PM_{2,5}$ a PM_{10} v rodinném domě.

Z důvodu velkého podílu nejmenších částic bylo využito většího množství velikostních kategorií a koncentrace částic PM_1 v grafu níže lze pozorovat jako koncentrace částic o velikosti průměru menšího než $0,3 \mu\text{m}$, částice s průměrem $0,3$ až $0,5 \mu\text{m}$, částice s průměrem $0,5$ až $0,7 \mu\text{m}$ a $0,7$ až $1 \mu\text{m}$. I z tohoto grafu vyplývá, že se v nejvyšší míře na koncentracích podílí nejmenší sledovaná kategorie, a to částice o průměru menším než $0,3 \mu\text{m}$. Průměrně ze všech hodnot měření tvoří tato kategorie 89,26 % všech naměřených částic.



Obrázek 39: Koncentrace velikostních kategorií částic PM_1 v rodinném domě.

Průměrné hodnoty koncentrací během tohoto osmihodinového měření jsou $69,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pro částice $PM_{2,5}$ a $69,44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pro částice PM_{10} . Je však patrné z grafu, že za velmi vysoký průměr koncentrace částic ve velké míře může vrchol, ke kterému došlo po první hodině měření. Před tímto vrcholem hodnoty koncentrací všech částic dosahovaly hodnot do $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Vrchol je způsoben vařením a pečením, kdy se kuchyňský sporák nacházel asi 4 m od přístroje a mezi chodbou, na které byl přístroj umístěn a kuchyní se nachází otvor ve zdi s rozměry asi 100 cm a 210 cm. Při tomto vrcholu hodnoty dosáhly koncentrace částic přes $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.4 Shrnutí výsledků imisních odběrů a měření koncentrací

Ze dvou imisních odběrů, které byly realizovány ve venkovním prostředí, a to v relativně malé obci a ve velkém městě, bylo možné pozorovat velké množství typů částic, z nichž některé se podobají částicím z Katalogu poléťavého prachu. Jedná se převážně o částice spalování, nebo například o částice z orby půdy, kdy podobné částice mohou vznikat přirozenou erozí zeminy.

Pro porovnání koncentrací částic mezi těmito dvěma lokacemi při experimentu nevzniklo a ani nemohlo vzniknout dostatečné množství dat vzhledem k tomu, jak jsou koncentrace částic proměnlivé během roku a jaké veškeré činnosti mají na koncentrace přímý vliv. Slouží proto pouze jako příklad koncentrací a analytický rozbor hodnot koncentrací je proveden v následující kapitole z dlouhodobých výsledků Hydrometeorologického ústavu a dalších dostupných zdrojů.

Příklady těchto koncentrací pro obě venkovní lokace vykazují průměrné hodnoty během měření koncentrace částic $PM_{2,5}$ i PM_{10} přes $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Obě měření probíhaly během dne s jiným celkovým časem, dá se však předpokládat, že během noci by byly hodnoty nižší. Zákonem stanovené limity pro obě tyto kategorie jsou pouze roční, a to hodnotami 20 a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pro částice PM_{10} je zákonem stanoven i limit pro koncentraci během 24 hodin, který je dán hodnotou $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Předpokládanou hranici, při které se začínají projevovat zdravotní účinky dle organizace WHO tvoří hodnota $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, která je vedena jako cílová směrná hodnota Evropskou směrnicí pro kvalitu ovzduší.

Vzhledem k výsledkům a těmto hodnotám stanoveným zákonem a doporučením lze konstatovat, že by lokace zřejmě splnily zákonem stanovené limity, avšak od doporučené hodnoty vzhledem ke zdravotnímu riziku se velmi liší. A ani nejnižší naměřené koncentrace v žádném případě nedosahovaly hodnot pod úroveň $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V odběru z vnitřní lokace – rodinného domu se velmi často nachází vlákna a zřejmě částice vznikající během vaření. Při měření koncentrací bylo dosaženo největšího průměru i největšího vrcholu ze všech měření, a to právě při vaření. Bylo dosaženo hodnoty přes $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Námětem pro další měření by mohlo být současné měření venkovní i vnitřní při různých dispozicích větrání a zjištění míry takzvané penetrace – schopnosti částic pronikat dovnitř budovy skrze materiál budovy. Je však zřejmé, že vnitřní zdroje mohou být z hlediska hodnot koncentrací pro člověka mnohdy nebezpečnější než zdroje vnější.

Ve všech naměřených koncentracích – v obci, ve městě i v domě, tvořily podíl minimálně 82 % částice s aerodynamickým průměrem menším než $0,3 \mu\text{m}$, tedy 30 nm. Tyto částice ve většině případů nelze jednoduše identifikovat pod optickým mikroskopem, který byl při této diplomové práci primárně použit. Z identifikovaných částic emisí nacházejících se v Katalogu prachových částic (příloha č. 1 této diplomové práce) se může jednat o částice spalování, svařování, měkkého pájení nebo například demolice.

Nejvyšší hodnota koncentrací těchto částic je způsobena tím, že díky malé velikosti a s tím spojené nízké hmotnosti velmi dlouhou dobu trvá jejich depozice – ukládání látek z ovzduší do jiných složek – vegetace, zeminy, vody atd. Jednotkou depozice je hmotnost částic na plochu za daný čas. Nejrychlejším procesem je tzv. mokrá depozice, která probíhá za pomoci atmosférických srážek. Při depozici suché se částice dostávají na povrch nejčastěji gravitační sedimentací – zejména hmotnější částice, případně difuzí – částice nejmenších frakcí.

3 Analýza imisního monitoring

Český hydrometeorologický ústav spravuje Státní síť imisního monitoringu, jež pokrývá celou rozlohu České republiky a do kterého spadají různé typy měřících stanic. Dle typu stanice je lze rozdělit na manuální (MIM), ze kterých jsou exponované filtry odváženy do laboratoří a následně vyhodnoceny a automatické (AIM), kde stanovení koncentrací probíhá pomocí analyzátoru a data jsou ihned odesílány do centrálního počítače. Tyto dva typy se mohou vyskytovat na některých místech společně a každý měří koncentrace jiných látek. [17]

Z analýzy těchto zveřejňovaných dat lze získat mnoho spojitostí mezi různými jevy (déšť, sezóna vytápění, čištění komunikací atd.) a prašností prostředí. Analýza těchto dat pro město Brno a vyhledání některých spojitostí je součástí této diplomové práce, a to z důvodu, že veškerá měření v předchozí části práce probíhala v krátkodobém horizontu, pro ucelenost a kompletnost veškerých získaných dat.

3.1 Klasifikace stanic imisního monitoringu

Jednotlivé stanice lze kategorizovat kombinací písmen evropské klasifikace měřících stanic Eol (Exchange of Information). Tři jednotlivé faktory, které se popisují, jsou typ lokality, typ oblasti a charakteristika oblasti.

Typ lokality

Parametr pojednává o dominantním zdroji lokality. Písmena T, I nebo B lze rozlišit tři typy:

- T – dopravní stanice (traffic)
- I – průmyslová stanice (industrial)
- B – pozadová stanice (background).

Vzhledem k měření emisí, nikoli imisí, je vždy měření kombinací z různých zdrojů znečištění, dané označení klasifikuje nejvýznamnější zdroj. [17]

Typ oblasti

Toto kritérium pojednává o rozložení obyvatelstva a blízkosti populace měřící stanic.

Opět z anglických slov a jejich počátečních písmen lze rozlišit tři typy oblastí:

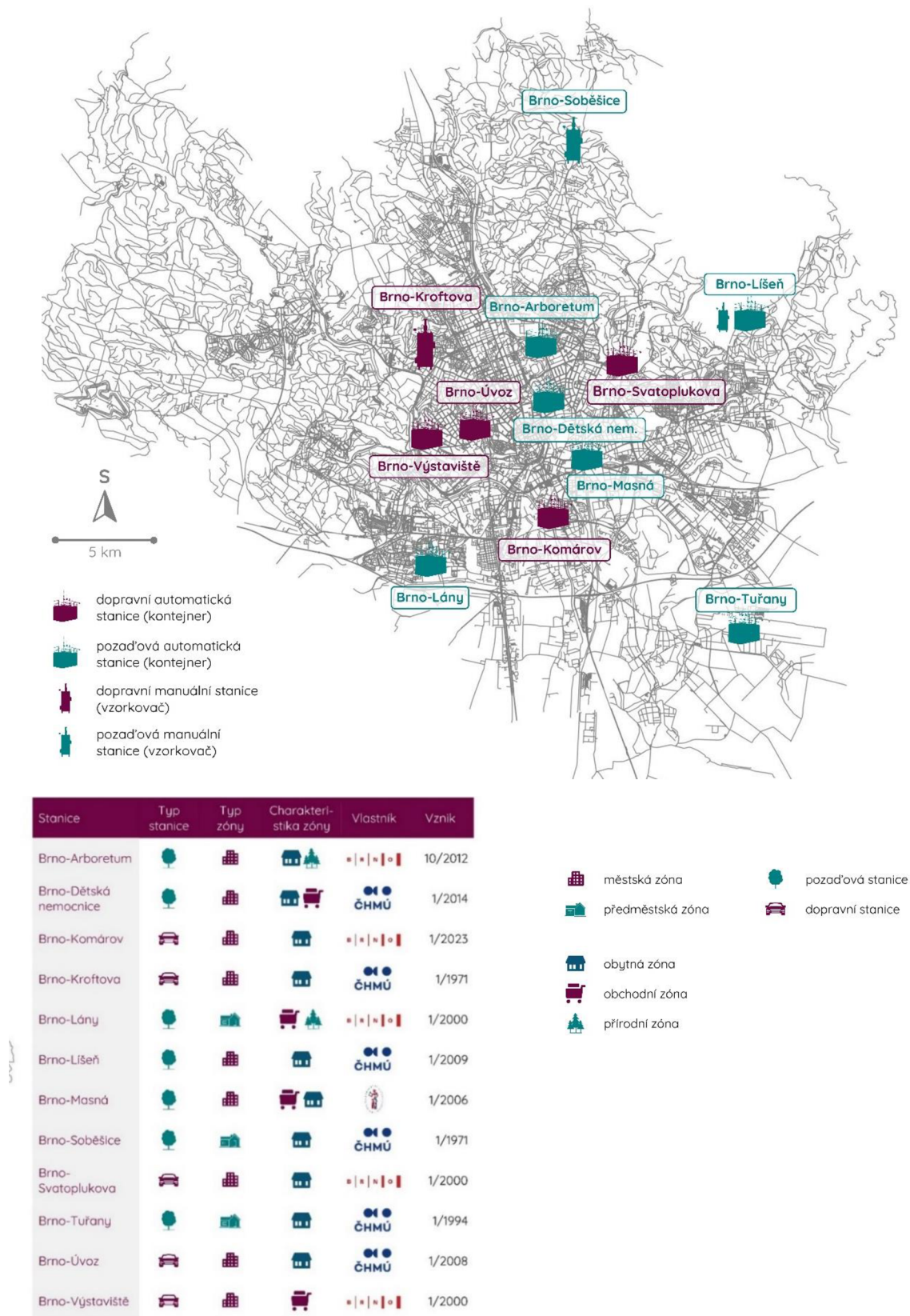
- U – městská (urban)
- S – příměstská (suburban)
- R – venkovská (rural). [17]

Charakteristika oblasti

Klasifikace zpřesňující typ oblasti. Charakteristika může být označena i více písmennou zkratkou, kdy jsou písmena seřazeny dle priority a první má nejvyšší důležitost. Lze rozlišit charakteristiky:

- R – obytná (residential)
- C – obchodní (commercial)
- I – průmyslová (industrial)
- A – zemědělská (agricultural)
- N – přírodní (natural)
- RC – obytná/obchodní
- CI – obchodní/průmyslová
- IR – průmyslová/obytná
- RCI – obytná/obchodní/průmyslová
- AN – zemědělská/přírodní. [17]

3.2 Stanice imisního monitoringu v Brně



Obrázek 40: Stanice imisního monitoringu v Brně, 2023 [18].

Aktuálně, k datu 22.1.2024 měří částice PM₁₀, PM_{2,5} i PM₁ automatické stanice Komárov, Lány, Arboretum, Svatoplukova, Výstaviště a měřicí vůz, který je využíván pro mobilní měření k řešení stížností a dle požadavků městských částí. Pro hledání souvislostí mezi okolními vlivy a znečištěním jsou nedílnou součástí analýzy parametry jako je směr a rychlost větru, teplota, vlhkost, případně tlak. Všechny tyto veličiny jsou na výše zmíněných stanicích rovněž měřeny, výjimku tvoří stacionární stanice Lány, kde není měřen tlak.

3.3 Specifikace města Brna

Analýza dat je provedena ze stanic imisního monitoringu nacházejících se ve městě Brno, přičemž každá lokalita má svá specifika ohledně meteorologických podmínek i zdrojů znečištění a je třeba být s nimi obeznámen, případně je do analytických výsledků zahrnout.

Brno je druhé největší město České republiky, leží mezi Českomoravskou vrchovinou a nížinami jižní Moravy, což spolu s nadmořskou výškou, která se pohybuje od 190 do 497 m n. m., udává mírné klima. Maximum srážek spadne obvykle v červnu až srpnu, tedy mimo topnou sezónu. Průměrná roční teplota dosahuje 9,4 °C, průměrné roční srážky 505 mm, průměrný počet dnů se srážkami 150 a převažuje severozápadní směr větru. V chladnějším období, topném, však převládá jižní případně jihovýchodní směr větru malých rychlostí nebo nepříznivé bezvětří. Terén je členěn podél vodních toků do uzavřených kotlin (např. Žabovřeská kotlina), které jsou špatně provětrávané a častěji se zde projevují inverze a přízemní mlhy.

Díky své poloze město patří k území se značnou intenzitou dopravy. Nachází se zde významná křižovatka dálnic D1 (Praha – Brno) a D2 (Brno – Bratislava), leží na mezinárodní železniční trase Budapešť – Praha – Brno – Berlín a v územní části Tuřany se nachází mezinárodní letiště, které v roce 2022 odbavilo 471 811 cestujících a 11 222 tun nákladu. Centrální části města se rovněž vyznačují vysokou intenzitou dopravy, a to až 70 000 vozidel denně. Nachází se zde také asi 1100 zdrojů dříve zařazených do kategorií středních, velkých, a zvláště velkých zdrojů znečištění ovzduší. [19], [20], [21], [22]

3.4 Analýza dat stanic imisního monitoringu

Analýza dostupných dat byla provedena z různých dostupných celků, které poskytl Hydrometeorologický ústav, případně je přímo zveřejňuje nebo je zveřejňují jednotlivé kraje nebo území, kterých se znečištění týká. Cílem této kapitoly je převážně rozbor vlivů meteorologických podmínek na znečištění ovzduší.

3.4.1 Závislosti koncentraci částic na klimatických podmínkách – stanice imisního monitoringu Výstaviště, rok 2016

Z dostupných a vybraných dat z Hydrometeorologického ústavu, v tomto případě z roku 2016, ze stacionární stanice Brno – Výstaviště, lze uvést pár souvislostí a možných hypotéz.

Stanice Výstaviště přísluší ke stanicím dopravním, městským s charakteristickou zónou obchodní. Měření a zápis naměřených hodnot probíhal každých deset minut a měřeními veličinami byly koncentrace částic PM₁₀ a NO_x, teplota, vlhkost vzduchu, směr větru a rychlost proudění větru.

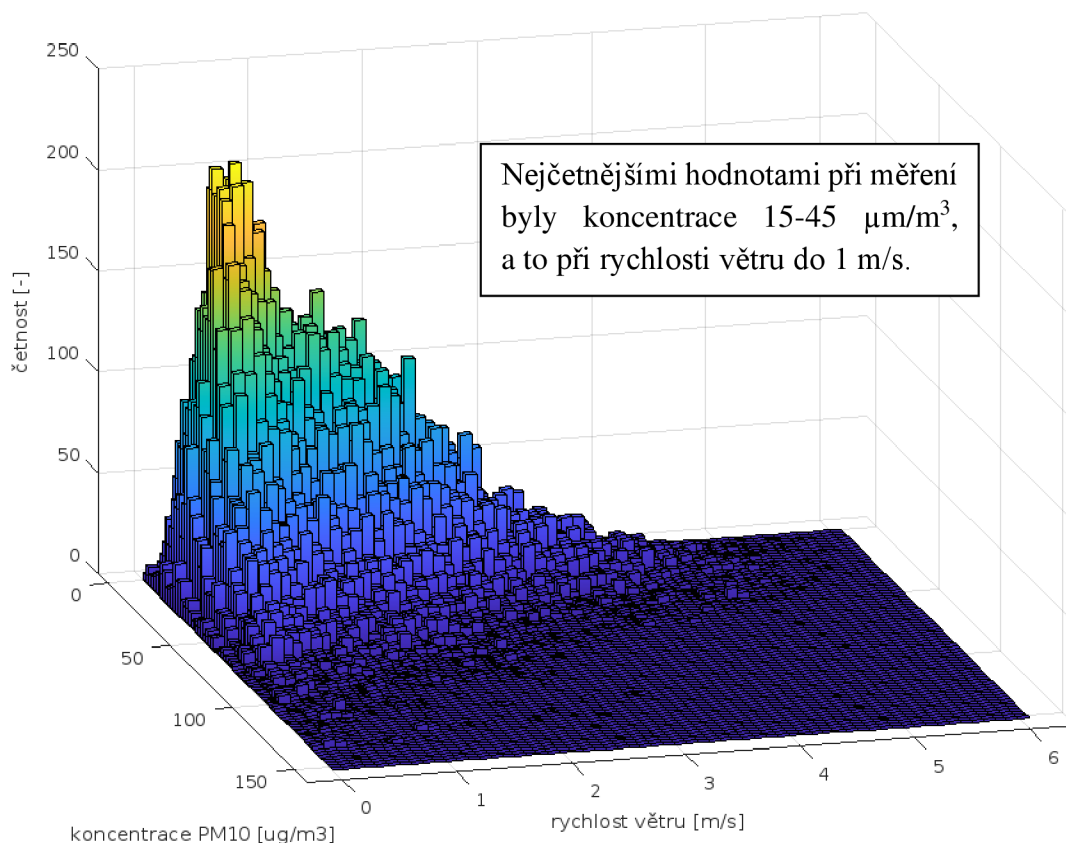
Grafy použité v těchto kapitolách byly vytvořeny v programu MATLAB, v online verzi 2024 (6.3.0.).

Vliv meteorologických podmínek na koncentrace PM

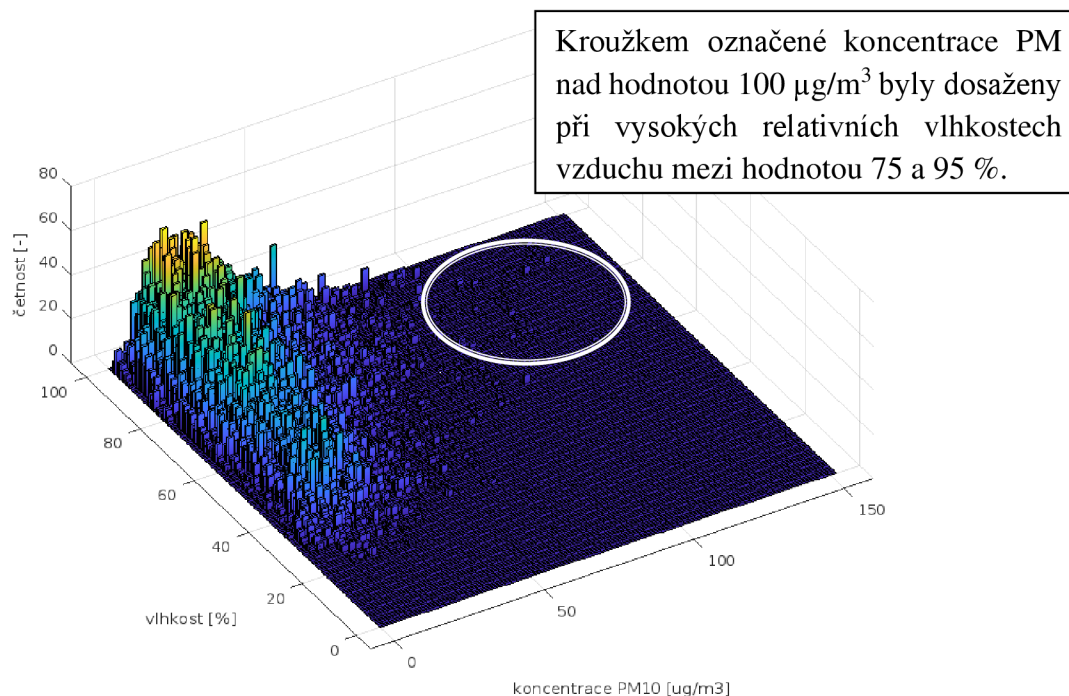
Z grafu lze vyčíst, že k maximálním koncentracím částic PM₁₀ dochází při bezvětří a minimální rychlosti větru do cca 2 m/s. Špatné rozptylové podmínky byly naměřeny při většině měření a převládají, což potvrzuje fakt uvedený v kapitole Specifikace města Brna (3.3). Při rychlostech větru nad 4 m/s již koncentrace částic nepřesahuje hodnotu 100 µg/m³.

Není zde přímo patrná resuspenze, tedy zvýšení koncentrace částic při zvýšení rychlosti větru, může se však jednat právě o konstantní hodnoty koncentrací při různých rychlostech proudění, tedy že pro hodnotu rychlosti proudění například 2 až 3 m/s byly dosaženy shodné maximální koncentrace kolem 80 µg/m³. Ideálně by měly koncentrace lineárně klesat při zvyšování rychlosti větru – rozptylem částic.

Kombinace zvýšených koncentrací znečišťujících látek a špatných rozptylových podmínek obvykle nastává v zimě, kdy ve městě Brno převažuje slabý jihovýchodní vítr, případně bezvětří. Tyto hodnoty grafu se dají očekávat nejbliže u osy koncentrací u jejích vyšších hodnot.

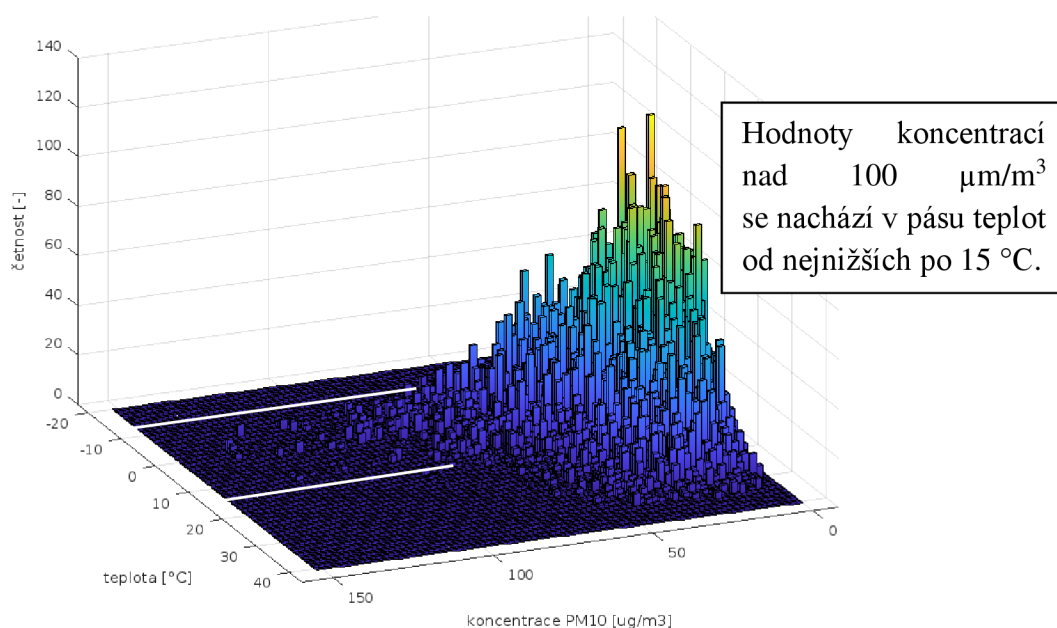


Obrázek 41: Graf koncentrace částic PM₁₀, rychlosti větru a četnosti měření.



Obrázek 42: Graf koncentrace částic PM_{10} , relativní vlhkosti a četnosti měření.

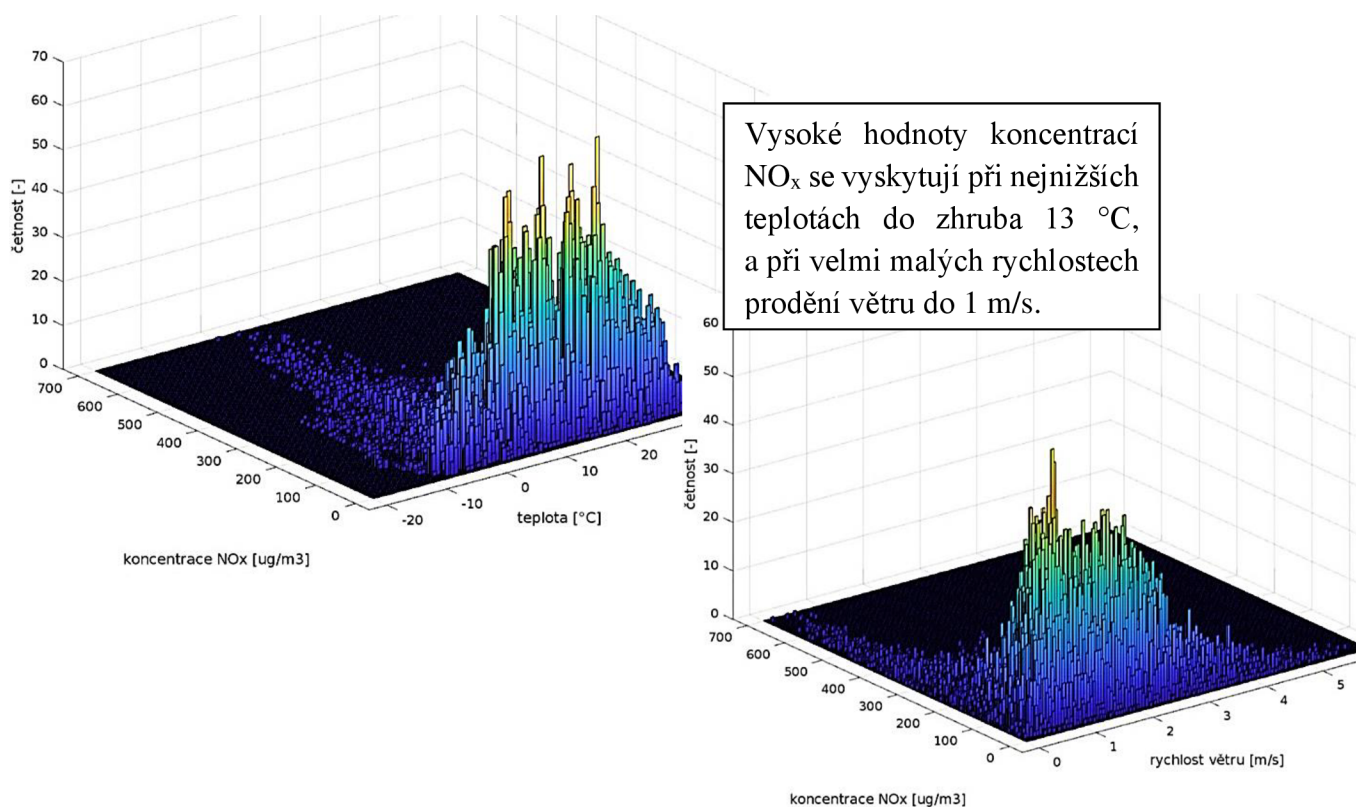
V první kapitole této diplomové práce je uvedeno, že při vysoké vlhkosti, dešti, by nemělo docházet k resuspenzi a obecně by částice měly nabývat hmotnosti a rychleji se usazovat pomocí gravitace. Tato situace, mokrá depozice nastává při téměř 100% vlhkosti a téměř nulové koncentraci – dešť. Z grafu ale vyplývá, že k vysokým hodnotám koncentrace dochází častěji při vysokých vlhkostech mezi 70 a 100 %. Vysoké vlhkosti jsou spjaty se zimním obdobím, nejvyšší hodnoty relativní vlhkosti vzduchu bývají dosaženy v listopadu, prosinci a lednu [24], v období, kdy dle obrázku 43, který se nachází níže, dochází k nejvyšším koncentracím částic. Jedná se o období topné sezóny, lze tedy předpokládat, že část částic, kladná odchylka od průměru, vznikla převážně vytápěním. Maximální koncentrace nad hodnotu $100 \mu\text{m}/\text{m}^3$ se vyskytují od nejnižších naměřených teplot do asi 10-15 °C.



Obrázek 43: Graf koncentrace částic PM_{10} , teploty a četnosti měření.

Vliv meteorologických podmínek na koncentrace NO_x

Koncentrace oxidů dusíku je v tomto případě zobrazena v závislosti na teplotě a rychlosti větru jako dvou nejmocnějších meteorologických faktorech. Tyto grafy jsou součástí této diplomové práce díky možným spojitostem mezi těmito koncentracemi, a to z důvodu, že v některých případech jsou obě látky emitovány do ovzduší stejným zdrojem a pevné částice mohou vznikat i nukleací, případně kondenzací těchto plynů. Následuje graf zobrazující právě závislost koncentrací těchto dvou látek – pevných částic a oxidů dusíku.



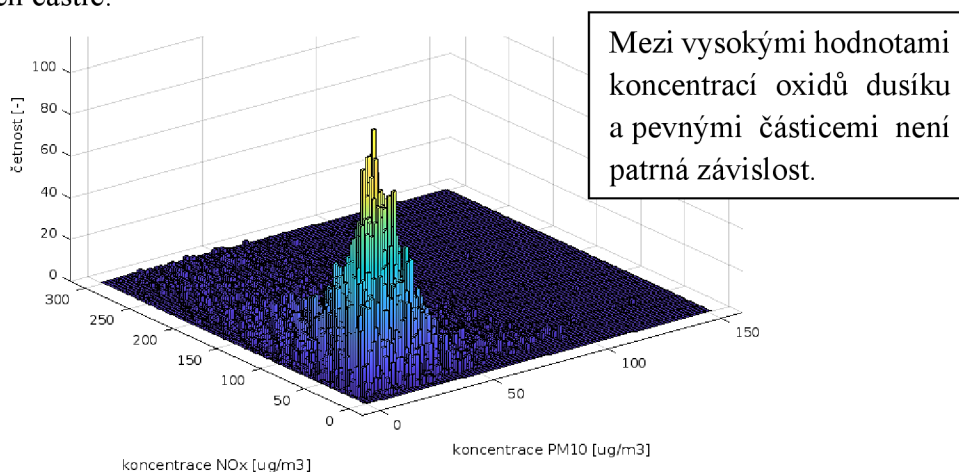
Obrázek 44: Grafy koncentrací NO_x v závislosti na teplotě a rychlosti větru a četnosti měření.

Grafy koncentrace NO_x, kterou stanice imisního monitoringu rovněž sleduje zobrazují koncentraci v závislosti na teplotě (vlevo) a na rychlosti větru (vpravo). Z těchto i předchozích grafů se závislostí pevných částic na teplotě a rychlosti větru vyplývá, že zvýšené a maximální koncentrace NO_x mnohem více korelují s obdobím otopné sezóny a vytápěním než částice PM. Téměř všechny naměřené hodnoty vyšší než 300 µm/m³ se pohybují v pásu od nejnižších teplot do asi 10 °C. Rozšíření pásu s hodnotami koncentrací okolo 250 µm/m³ by zřejmě mohla způsobovat doprava a mohlo by se jednat o situace s velkou dopravní zátěží.

Rychlost větru, kdy nejnižší rychlosti jsou v této lokalitě spojovány právě se zimním otopným obdobím, má přímý vliv na koncentrace a veškeré hodnoty koncentrací nad 200 µm/m³ byly naměřeny při rychlosti proudění větru do 1 m/s, tedy téměř při bezvětří. Naopak při rychlosti větru nad 4 m/s hodnoty již nepřekračují koncentraci 100 µm/m³.

Závislost koncentrací PM a NO_x

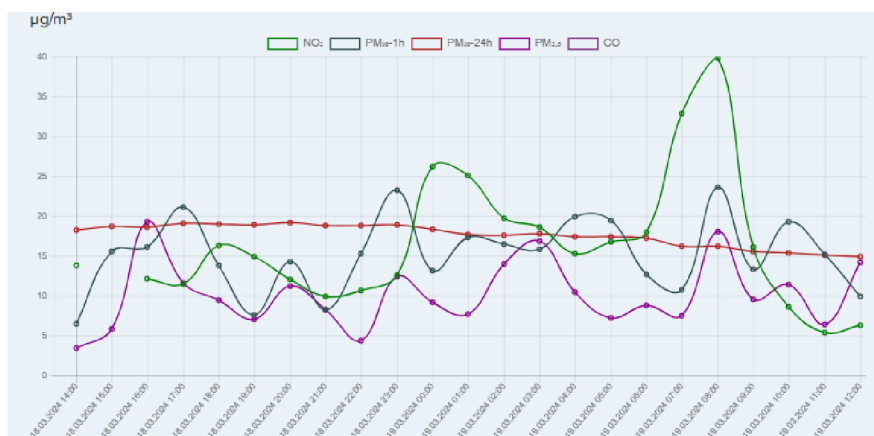
Závislost koncentrací částic PM₁₀ a NO_x není z grafu zřejmá, důvodem je fakt, že částice PM₁₀ vznikají oproti částicím NO_x více způsoby a čítají mnohem více zdrojů, včetně zdrojů přírodních (např. květiny – pyl, bakterie...). Ale existuje jejich vzájemná vazba. Mohou pocházet ze společného zdroje (spalování fosilních paliv), jsou ovlivňovány stejnými faktory – meteorologickými podmínkami a sekundární nejjemnější aerosol rovněž vzniká i reakcí prekurzorů, kterými jsou zejména oxidy síry a dusíku, nukleací. Přímá vazba však z grafu nevyplývá, i při nízkých koncentracích pevných částic byly naměřeny vysoké hodnoty oxidů dusíku a rovněž při nízkých koncentracích oxidů dusíku byly naměřeny vysoké hodnoty koncentrací pevných částic.



Obrázek 45: Graf koncentrací částic PM₁₀, NO_x a četnosti měření.

Z důvodu, že z grafu nevyplývá žádná souvislost koncentrací těchto látek byla spojitost mezi koncentracemi PM a NO_x hledána i v datech automatického imisního monitoringu v Brně, ve veřejných online výsledcích měření, které jsou dostupné z webové stránky <http://www.brnenskeovzdusi.cz/monitoring-ovzdusi/>.

Z vybraného obrázku níže, který eviduje stanici imisního monitoringu v Brně, u Dětské nemocnice ze dne 18.3.2024, lze vyvodit, že koncentrace oxidů dusíku je velmi úzce spojena s intenzitou dopravy, což ukazuje pík okolo sedmé a osmé hodiny ranní. Tento pík kopíruje i zvýšení koncentrací pevných částic. Tyto částice mohou být způsobeny také přímo dopravou – emisí z výfuků automobilů, otěrů pneumatik a brzdových destiček a erozí komunikace, rovněž resuspenzí, kdy projíždějící automobily zvirí již sedimentované částice.



Obrázek 46: Záznam stanice imisního monitoringu od 18.3. 14:00 do 19.3. 12:00 [46].

3.4.2 Závislosti koncentrací částic na klimatických podmínkách – stanice imisního monitoringu Svatoplukova, rok 2019

Z dalších vybraných dostupných dat z Hydrometeorologického ústavu se jedná o data z roku 2019 ze stacionární stanice Brno – Svatoplukova.

Stanice Svatoplukova přísluší ke stanicím dopravním, městským s charakteristickou obytnou zónou. Měření a zápis naměřených hodnot probíhal každých deset minut a měřeními veličinami byly koncentrace částic PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ a NO_x, teplota, vlhkost vzduchu, směr větru a rychlost proudění větru.

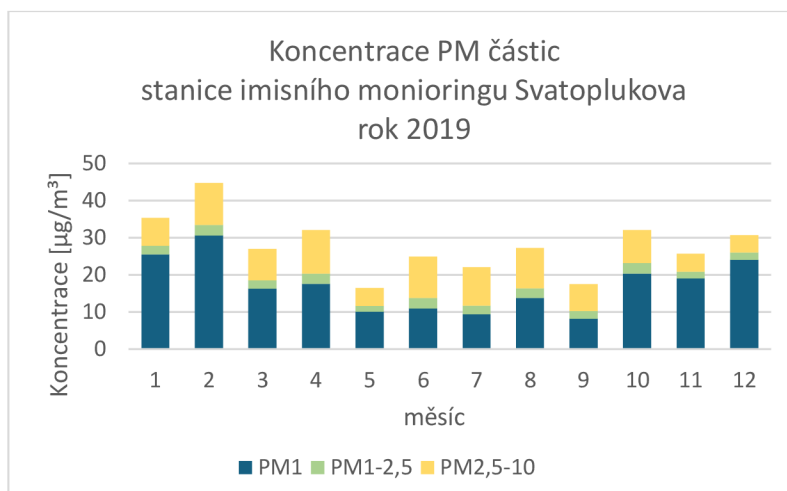
Grafy byly vytvořeny v programu MATLAB, případně v Excelu.

Ve srovnání s grafy z imisní stanice Výstaviště, které obsahuje předchozí kapitola, jsou grafy vlivů meteorologických podmínek atd. velmi podobné, proto je tato kapitola již neobsahuje a obsahuje grafy, které z předchozího souboru dat nemohly být vytvořeny.

Tabulka 13: Průměrné hodnoty měřených veličin, AIM Svatoplukova 2019.

Měřená veličina	Konc. PM ₁₀	Konc. PM _{2,5}	Konc. PM ₁	Konc. NO _x	Teplota	Rychlost větru	Směr větru	Vlhkost
Jednotka	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	°C	m/s	deg	%
Leden	35,31	27,85	25,48	124,66	-0,3	1,14	265,3	76,63
Únor	44,74	33,47	30,60	155,31	3,0	1,02	276,5	73,26
Březen	26,96	18,50	16,32	104,02	7,6	1,16	257,6	64,47
Duben	32,09	20,35	17,58	90,16	12,2	1,24	261,6	53,68
Květen	16,43	11,67	10,11	77,88	12,8	1,41	267,6	68,31
Červen	24,89	13,81	10,96	68,75	23,3	1,05	256,6	61,07
Červenec	22,05	11,70	9,41	63,43	21,1	0,98	278,9	60,34
Srpen	27,26	16,38	13,83	82,85	23,8	0,72	244,5	64,25
Září	17,51	10,25	8,16	83,63	15,8	0,99	265,8	67,72
Říjen	32,03	23,15	20,37	116,99	11,1	0,77	248,1	78,07
Listopad	25,73	20,89	19,04	102,57	7,8	0,75	209,0	82,43
Prosinec	30,66	26,05	24,04	112,19	2,5	1,01	244,9	81,60

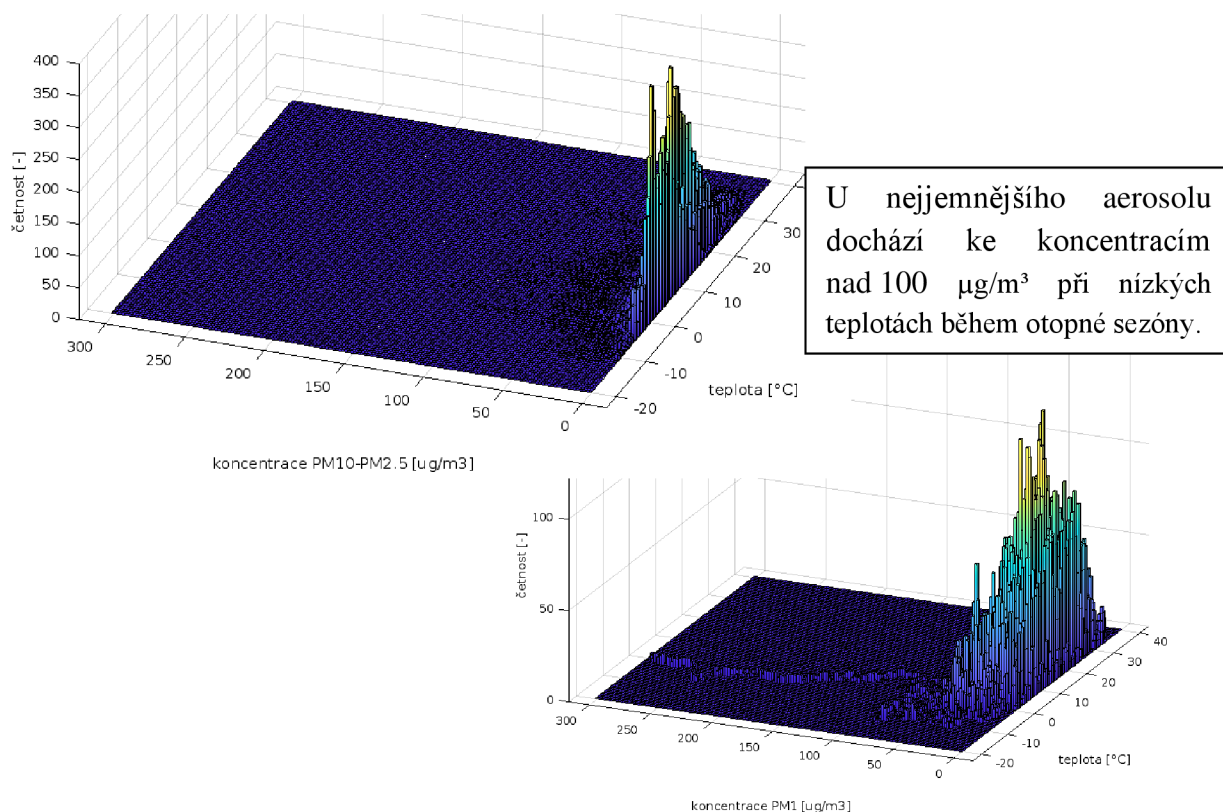
Z tabulky i následujícího grafu je patrná koncentrace částic v různých měsících a důležitost rozlišení jejich velikostní kategorie. Při porovnání hodnot koncentrací PM₁₀, tedy všech částic s průměrem menším než 10 µm vykazují téměř shodu měsíce srpen a listopad, při rozčlenění do velikostních tříd je již zřejmé, že v srpnu vznikl větší poměr částic větších průměrů (2,5-10 µm), které častěji pochází ze zdrojů přírodních a při mechanickém obrušování materiálu (například na stavbách). A porovnání koncentrací NO_x ve stejné tabulce v těchto měsících značí, že NO_x více koreluje s částicemi PM_{2,5}, případně PM₁, což potvrzují i grafy na následující stránce.



Obrázek 47: Graf koncentrací částic PM_1 (modře), $PM_{2,5}$ (modře a zeleně) a PM_{10} (celý sloupec).

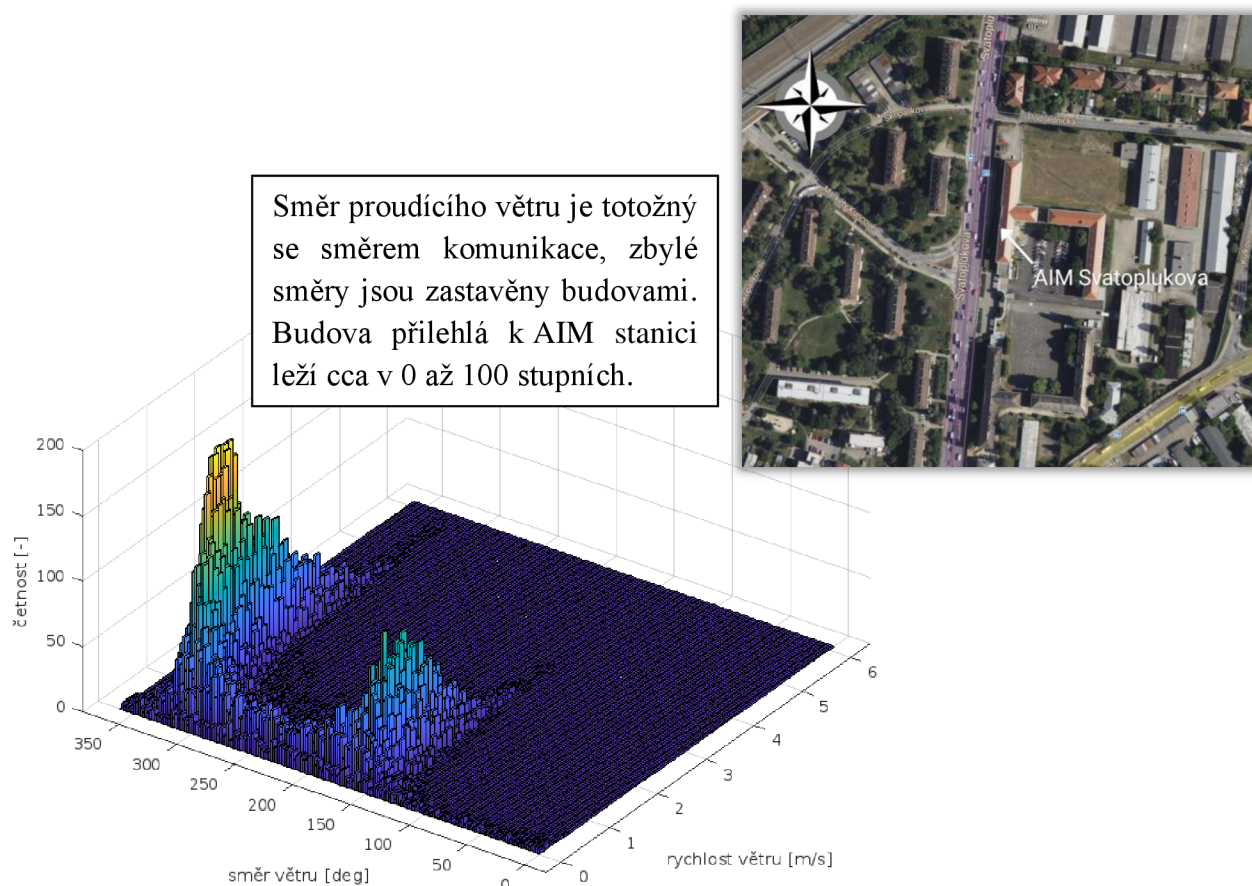
Vliv meteorologických podmínek na koncentrace PM

Koncentrace částic o průměru velikosti 2,5 až 10 μm mohou vznikat i při spalování fosilních paliv, ale dle grafu výše, vlevo, nelze vyvodit žádné informace o zvýšení koncentrací během topné sezóny, kdežto částice nejmenější, PM_1 , které zobrazuje obrázek vpravo, vznikají mimo jiné rovněž při spalování fosilních paliv a je jejich koncentrace v období topné sezóny zvýšena. Maximální hodnoty, které koncentrace nabývají, jsou dosaženy právě při nízkých teplotách okolního vzduchu. Je tedy z informací patrné, že většina částic, které jsou emitovány při vytápění patří do velikostních kategorií jemného aerosolu.



Obrázek 48: Grafy koncentrací částic $PM_{10-2,5}$ a PM_1 , teploty a četnosti měření.

Vliv směru větru a přilehlé budovy



Obrázek 49: Graf směru a rychlosti proudění větru v závislosti na četnosti měření a vpravo mapa automatické imisní monitorující stanice Svatoplukova se směrovou růžicí.

Směr proudění vzduchu určuje reliéf okolí a v tomto případě určuje proudění vzduchu přilehlá budova k měřicí stanici odkud nejsou zaznamenány žádné údaje, jedná se o ovlivnění směru od 0 do asi 120 stupňů. Na protější straně ulice se rovněž nachází stavby, nejsou již však v bezprostřední blízkosti ke stanici a i mezi budovami se nachází volný prostor, jedná se o směr od asi 170 do 270 stupňů. Nejčastěji vítr proudí podél hlavní silnice ulice Svatoplukova, čemuž odpovídají dvě hlavní oblasti grafu, častěji od severu, kdy dosahuje i vyšších hodnot než při proudění z jihu.

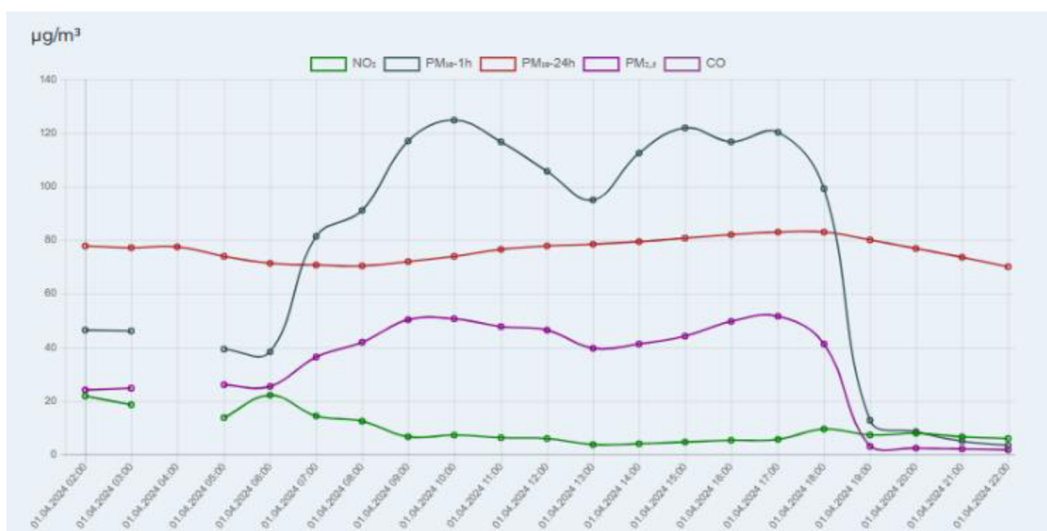
Naměřené hodnoty proudění na takto dopravně vytážených místech mohou být velmi silně ovlivněny projíždějícími automobily a zvířením znečištění i vzduchu jimi.

U stacionárních městských stanic obvykle přiléhá ke stanici nějaká stavba, případně se nachází v bezprostřední blízkosti, není tudíž účelné sestavování grafů závislostí koncentrací na směru větru pro případné označování zdrojů. Ve volné krajině by účelem mohlo být hledání primárního konkrétního zdroje z daného směru, případně určení nejčastějšího směru větru.

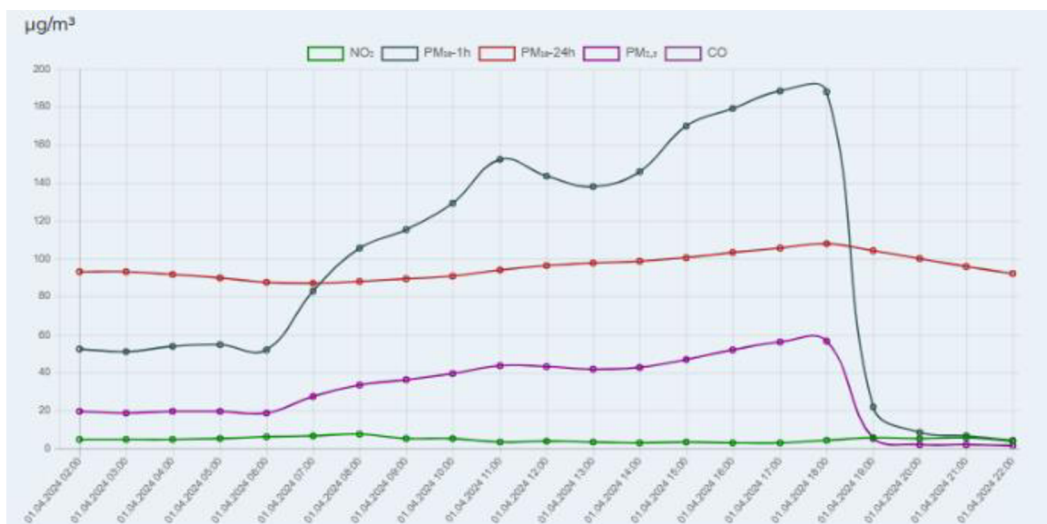
3.4.3 Stanice imisního monitoringu online, 2024, přímý vliv srážek

V datech automatického imisního monitoringu v Brně, ve veřejných online výsledcích měření, které jsou dostupné z webové stránky <http://www.brnenskeovzdusi.cz/monitoring-ovzdusi/> byly dohledány pro úplnost meteorologických podmínek dešťové srážky – mokrá depozice a vymývání částic.

Na snímcích se nachází výsledky měření koncentrací na stanici Arboretum a Komárov, v Brně. Jedná se o datum 1.4.2024, kdy než srážky kolem 20:00 započaly byla vyhlášena smogová situace z důvodu prachových částic ze Sahary. Hodnoty koncentrací prachových částic tedy byly nadprůměrné, během hodiny však klesly téměř k nule, jak je patrné z následujících grafů.



Obrázek 50: Vliv srážek, stanice Arboretum [46].



Obrázek 51: Vliv srážek, stanice Komárov [46].

3.4.4 Centrum dopravního výzkumu – lokality Česká a Kuřim, 2018

V roce 2018 bylo Jihomoravským krajem v zastoupení tehdejším hejtmánem JUDr. Bohumilem Šimkem zažádáno o měřicí kampaň znečištění ovzduší v lokalitách Kuřim a Česká, které jsou od sebe vzdáleny asi 3 km a nachází se v blízkosti Brna. Měření provedla společnost Centrum dopravního výzkumu pod vedením RNDr. Jiřího Hanzlíka. V této kapitole se nachází poznatky z naměřených hodnot během této kampaně, které jsou veřejně přístupné na portálu Jihomoravského kraje. [43]

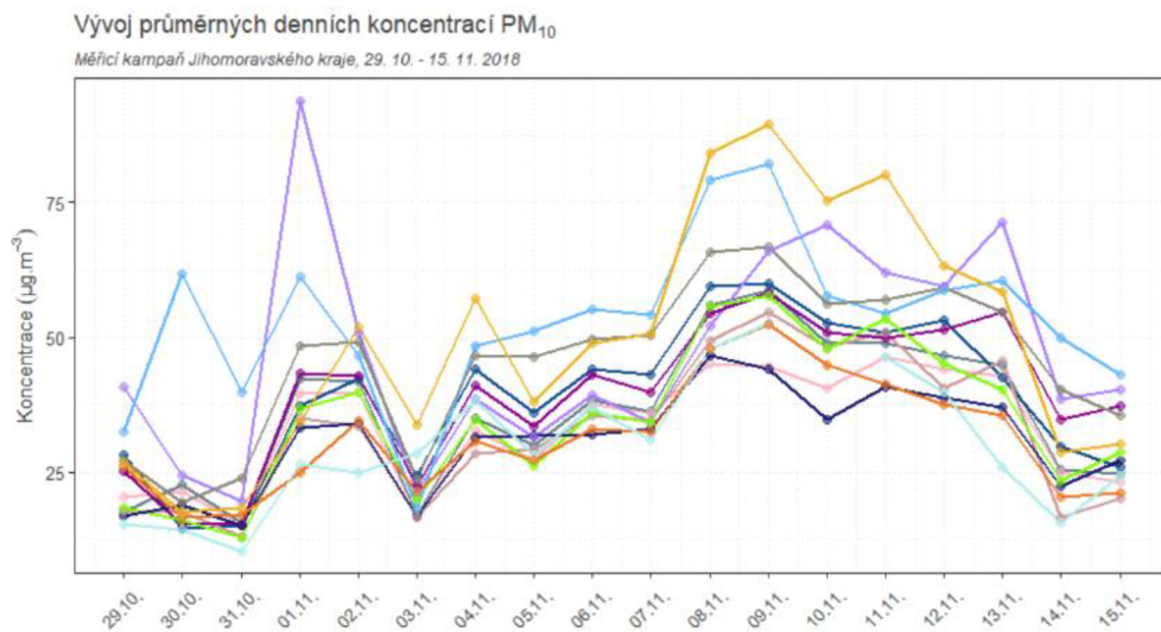
Měření v obou lokalitách proběhlo v těsné blízkosti silnice E461, v lokalitě Česká se jedná o úsek s nejčastěji plynulou jízdou a silnice leží na okraji obytné zóny. V lokalitě Kuřim probíhalo měření téměř ve středu města, na nejrušnější křižovatce, u které často dochází ke kolonám a je zde běžně i vícekrát během dne výrazně snížena plynulost provozu. [43]

V lokalitách byly měřeny koncentrace pevných částic a oxidů dusíku a mimo přístrojů na měření koncentrací látek v ovzduší byly použity i dopravní detektory – přístroje na měření charakteristiky dopravního proudu, které měřily intenzitu dopravy pomocí počtu vozidel a plynulost dopravy pomocí průměrné rychlosti. [43]

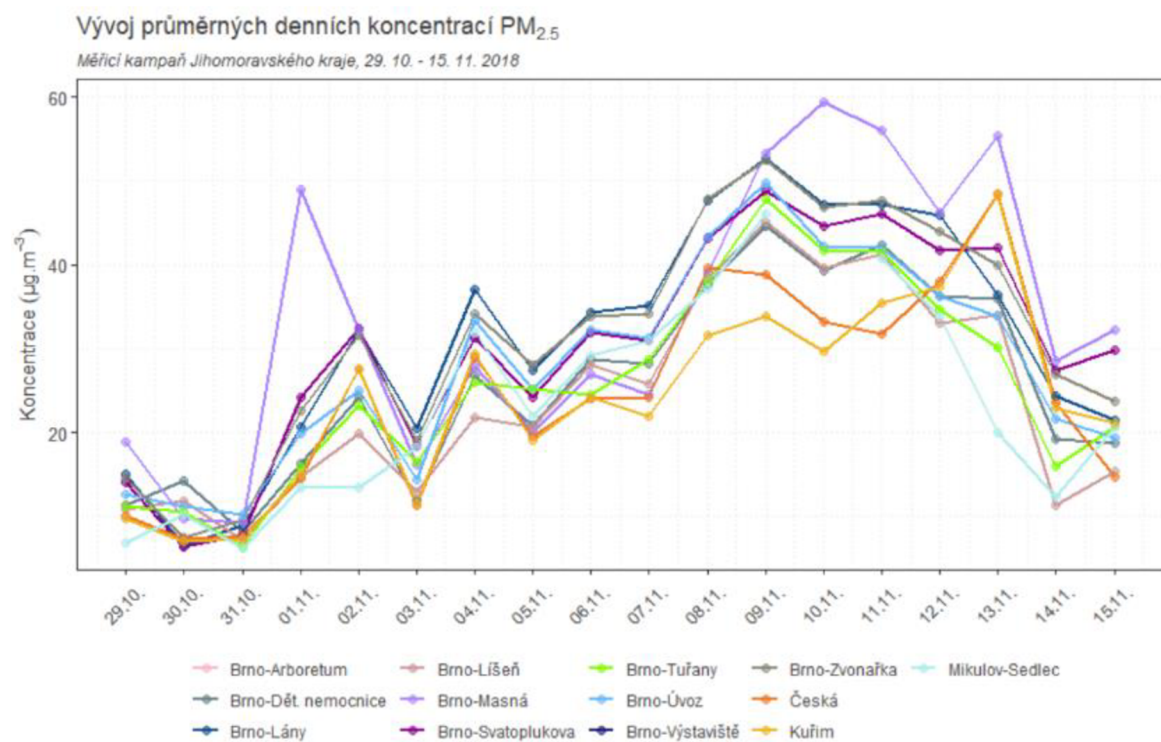
Na následující straně na dvou snímcích lze vidět srovnání těchto dvou mobilních stanic s dalšími brněnskými stanicemi ve shodném období, a to grafy koncentrací částic PM o velikosti 2,5 mikrometru a 10 mikrometrů.

U stanic Masná a Úvoz, při kterých lze sledovat největší odchylky od průměru, právě probíhala rekonstrukce vozovky, což stanice ve velké míře ovlivňuje. [43] Zbylé stanice vykazují velmi podobný trend, a to i přes velmi odlišné panující podmínky – rozdílné dopravní situace, blízkost a množství lokálních topenišť. Při měření koncentrací částic PM_{2,5} se trendy křivek vyznačují podobnějším průběhem ve srovnání s většími částicemi, což kooperuje s faktem, že menší částice mají nižší hmotnost, delší dobu trvá depozice, rozšíří se dále od primárního zdroje, případně vznikají sekundárně, a tak jsou hodnoty koncentrací podobné i na rozlehlých územích.

Výkyvy podobného trendu způsobují zřejmě meteorologické podmínky a velké zdroje znečištění.



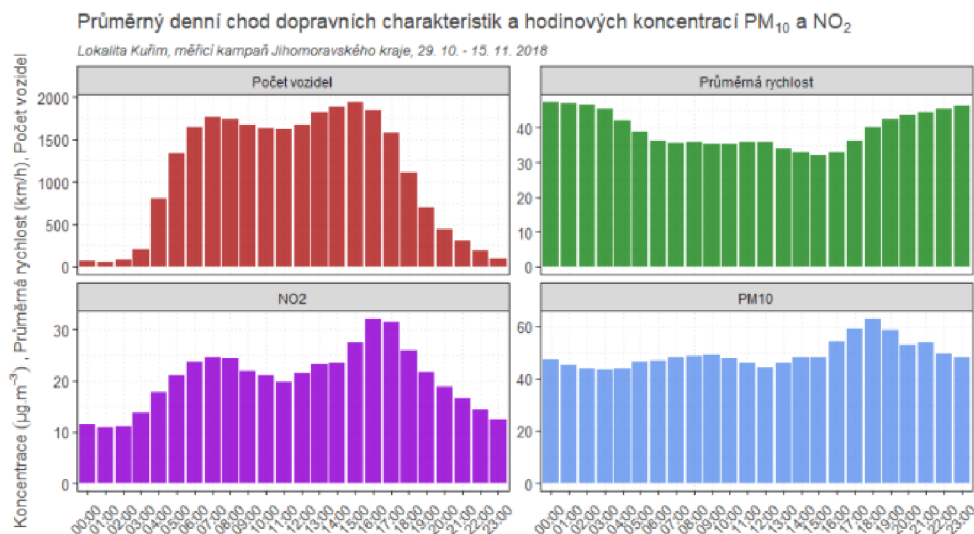
Obrázek 52: Vývoj denních koncentrací částic PM₁₀ [43].



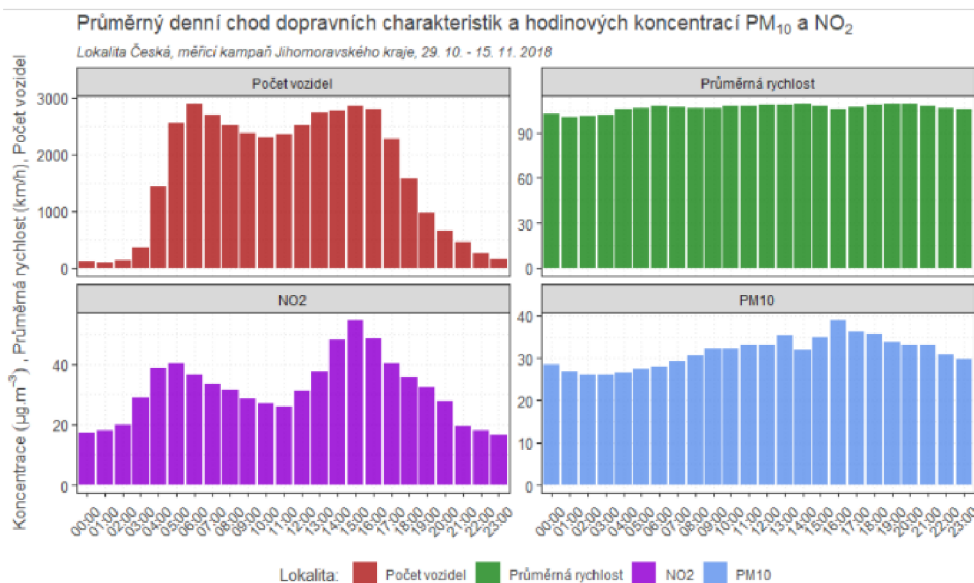
Obrázek 53: Vývoj denních koncentrací částic PM_{2,5} [43].

Porovnáním měření koncentrací s měřením dopravní charakteristiky lze zjistit, že s narůstající intenzitou dopravy, tedy počtem vozidel během dne narůstá koncentrace oxidu dusíku. Stejně tak lze pozorovat téměř shodnost doby druhého píku u koncentrací NO_2 s píkem u koncentrací částic PM_{10} . Navýšení druhého píku u koncentrací NO_2 proti prvnímu při shodné nebo podobné intenzitě dopravy zřejmě způsobuje vytápění, stejnětak jako zvýšenou koncentraci pevných částic.

V lokalitě Česká (dole) se téměř nemění průměrná rychlost vozidel, tudíž se jedná o plynulý provoz. V lokalitě Kuřim jde o provoz s nízkou plynulostí a tvorbou kolon. Mezi provozem vozidel a koncentrací částic PM není patrná žádná spojitost, koncentrace se zvyšuje v odpoledních a večerních hodinách, což v období měření – v topné sezóně, vypovídá zřejmě o tom, že se jedná o částice z vytápění domácností. Celkově vyšší koncentrace částic PM ve městě Kuřim jsou spojeny s horšími rozptylovými podmínkami (nižší rychlostí větru) a bezprostřední blízkostí domů.



Obrázek 54: Průměrný denní chod dopravních charakteristik a hodinových koncentrací NO_2 a PM_{10} , stanice Kuřim [43].



Obrázek 55: Průměrný denní chod dopravních charakteristik a hodinových koncentrací NO_2 a PM_{10} , stanice Česká [43].

3.4.5 Mimořádné události – požár Národního parku České Švýcarsko

Ode dne 24.7.2023 hořel požár lesa v Národním parku České Švýcarsko, který hořel několik dní. Zcela zahašen byl dne 12. srpna. Největší koncentrace částic byly zachyceny během prvních dvou dní požáru. Stanice imisního monitoringu zaznamenaly tento požár i na imisních stanicích v kraji Vysočina. V Jihomoravském kraji během záznamu na Vysočině přišlo, došlo tedy zřejmě k sedimentaci předtím, než kouřová vlečka mohla dorazit ke stanicím v tomto kraji. Bez srážek by se částice teoreticky mohly dostat i na mnohem větší vzdálenost od místa vzniku. [39]

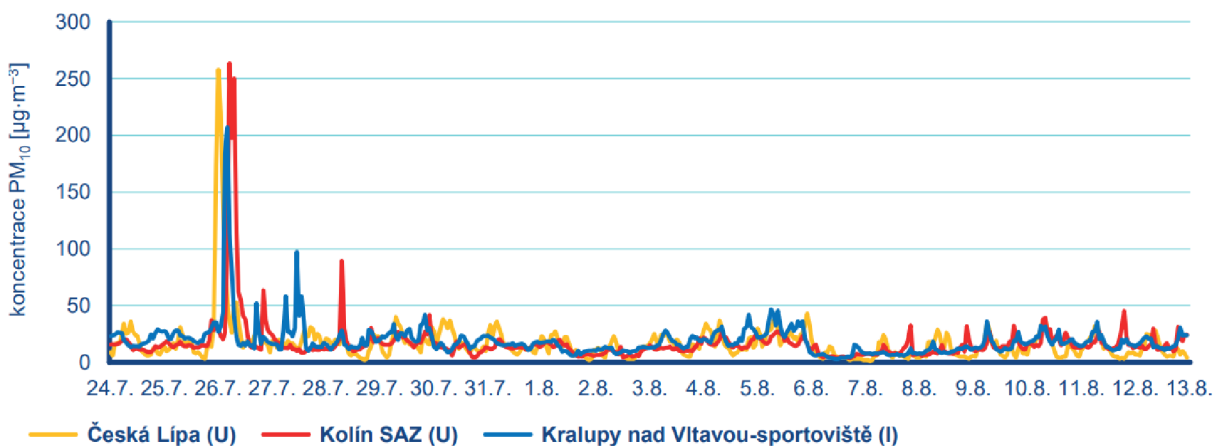
Požár zasáhl asi 1000 ha lesa, a to zejména z důvodu předchozích horkých a suchých dní a vysoké rychlosti větru. [39]

Dle odborníků z CAMS⁵ a GFED⁶ se většina emisí (80-90 %) uvolnila do ovzduší 25.7., a jejich hodnota tvořila až trojnásobek průměrné denní celorepublikové emise částic PM_{2,5}. Podle satelitního snímání uvedla společnost CAMS, že bylo uvolněno do ovzduší asi 240 tun tuhých látek, z čehož 140 tun tvořily částice PM_{2,5}. Údaje GFED se neshodují a uvádí násobně vyšší hodnoty, a to až 480 tun tuhých látek a 350 tun částic frakce PM_{2,5}. [39]

CAMS⁵ = global biomass burning emissions based on fire radiative power (GFAS) [39].

GFED⁶ = Global Fire Emissions Database [39].

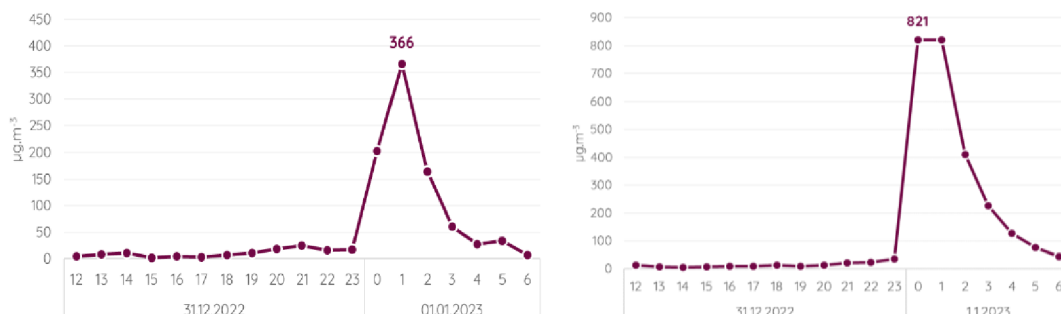
Nejvyšší koncentrace suspendovaných částic byly naměřeny v Kolíně, v České Lípě a v Kralupech nad Vltavou. [39] Průměrná hodnota dosahovala přes 200 µg/m³ proti v těchto dnech běžné hodnotě asi 20 µg/m³, tedy minimálně desetinásobku.



Obrázek 56: Zvýšení koncentrací částic PM během prvních dnů požáru [39].

3.4.6 Mimořádné události – ohňostroje

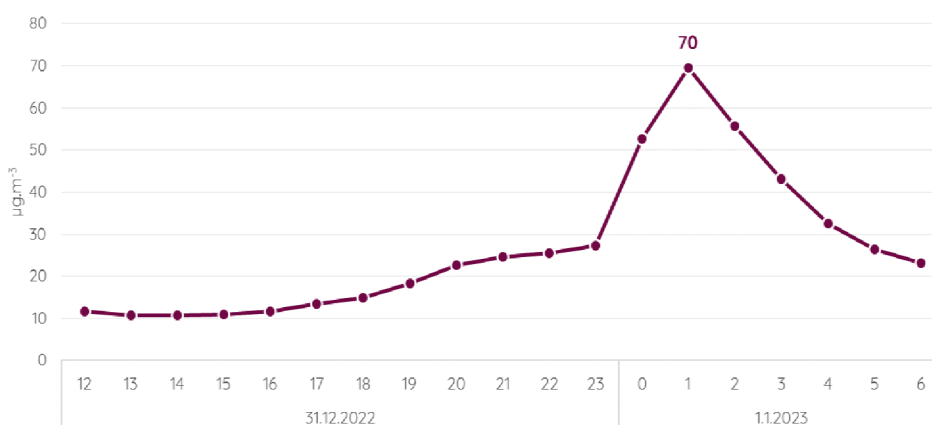
Obecně z analýzy z dat z celého roku je nejčastějším maximem přelom roku. Většinu let došlo k maximální roční koncentraci PM částic ohňostroji a novoročními oslavami.



Obrázek 57: Vlevo graf koncentrace částic PM₁₀ při ohňostrojích pro Prahu a vpravo pro Tábor [22].

Na grafech lze vidět, že v Praze (Vysočany) k maximální koncentraci 366 µg/m³ došlo mezi jednou a druhou hodinou ráno, se zpožděním od půlnoci, kdy ohňostroje vzniká obvykle největší množství. Trvalo tedy nějaký čas, než se kouřová vlečka dostala k měřicí stanici. Oproti tomu stanice imisního monitoringu v Táboře se nachází v centru města a maximum bylo dosaženo mezi dvanáctou a jednou hodinou ráno, což naznačuje ohňostroje v blízkosti stanice. Rovněž z těchto informací vyplývá, že lokální maxima ve velkých městech na náměstích, kde ohňostroje vznikají, mohou být extrémní, například v centru Brna nebo Prahy, tyto data bohužel nejsou k dispozici.

Mnohem menší mírou ovlivňují novoroční oslavy předměstské části, vesnice a lokality bez osídlení. Průměr všech stanic v České republice tak dosáhl maxima 70 µg/m³, vizte obrázek 58. [22]



Obrázek 58: Graf koncentrace částic PM₁₀, průměr všech 117 stanic [22].

Ohňostroje mimo své specifikum vysokých naměřených hodnot koncentrací obsahují i velké množství škodlivých látek, kdy každá barva obsahuje jiné prvkové složení, jež často zahrnuje kovové prvky i karcinogenní látky.

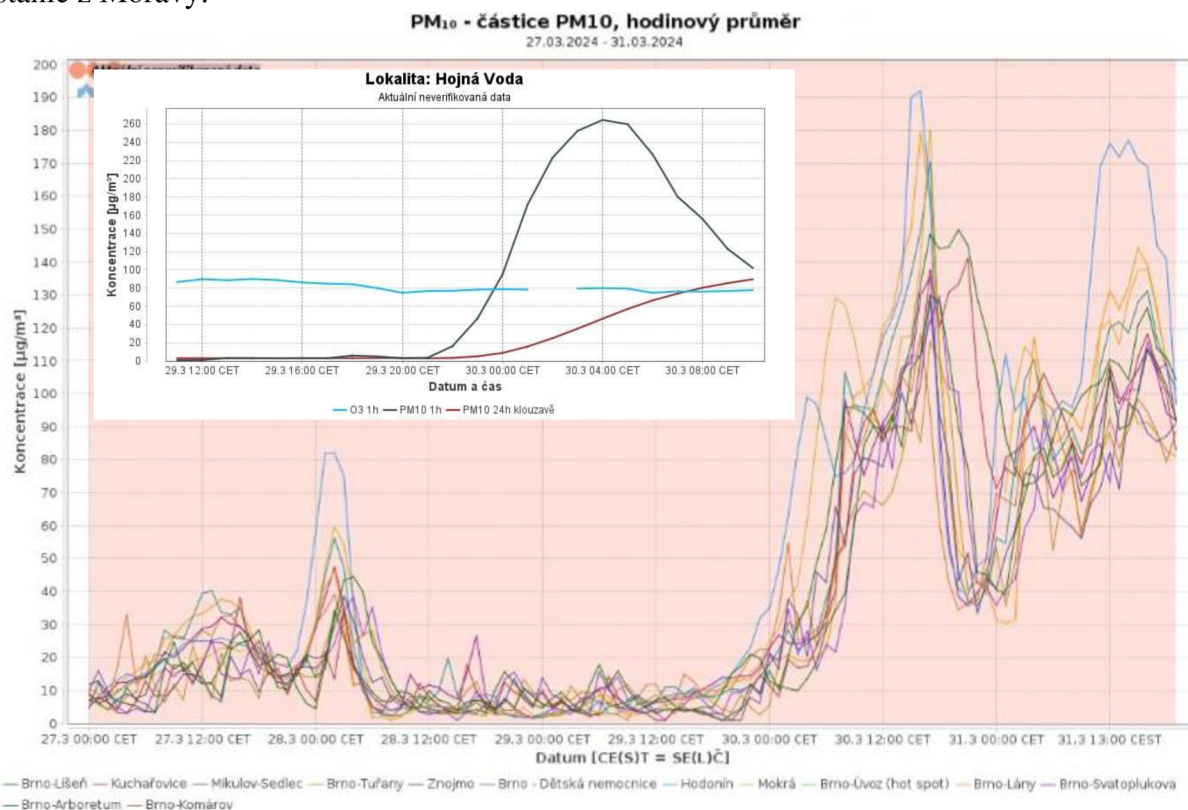
3.4.7 Mimořádné události – Saharský prach

Na den 30.3.2024 bylo meteorologickými stanicemi předpovězeno jasné počasí, ale od brzkých ranních hodin bylo téměř na celém území České republiky zataženo, a to díky proudícímu větru, který z africké pouště Sahary přes Iberský poloostrov a Francii směrem na sever a střední Evropu na území ČR přivál suspendované částice prachu. [44]



Obrázek 59: Fotografie ze dne 30.3.2024, hora Říp, se svolením fotografky paní Petry Krbcové.

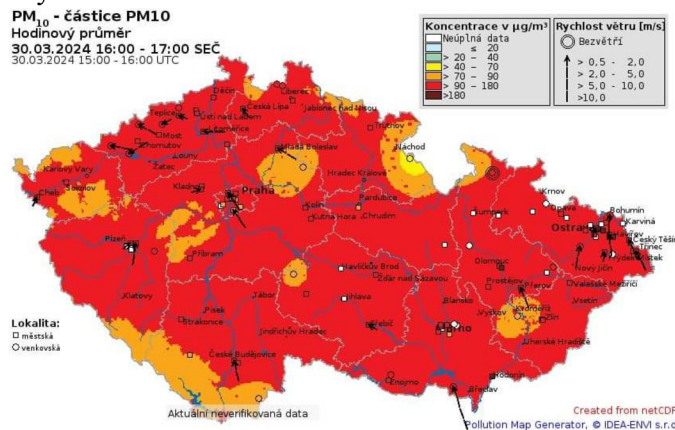
Suspendované částice přicházející k České republice z jihu byly zaznamenány nejdříve v nejvyšší míře v Jihočeském kraji, kde stanice imisního monitoringu v Hojně Vodě zaznamenala maximum ve čtyři hodiny ráno, kdy po šesti hodinách rostoucí tendence dosahovala hodnot přes $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a to potom kdy koncentrace částic PM_{10} byly téměř nulové. Na všech stanicích v ČR však byl nárůst koncentrací patrný, což dokazuje následující graf stanic z Moravy.



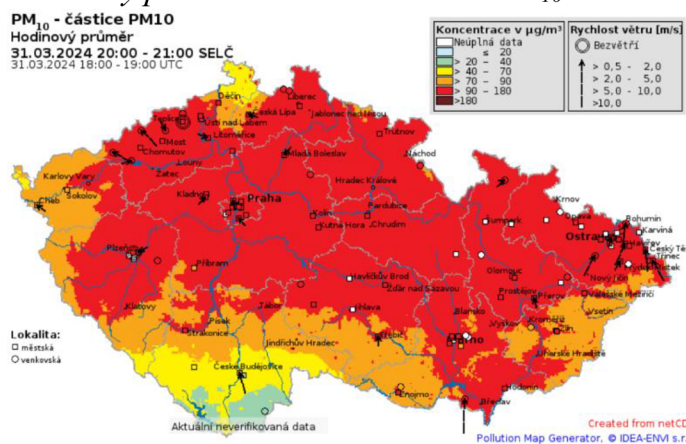
Obrázek 60: Graf hodinových průměrů koncentrací částic PM_{10} na Moravě od 27. do 31. března během prašnosti ze Sahary a graf z Hojné vody od 29. do 30. března [44].

Během odpoledních hodin, kdy došlo k mírné změně směru větru byla vyhlášena Českým hydrometeorologickým ústavem Smogová situace v Jihočeském kraji a v kraji Vysočina s prognózou možného rozšíření varování do Jihomoravského kraje. Téměř po celém území Česka byla koncentrace částic zvýšena proti běžným hodnotám, což dokazují následující obrázky. Jedná se o snímky z online monitoringu ovzduší ČHMÚ interpretované na webových stránkách ústavu www.chmi.cz.

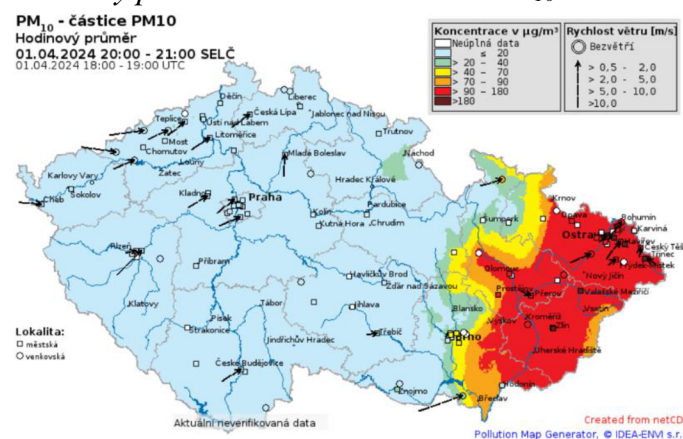
První snímek zobrazuje hodinový průměr koncentrace částic PM_{10} 30.3. v 16 hodin, druhý snímek je zachycený následující den, 31.3. ve 20 hodin a třetí snímek je pořízen 1.4. ve 20 hodin a zobrazuje, jak oblačnost obsahující prachové částice ze Sahary ustupuje z České republiky na východ.



Obrázek 61: Hodinový průměr koncentrace částic PM_{10} 30.3. v 16 hodin [45].



Obrázek 62: Hodinový průměr koncentrace částic PM_{10} 31.3. ve 20 hodin [45].



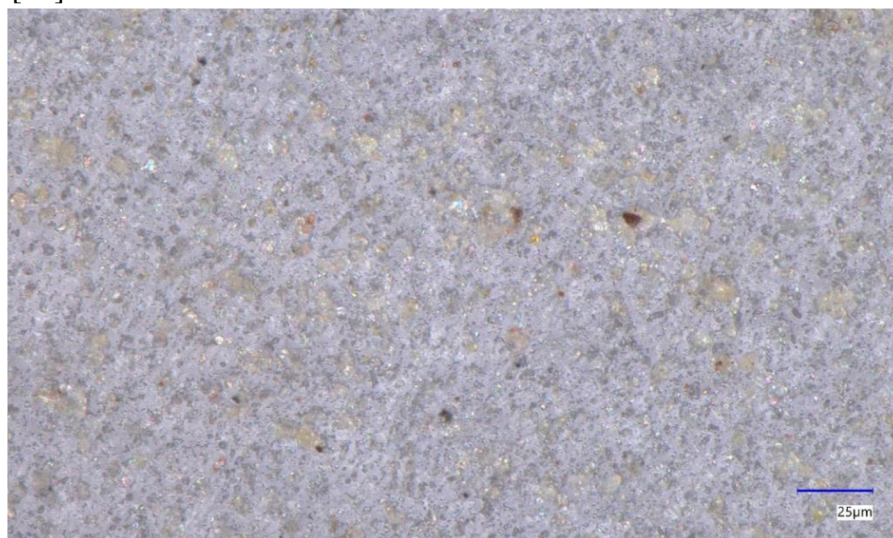
Obrázek 63: Hodinový průměr koncentrace částic PM_{10} 1.4. ve 20 hodin [45].

Dne 31.3., kdy dle monitoringu docházelo na území obce Železné vzdálené asi 25 km od Brna k vysokým oblačnostem díky Saharskému prachu, byl realizován odběr a následně byly částice zkoumány pod optickým mikroskopem.

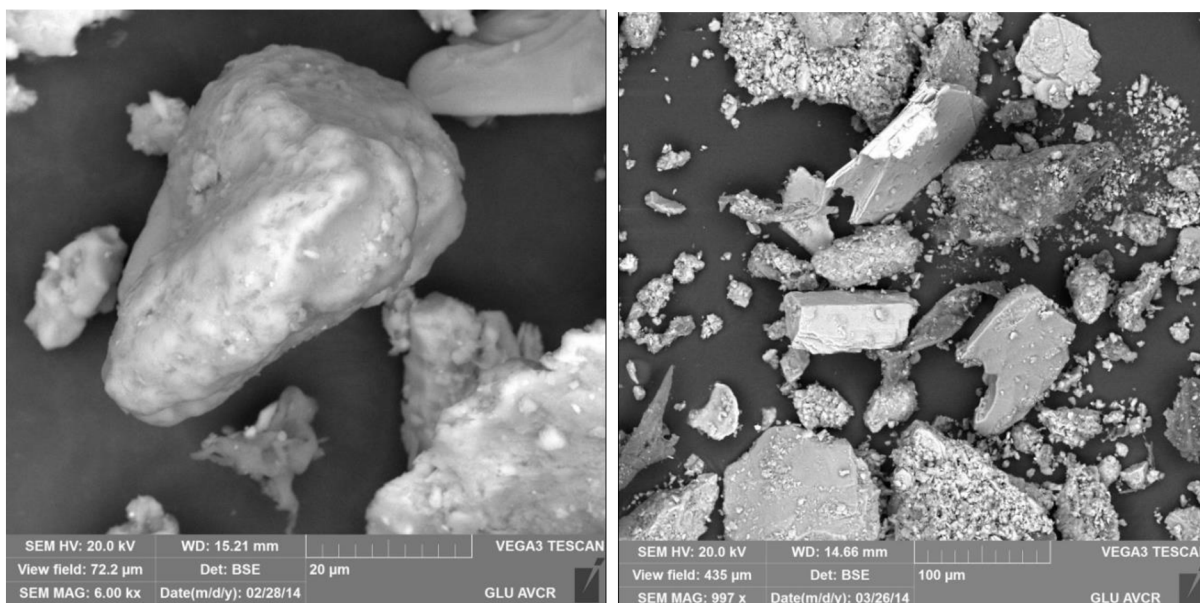
Maximální zvětšení a rozlišení v přijatelné kvalitě snímku při použití optického mikroskopu bylo dosaženo při prvním snímku, vizte níže. Lze pozorovat odlesky od krystalů.

Následně byly dohledány snímky z předchozích let, kdy se v České republice rovněž objevil Saharský písek (tato situace se opakuje každý rok i několikrát). Autorem snímků z elektronového mikroskopu je Geologický ústav Akademie věd ČR a jedná se o fotografie z roku 2014, z února. [42]

U těchto snímků proběhla prvková analýza. Na snímku z elektronového mikroskopu vlevo se nachází křemen. Snímek vpravo obsahuje rovněž částice křemene, živce, slídy a v agregátech jde pak o jemné krystalky kalcitu, jílových minerálů a železem bohatých minerálů (goethitu a hematitu). [42]



Obrázek 64: Snímek částic odebraných při zvýšené koncentraci PM_{10} Saharským prachem 31.3.2024.



Obrázek 65: Saharský písek, odběr 19. února 2014 v Praze a v Hradci Králové. Autor: Geologický ústav Akademie věd ČR [42].

3.5 Shrnutí výsledků analýzy imisního monitoringu

Analýzou dat z období celého roku, konkrétně z roku 2016 ze stanice imisního monitoringu Výstaviště a z roku 2019 ze stanice imisního monitoringu Svatoplukova byly určeny spojitosti a případné korelace mezi koncentrací prachových částic a různými meteorologickými jevy – rychlostí proudění větru, teplotou, směrem větru, relativní vlhkostí ovzduší. Rovněž byla analyzována koncentrace oxidů dusíku ve spojitosti s teplotou a rychlosti proudění větru a následně i možná spojitost mezi těmito dvěma koncentracemi.

Z výsledků lze pozorovat, že jsou koncentrace tuhých částic v nejvyšší míře ovlivňovány rychlostí proudění větru a teplotou, u které je patrné, že s klesající teplotou a tím nástupem otopného období narůstají koncentrace tuhých znečišťujících látek. Vliv rychlosti proudění větru je z pohledu výsledků analýzy nejmocnější faktor pro změnu koncentrace látek – k maximálním naměřeným hodnotám koncentrací docházelo zpravidla při rychlostech větru pod 2 m/s.

Vysoké hodnoty koncentrací oxidů dusíku mnohem více korelují s otopnou sezónou, stejně tak jako tomu je u prachových částic menších frakcí – PM₁. Přestože v některých případech tyto dvě látky pochází ze stejného zdroje a jsou ovlivňovány stejnými meteorologickými podmínkami, mezi koncentracemi pevných částic a oxidů dusíku není ve zvolených datech zřejmá vazba. Při velmi vysokých koncentracích pevných částic byly při většině měření naměřeny velmi nízké koncentrace oxidů dusíku, i naopak.

Pro kompletaci častých meteorologických jevů zachycuje třetí podkapitola monitoring během mokré depozice – srážek, a to při předchozí vyhlášené smogové situaci. I přes tento fakt hodnoty koncentrací k 200 µg/m³ pevných částic během hodiny klesly k nulovým hodnotám.

Následujícím rozbohem bylo specifické měření v lokacích Kuřim a Česká, které jsou srovnávány s ostatními stanicemi monitoringu v Brně, a rovněž v těchto lokacích došlo k dopravnímu měření a koncentrace pevných částic i oxidů dusíku byly porovnány nejen s intenzitou dopravy, ale i s průměrnou rychlostí vozidel. Při porovnání trendů koncentrací pevných látek všech stanic lze pozorovat velké podobnosti i přes velké rozdíly mezi lokacemi – stanice předměstské i dopravní uzly. Podobnější trend lze pozorovat u částic menší frakce, PM_{2,5}, kdy lze tento jev propojit s faktem, že jemná frakce částic zůstává v ovzduší delší časový interval, dostává se do větších vzdáleností od primárních zdrojů a vytváří tzv. stabilní aerosol.

Po těchto analýzách z dlouhodobých dat vytvořených v průměrné hodnoty byla zaměřena pozornost na tři mimořádné události, které měly za následek velké výkyvy koncentrací pevných částic. Jedná se o jeden z největších požárů lesa, který se konal v České republice v červenci v roce 2023 v Národním parku České Švýcarsko, kdy hodnoty koncentrací prachových částic dosahovaly na nejbližších stanicích i desetinásobných zvětšení a kouřová vlečka se objevila i na stanicích, které jsou vzdáleny od místa zdroje částic i přes 100 km – na stanicích imisního monitoringu v kraji Vysočina. Další rozbor byl uskutečněn v období přelomu roku, kdy se jedná dlouhodobě o nejčastější roční maxima koncentrací částic a mají je za následek novoroční ohňostroje. Na přelomu roku 2022 a 2023 byly naměřeny nejvyšší hodnoty ve městě Tábor, ve kterém se nachází stanice imisního monitoringu velmi blízko náměstí, na kterém se konají časté novoroční oslavy a hodnota koncentrace částic při této stanici dosahovala přes 800 µg/m³. Třetí rozbor byl proveden při vyhlášené smogové situaci na území celé České republiky na základě zvýšení koncentrací částicemi pocházejících z africké Sahary, kdy se běžně tato situace opakuje i několikrát do roku. Byl v těchto dnech uskutečněn i odběr částic, jenž byl následně zařazen i do přílohy této diplomové práce – Katalogu prachových částic.

ZÁVĚR

Polétavý prach je téma, které se týká každého jedince a prokazatelně ovlivňuje jeho zdraví. Problematika znečištění bude vždy aktuální, protože nelze dosáhnout nulových hodnot koncentrací. Částice, které se v ovzduší nachází jsou přírodního nebo antropogenního původu, případně se jedná o částice sekundární, které vznikly procesy v ovzduší nebo byly resuspendovány.

V první části této práce je rešeršně představena problematika aerosolových částic přítomných v ovzduší. Nachází se zde kapitola uvádějící původ částic, nejvýznamnější antropogenní zdroje, resuspenzi, vlivy látek nacházejících se v ovzduší na zdraví člověka a stanoviska jež jsou uvedeny v legislativě České republiky.

Druhá část pojednává o experimentu, který byl v rámci této diplomové práce realizován. Kapitola začíná popisem experimentu, kdy došlo k odběru částic, jejich zkoumání pod mikroskopy a k měření koncentrací pevných částic. Prvořadě proběhl popis použitých přístrojů, následovaly emisní odběry, tedy odběry přímo u zdrojů znečištění, které byly zařazeny s popisem morfologie, velikostí a dalších dostupných vlastností do první přílohy této práce s názvem Katalog polétavého prachu. Následně proběhly i odběry imisní s měřením koncentrací částic, a to ve třech vybraných lokalitách – v obci, ve městě a v rodinném domě.

Třetí část navazuje na vyhodnocení experimentu a porovnání koncentrací částic, kdy během diplomové práce nevzniklo a ani nemohlo vzniknout dostatečné množství dat k vyhodnocení rozdílů koncentrací v různých lokalitách a k parametrům jež koncentrace ovlivňují. Tato část je analytická, a jedná se o rozbor dostupných dlouhodobých dat ze stanic imisního monitoringu. Obsahuje grafy závislosti koncentrací částic a různých meteorologických jevů – směru a rychlosti proudění větru, teploty, relativní vlhkosti. Rovněž se zde nachází grafy závislosti oxidů dusíku na teplotě a rychlosti proudění větru, které pochází velmi často ze stejných zdrojů jako pevné částice a graf závislosti koncentrací těchto dvou látek. Poslední podkapitoly této části zahrnují specifické události spojené s vysokými hodnotami koncentrací pevných látek jako jsou ohňostroje nebo dosud jeden z největších lesních požárů, které se v České republice udály, a to požár v Národním parku České Švýcarsko v červenci v roce 2023.

Tato práce přibližuje problematiku polétavého prachu, popisuje částice z různých zdrojů a popisuje jejich morfolologii a další dostupné vlastnosti a analyticky rozebírá koncentrace částic během roku a jejich změny hodnot v závislosti na meteorologických jevech.

Znečištění ovzduší prokazatelně negativně ovlivňuje zdraví každého člověka, a tak by mělo být cílem každého člověka, aby co nejnižší množství znečištění vytvářel. Nejúčinnější obrany proti znečištění se obvykle instalují přímo u zdrojů nebo se jedná o jejich samostatnou modernizaci, ale ve velkých městech jako je Rotterdam nebo Peking přibývá i instalací čističek vzduchu velikostí odpovídající patrovým domům. Trendem posledních let je snižování znečištění ovzduší a jako autorka této diplomové práce doufám, že pro zdraví každého jedince tento trend setrvá do dosažení doporučených hodnot.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Aerodynamický průměr částice. Online. S. 2.3.2. Dostupné z: <https://www.nlfnorm.cz/terminologicky-slovník/51615#:~:text=2.3.2%20aerodynamick%C3%BD%20pr%C5%AFm%C4%9B%20%C4%8D%C3%A1stice%20pr%C5%AFm%C4%9B%20koule%20o%20hustot%C4%9B,%C4%8D%C3%A1stice%20z%C3%A1vis%C3%AD%20na%20velikosti%2C%20hustot%C4%9B%20a%20tvaru%20%C4%8D%C3%A1stice..> [cit. 2024-10-12].
- [2] Exkurze do světa atmosférického aerosolu. Online. S. 2. Dostupné z: <https://www.icpf.cas.cz/exkurze-do-sveta-atmosferickeho-aerosolu/>. [cit. 2024-10-20].
- [3] Suspendované částice (PM) – otázky a odpovědi. Online. S. 1. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/12/01/suspendovane-castice-pm-otazky-a-odpovedi/>. [cit. 2024-10-25].
- [4] Co jsou to částice PM10 a proč se vůbec měří? Online. S. 1. Dostupné z: <https://www.novyjicin.cz/co-jsou-to-castice-pm10-a-proc-se-vubec-meri/>. [cit. 2024-10-25].
- [5] BRONCHUS, NORMAL CILIA, SEM. Online. S. 1. Dostupné z: <https://www.sciencesource.com/archive/Bronchus--normal-cilia--SEM-SS2872246.html>. [cit. 2024-10-26].
- [6] Polétavý prach – PM. Online. S. 1. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/poletavy-prach-pm>. [cit. 2024-10-30].
- [7] KRÁTKÝ, Š. Porovnání vodní dýmky, elektronických cigaret a klasických cigaret z hlediska emitovaných částic. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Lízal, Ph.D.
- [8] Nebezpečí polétavého prachu. Online. S. 1. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/5BC8D18C9B814A6EC125772E00539B7A/\\$file/OVV-poletavy_prach-20100525.pdf](https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/5BC8D18C9B814A6EC125772E00539B7A/$file/OVV-poletavy_prach-20100525.pdf). [cit. 2023-10-30].
- [9] ODHAD ZDRAVOTNÍCH RIZIK ZE ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ ČESKÁ REPUBLIKA – ROK 2022. Online. S. 1. Dostupné z: Státní zdravotní ústav, https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fszu.cz%2Fwp-content%2Fuploads%2F2023%2F10%2Frizika_cr_2022.docx&wdOrigin=BROWSELINK. [cit. 2023-10-30].
- [10] POLÉTAVÝ PRACH (PM10). Online. S. 1. Dostupné z: Státní zdravotní ústav, https://www.irz.cz/latky-v-irz/poletavy-prach-pm10#field_content_zakladni_informace. [cit. 2023-11-1].
- [11] Nikl. Online. S. 1. Dostupné z: Státní zdravotní ústav, <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/nikl>. [cit. 2023-11-05].
- [12] Kadmium a sloučeniny. Online. S. 1. Dostupné z: Státní zdravotní ústav, <https://www.irz.cz/latky-v-irz/kadmium-a-slouceniny-jako-cd>. [cit. 2023-10-11].

- [13] RnDr. PRETEL, Jan. Předpoklady výskytu zvýšené sekundární prašnosti. Online. 2001. Dostupné také z: https://web.archive.org/web/20200714082051/http://envis.praha-mesto.cz/rocnky/DZ_OO/pril_practexty/BK14/SekPrasnost.pdf. [cit. 2023-10-11].
- [14] Podlahový vysavač · SVC216FR. Online. S. 1. Dostupné z: <https://cz.gorenje.com/spotrebiice/domaci-a-osobni-pece-/vysavace-a-parnicistice/VACUUM-CLEANER-SVC216FR-GOR/p/000000000000568211>. [cit. 2023-11-16].
- [15] Zdroje znečišťování ovzduší. Online. 2023. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/zdroje_znecistovani_ovzdusi. [cit. 2024-05-17].
- [16] ČIŠTĚNÍ KOMUNIKACÍ. Online. S. 1. Dostupné z: <https://www.smsk.cz/index.php/udrzba-silnic/cisteni-komunikaci>. [cit. 2023-11-28].
- [17] Typy a klasifikace stanic imisního monitoringu. Online. S. 1. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/11/25/typy-stanic-imisniho-monitoringu/#stanice%20Imisn%C3%ADho%20monitoringu%20V%20Brn%C4%9B>. [cit. 2023-12-02].
- [18] Stanice imisního monitoringu v Brně. Online. S. 1. Dostupné z: <https://www.infoviz.cz/graphic.php?ID=240>. [cit. 2023-12-02].
- [19] LETIŠTĚ BRNO HLÁSÍ ZA LOŇSKÝ ROK TĚMĚŘ 472 TISÍC ODBAVENÝCH CESTUJÍCÍCH. LETOS OČEKÁVÁ SILNOU SEZÓNU I DÍKY ROZŠÍŘENÉ NABÍDCE NOVÝCH SEZÓNŇÍCH DESTINACÍ A DALŠÍ PRAVIDELNÉ LINCE. Online. S. 1. Dostupné z: <https://www.brno-airport.cz/letiste/tiskove-zpravy/letiste-brno-hlasi-za-lonsky-rok-temer-472-tisic-odbavenych-cestujicich-letos-ocekava-silnou-sezonu/>. [cit. 2024-01-22].
- [20] Charakteristika okresu Okres Brno – město tvo. Online. S. 1. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/13-6224-03-2001-1_charakteristika_okresu_a_vyvoj_sidelni_struktury. [cit. 2024-01-22].
- [21] Historie ovzduší. Online. S. 1. Dostupné z: <https://www.brnenskeovzdusi.cz/historie/>. [cit. 2024-01-23].
- [22] Geografické údaje a obyvatelstvo. Online. S. 1. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20110523092746/http://www2.brno.cz/index.php?nav01=2222&nav02=8>. [cit. 2024-01-23].
- [23] BRZEZINA, Jáchym. Ohňostroje a kvalita ovzduší na přelomu let 2022/23 [online]. 1 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2023/01/02/ohnostroje-a-kvalita-ovzdusi-na-prelomu-let-2022-23/>
- [24] Vlhkost vzduchu [online]. 1 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/Gemet/meteo2/vlhkost.htm>
- [25] Zákon č. 201/2012 Sb.: Zákon o ochraně ovzduší. Online. In: *Zákony pro lidi*. © AION CS, s.r.o. 2010–2024 | Pracuje na systému AToM3. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>. [cit. 2024-02-20].

- [26] Vznik prachových částic a dýmů při svařování: Strojírenství. Online. CB Media. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/zvaranie/5242-vznik-prachovych-castic-a-dymu-pri-svarovani>. [cit. 2024-02-20].
- [27] Elektronová mikroskopie transmisní a rastrovací. Online. Dostupné z: https://jointlab.upol.cz/soubusta/OSYS/El_mikr/El_mikr.html. [cit. 2024-02-20].
- [28] Optical Particle Sizer (OPS) 3330 TSI. Online. 2024. Dostupné z: [https://tsi.com/products/particle-sizers/supramicron-capable-particle-sizer-spectrometers/optical-particle-sizer-\(ops\)-3330/](https://tsi.com/products/particle-sizers/supramicron-capable-particle-sizer-spectrometers/optical-particle-sizer-(ops)-3330/). [cit. 2024-05-17].
- [29] Digital Microscope: VHX-7000 series. Online. In: . Dostupné z: <https://www.keyence.com.my/products/microscope/digital-microscope/vhx-7000/>. [cit. 2024-02-20].
- [30] Světová zdravotnická organizace (WHO). Online. In: . Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR. Dostupné z: <https://www.uzis.cz/index.php?pg=o-nas--spoluprace--who>. [cit. 2024-03-12].
- [31] CHOPN: co to je?: Chronická obstrukční plicní nemoc. Online. In: Národní zdravotnický informační portál. ISSN ISSN 2695-0340. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/clanek/1102-chopn-co-to-je>. [cit. 2024-03-12].
- [32] Ozon: Odpovědi na nejčastější otázky. Online. In: *Státní zdravotní ústav*. Státní zdravotní ústav, 2024. Dostupné z: <https://szu.cz/temata-zdravi-a-bezpecnosti/zivotni-prostredi/ovzdusi/venkovni-ovzdusi/ozon/#:~:text=Ozon%20pat%C5%99%C3%AD%20mezi%20dr%C3%A1%C5%BEdiv%C3%A9%20l%C3%A1tky%2C%20jeho%20%C3%BA%C4%8Dinky%20miz%C3%AD,i%20tlak%20na%20hrudi%2C%20ka%C5%A1el%20a%20bolesti%20hlavy..> [cit. 2024-03-15].
- [33] Kvalita ovzduší: Co dělá EU pro snížení znečištění? Online. In: *Evropský parlament*. Praha, 2024. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20230822STO04226/kvalita-ovzdusi-co-dela-eu-pro-snizeni-znecisteni#:~:text=Oxid%20dusi%C4%8Dit%C3%BD%20Jedn%C3%A1%20se%20o%20chemickou%20slou%C4%8Deninu%20vznikaj%C3%ADc%C3%AD,2020%2049%20000%20p%C5%99ed%C4%8Dasn%C3%BDch%20%C3%BAmrt%C3%AD%20v%20EU.%20Ozon>. [cit. 2024-03-15].
- [34] Oxid siřičitý: Charakteristika. Online. FÉR potravina, 2024. Dostupné z: <https://www.ferpotravina.cz/seznam-ecek/E220#:~:text=Oxid%20si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD%20je%20jedovat%C3%BD%20a%20vysoce%20dr%C3%A1%C5%BEdiv%C3%BD%2C%20%C4%8Dasto,si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD%20je%20antioxidant%2C%20konzervant%20a%20prost%C5%99edek%20proti%20hn%C4%9Bdnut%C3%AD..> [cit. 2024-03-15].
- [35] IV.7 Oxid siřičitý (SO₂). Online. *Znečištěné ovzduší na území České republiky v roce 2020*. 2021. Dostupné z: <https://info.chmi.cz/rocnka/ko2020/4-7.php>. [cit. 2024-03-15].

- [36] NOVÁ METODA STANOVENÍ PAU V OVZDUŠÍ. Online. 2013. Dostupné z: https://www.alsglobal.cz/zivotni-prostredi/aktuality/Nova-metoda-stanoveni-PAU-v-ovzdusi_1518. [cit. 2024-03-15].
- [37] SCHREIBEROVÁ, Markéta; ŠKÁCHALOVÁ, Hana; BRZEZINA, Jáchym a NOVÁK, Václav. Benzo[a]pyren a benzen. Online. *Kvalita ovzduší na území ČR v roce 2022*. Dostupné z: https://info.chmi.cz/zpravy/UKO_MIM2022/. [cit. 2024-03-15].
- [38] Návrh. Online. *Zákony pro lidi*. 2007. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/disk/cs/file/2007/2007c111z0361p003.pdf>. [cit. 2024-03-15].
- [39] Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2022. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/22groc/gr22cz/>. [cit. 2024-03-20].
- [40] Základní údaje podle částí obce vybraného SO ORP. Online. *Veřejná databáze*. 2024. Dostupné z: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&z=T&f=TABULKA&skupId=4690&filtr=G%7EF_M%7EF_Z%7EF_R%7EF_P%7E_S%7E_U%7E301-501-401-202-411_null_&katalog=33475&pvo=SLD21043-CO&pvo=SLD21043-CO&pvokc=65&pvoch=6217. [cit. 2024-03-20].
- [41] Focused Ion Beam/Scanning Electron Microscope TESCAN LYRA3 (LYRA). Online. *Veřejná databáze*. 2024. Dostupné z: <https://nano.ceitec.cz/focused-ion-beam-scanning-electron-microscope-tescan-lyra3-lyra/>. [cit. 2024-03-20].
- [42] Saharský prach dorazil, ale bylo ho mnohem méně než v únoru. Online. *IDnes*. 2014. Dostupné z: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/saharsky-prach-dorazil.A140407_120552_domaci_cen. [cit. 2024-03-20].
- [43] HUZLÍK, Jiří; SKERŠIL, Robert; LIČBITSKÝ, Roman a EFFENBERGR, Karel. SOUHRNNÁ ZPRÁVA: Měření kvality ovzduší v lokalitách Česká a Kuřim. Online. S. 74. Dostupné z: *Portál Jihomoravského kraje – OŽP Odbor životního prostředí (kr-jihomoravsky.cz)* [cit. 2024-04-16].
- [44] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Data AIM v grafech*. Online. Dostupné z: <http://pr-asu.chmi.cz:8080/IskoAimDataView/faces/viewChart.xhtml>. [cit. 2024-04-01].
- [45] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Mapy znečištění ovzduší*. Online. Dostupné z: <http://pr-asu.chmi.cz:8080/IskoPollutionMapView/faces/viewMapImages.xhtml>. [cit. 2024-4-1].
- [46] Monitoring ovzduší. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.brnskeovzdusi.cz/monitoring-ovzdusi/>. [cit. 2024-05-17].
- [47] POSPÍŠIL, Jiří. *Numerické modelování transportu suspendovaných částic generovaných silniční dopravou: zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2007. ISBN 978-80-214-3355-7. Dostupné online z: <https://docplayer.cz/44399108-Numericke-modelovani-transportu-suspendovanych-castic-generovanych-silnicni-dopravou.html> [cit. 2024-05-20].

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A JEDNOTEK

<u>Veličina</u>	<u>značka</u>	<u>jednotka</u>
Délka	l	μm nm cm km
Hmotnost	m	mg kg t
Objem	V	l
Hustota	ρ	g ¹ cm ⁻³
Teplota	T	° C
Čas	t	s min
Elektrické napětí	U	V
Výkon	P	W kW
Rychlost	v	m ¹ s ⁻¹ km ¹ h ⁻¹
Průtok	Q	l ¹ s ⁻¹ l ¹ min ⁻¹
Koncentrace hmotnostní	C	ng ¹ m ⁻³ μg ¹ m ⁻³ mg ¹ m ⁻³
Koncentrace početní	C _n	cm ⁻³
Akustický hluk, hlučnost	L _p	dB(A)
Počet impulzů	N _i	cm ⁻³
Rychlost průtoku vzorky	Q _n	cm ³ s ⁻¹
Čas vzorkování	t _s	s
Faktor korekce mrtvého času	DTC	-
Mrtvý čas	t _d	s
Hmotnostní procenta	w	%
Relativní vlhkost	φ	%
Směr větru	α	Deg, °
Počet vozidel	n	-

SEZNAM OBRÁZKŮ

	<u>zdroj</u>	<u>strana</u>
Obrázek 1: <i>Koncentrace částic v závislosti na velikosti, velikostní kategorie.</i>	[2]	10
Obrázek 2: <i>Zdroje částic PM₁₀ dle sektorů, údaje z CHMI.</i>	[39]	12
Obrázek 3: <i>Zdroje částic PM_{2,5} dle sektorů, údaje z CHMI.</i>	[39]	12
Obrázek 4: <i>Podíl částic zviřených prouděním vzduchu nad travnatým povrchem.</i>	[13]	13
Obrázek 5: <i>Bronchus, cylindrický řasinkový epitel typický pro dýchací soustavu.</i>	[5]	14
Obrázek 6: <i>Porovnání průběhu počtu částic a hmotnostní koncentrace.</i>	[26]	19
Obrázek 7: <i>Optical particle sizer (OPS).</i>	[28]	20
Obrázek 8: <i>Nádoby s filtry s odebranými vzorky.</i>	[-]	20
Obrázek 9: <i>Gorenje SVC216FR, Cyclonic, 2v1.</i>	[14]	21
Obrázek 10: <i>Senzor průtoku vzduchu.</i>	[-]	21
Obrázek 11: <i>Mikroskop Keyence VHX-7000.</i>	[29]	22
Obrázek 12: <i>CEITEC, rastrovací elektronový mikroskop Tescan Lyra3.</i>	[41]	23
Obrázek 13: <i>Popel z dílenských kamen, dřevěný zbytek a přesycený filtr s úletem z komínu.</i>	[-]	24
Obrázek 14: <i>Úlet z komínu z dílenských kamen, okraj a střed filtru.</i>	[-]	24
Obrázek 15: <i>Úlet z komínu z dílenských kamen, střed filtru a netypická částice a nejčastější kulové částice.</i>	[-]	25
Obrázek 16: <i>Úlet z komínu z dílenských kamen, netypická částice pod optickým a elektronovým mikroskopem.</i>	[-]	26
Obrázek 17: <i>Prvkový rozbor netypické částice z úletu z komínu – C, Ca a Cl.</i>	[-]	26
Obrázek 18: <i>Výfukové emise, měřítko 20 a 10 μm, optický mikroskop.</i>	[-]	27
Obrázek 19: <i>Výfukové emise, měřítko 10 a 2 μm, elektronový mikroskop.</i>	[-]	27
Obrázek 20: <i>Výfukové emise, kulová částice a měřítko 500 nm, elektronový mikroskop.</i>	[-]	28
Obrázek 21: <i>Výfukové emise, měřítko 200 nm, elektronový mikroskop.</i>	[-]	28
Obrázek 22: <i>Svařování MAG, odběr z 20 a 8 litrů vzduchu.</i>	[-]	29
Obrázek 23: <i>Svařování MAG, odběr z 20 a 8 litrů vzduchu, elektronový mikroskop.</i>	[-]	29
Obrázek 24: <i>Svařování MAG, odběr z 8 litrů vzduchu, měřítko 2 μm a 500 nm.</i>	[-]	30
Obrázek 25: <i>Svařování MAG, odběr z 20 litrů vzduchu, měřítko 2 μm a 500 nm.</i>	[-]	30
Obrázek 26: <i>Prvkový rozbor částic svařování – originál, Fe, Mn.</i>	[-]	31
Obrázek 27: <i>Venkovské imise.</i>	[-]	33
Obrázek 28: <i>Venkovské imise pod elektronovým mikroskopem.</i>	[-]	34
Obrázek 29: <i>Koncentrace PM₁, PM_{2,5} a PM₁₀ v obci Železná.</i>	[-]	35
Obrázek 30: <i>Koncentrace velikostních kategorií částic PM₁ v obci Železná.</i>	[-]	36
Obrázek 31: <i>Městské imise.</i>	[-]	37
Obrázek 32: <i>Městské imise pod elektronovým mikroskopem.</i>	[-]	37
Obrázek 33: <i>Městské imise – různorodost částic.</i>	[-]	38
Obrázek 34: <i>Koncentrace PM₁, PM_{2,5} a PM₁₀ ve městě Brno.</i>	[-]	38
Obrázek 35: <i>Koncentrace velikostních kategorií částic PM₁ ve městě Brno.</i>	[-]	39
Obrázek 36: <i>Imisní odběr v domě, vlákna a částice na vlákně.</i>	[-]	40

Obrázek 37:	<i>Imisní odběr v domě, obří částice s krystaly a kusem vlákna a oblast s částicemi o velikosti jednotek až desítek mikrometru.</i>	[-]	40
Obrázek 38:	<i>Koncentrace PM_{10}, $PM_{2,5}$ a PM_{10} v rodinném domě.</i>	[-]	41
Obrázek 39:	<i>Koncentrace velikostních kategorií částic PM_{10} v rodinném domě.</i>	[-]	41
Obrázek 40:	<i>Stanice imisního monitoringu v Brně, 2023.</i>	[18]	44
Obrázek 41:	<i>Graf koncentrace částic PM_{10}, rychlosti větru a četnosti měření.</i>	[-]	46
Obrázek 42:	<i>Graf koncentrace částic PM_{10}, relativní vlhkosti a četnosti měření.</i>	[-]	47
Obrázek 43:	<i>Graf koncentrace částic PM_{10}, teploty a četnosti měření.</i>	[-]	47
Obrázek 44:	<i>Grafy koncentrací NO_x, v závislosti na teplotě a rychlosti větru a četnosti měření.</i>	[-]	48
Obrázek 45:	<i>Graf koncentrací částic PM_{10}, NO_x a četnosti měření.</i>	[-]	49
Obrázek 46:	<i>Záznam stanice imisního monitoringu od 18.3. 14:00 do 19.3. 12:00.</i>	[46]	49
Obrázek 47:	<i>Graf koncentrací částic PM_{10} (modře), $PM_{2,5}$ (modře a zeleně) a PM_{10} (celý sloupec).</i>	[-]	51
Obrázek 48:	<i>Graf koncentrací částic $PM_{10-2,5}$ a PM_{10}, teploty a četnosti měření.</i>	[-]	51
Obrázek 49:	<i>Graf směru a rychlosti proudění větru v závislosti na četnosti měření a mapa automatické imisní monitorující stanice Svatoplukova se směrovou růžicí.</i>	[-]	52
Obrázek 50:	<i>Vliv srážek, stanice Arboretum.</i>	[46]	53
Obrázek 51:	<i>Vliv srážek, stanice Komárov.</i>	[46]	53
Obrázek 52:	<i>Vývoj denních koncentrací částic PM_{10}.</i>	[43]	55
Obrázek 53:	<i>Vývoj denních koncentrací částic $PM_{2,5}$.</i>	[43]	55
Obrázek 54:	<i>Průměrný denní chod dopravních charakteristik a hodinových koncentrací NO_2 a PM_{10}, stanice Kuřim.</i>	[43]	56
Obrázek 55:	<i>Průměrný denní chod dopravních charakteristik a hodinových koncentrací NO_2 a PM_{10}, stanice Česká.</i>	[43]	56
Obrázek 56:	<i>Zvýšení koncentrací částic PM během prvních dnů požáru.</i>	[39]	57
Obrázek 57:	<i>Graf koncentrace částic PM_{10} při ohňostrojích pro Prahu a pro Tábor.</i>	[22]	58
Obrázek 58:	<i>Graf koncentrace částic PM_{10}, průměr všech 117 stanic.</i>	[22]	58
Obrázek 59:	<i>Fotografie ze dne 30.3.2024, hora Říp, se svolením fotografky paní Petry Krbkové.</i>	[-]	59
Obrázek 60:	<i>Graf hodinových průměrů koncentrací částic PM_{10} na Moravě od 27. do 31. března během prašnosti ze Sahary a graf z Hojné vody od 29. do 30. března.</i>	[44]	59
Obrázek 61:	<i>Hodinový průměr koncentrace částic PM_{10} 30.3. v 16 hodin.</i>	[45]	60
Obrázek 62:	<i>Hodinový průměr koncentrace částic PM_{10} 31.3. ve 20 hodin.</i>	[45]	60
Obrázek 63:	<i>Hodinový průměr koncentrace částic PM_{10} 1.4. ve 20 hodin.</i>	[45]	60
Obrázek 64:	<i>Snímek částic odebraných při zvýšené koncentraci PM_{10} Saharským prachem 31.3.2024.</i>	[-]	61
Obrázek 65:	<i>Saharský písek, odběr 19. února 2014 v Praze a v Hradci Králové, Autor: Geologický ústav Akademie věd ČR.</i>	[42]	61

SEZNAM TABULEK

	zdroj	strana
Tabulka 1: <i>Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení.</i>	[25]	18
Tabulka 2: <i>Imisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace.</i>	[25]	18
Tabulka 3: <i>Imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM₁₀ vyhlášené pro ochranu zdraví lidí.</i>	[25]	19
Tabulka 4: <i>Technické parametry přístroje Gorenje SVC216FR.</i>	[14]	21
Tabulka 5: <i>Prvkový rozbor částice na obrázku 15.</i>	[-]	25
Tabulka 6: <i>Prvkový rozbor částice na obrázku 16.</i>	[-]	26
Tabulka 7: <i>Prvkový rozbor částic svařování.</i>	[-]	31
Tabulka 8: <i>Meteorologické podmínky v obci Železné.</i>	[-]	33
Tabulka 9: <i>Prvkový rozbor imisní částice z obrázku 28.</i>	[-]	34
Tabulka 10: <i>Prvkový rozbor imisních částic z venkova.</i>	[-]	35
Tabulka 11: <i>Meteorologické podmínky v Brně.</i>	[-]	36
Tabulka 12: <i>Meteorologické podmínky v rodinném domě.</i>	[-]	39
Tabulka 13: <i>Průměrné hodnoty měřených veličin, AIM Svatoplukova 2019.</i>	[-]	50