



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

ANALÝZA IONTŮ V PM_{2,5} AEROSOLU V OBLASTI DĚTSKÉ LÉČEBNY ZAMĚŘENÉ NA SPELEOTERAPII

ANALYSIS OF IONS IN PM_{2.5} AEROSOL IN THE AREA OF CHILDREN'S SANATORIUM FOCUSED ON
SPELEOTHERAPY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Markéta Horká

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Alexa, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP2106/2024 Akademický rok: 2024/25
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Studentka: **Bc. Markéta Horká**
Studijní program: Chemie pro medicínské aplikace
Studijní obor: Procesy a materiály medicínských aplikací
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Alexa, Ph.D.**

Název diplomové práce:

Analýza iontů v PM_{2,5} aerosolu v oblasti dětské léčebny zaměřené na speleoterapii

Zadání diplomové práce:

- Zpracování literární rešerše na téma výskytu iontů v atmosféře a možností detekce
- Vzorkování aerosolu v oblasti Dětské léčebny v Ostrově u Macochy v letním a zimním období
- Analýza iontů v aerosolu pomocí iontové chromatografie a kontinuálních průtokových analyzátorů
- Zpracování výsledků

Termín odevzdání diplomové práce: 5.5.2025:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Markéta Horká
studentka

Ing. Lukáš Alexa, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 3.2.2025

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Atmosférický aerosol má mnoho negativních dopadů na lidské zdraví, kterými jsou především respirační a kardiovaskulární onemocnění. Speleoterapie, která využívá specifické jeskynní klima, slouží jako podpůrná léčebná metoda pro onemocnění dýchacích cest a celkově imunitního systému. Dětská léčebna se speleoterapií se nachází v Ostrově u Macochy v Moravském krasu. Původní budova léčebny ve středu obce byla nahrazena novými prostory, které se nacházejí v těsné blízkosti lesa a Císařské jeskyně, kde probíhá samotná speleoterapie. Cílem této diplomové práce je porovnání obsah iontů v PM_{2,5} aerosolu v okolí staré a nové budovy dětské léčebny.

ABSTRACT

Atmospheric aerosol has many negative impacts on human health, mainly respiratory and cardiovascular diseases. Speleotherapy, which uses the specific cave climate, serves as a supportive treatment method for respiratory diseases and immune system. The children's sanatorium offering speleotherapy is located in Ostrov u Macochy in the Moravian Karst. The original building of the sanatorium, located in the center of the village, was replaced by new premises, which are situated close to the forest and the Císařská Cave, where the speleotherapy treatment takes place.

The aim of the thesis is to compare the ions content in PM_{2.5} aerosol near the old and new buildings of the children's sanatorium.

KLÍČOVÁ SLOVA

speleoterapie, atmosférický aerosol, PM_{2,5}, anionty, amonné ionty, iontová chromatografie, kontinuální průtokový analyzátor

KEYWORDS

speleotherapy, atmospheric aerosol, PM_{2,5}, anions, ammonium, ion chromatography, continuous flow analyzer

HORKÁ, Markéta. *Analýza iontů v PM_{2,5} aerosolu v oblasti dětské léčebny zaměřené na speleoterapii*. Online, diplomová práce. Lukáš ALEXA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/164985>. [cit. 2025-04-03].

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....
Bc. Markéta Horká

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Lukášovi Alexovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícné jednání. Dále bych ráda poděkovala RNDr. Pavlovi Mikuškovi, CSc. a Ing. Haně Hlaváčkové za ochotu a pomoc během experimentálního měření a zpracování diplomové práce.

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	CÍL PRÁCE	8
3	TEORETICKÁ ČÁST	9
3.1	Atmosférický aerosol.....	9
3.1.1	Zdroje aerosolu.....	9
3.1.2	Fyzikální vlastnosti aerosolu	10
3.1.3	Velikostní dělení aerosolu	11
3.1.4	Chemické složení aerosolu.....	13
3.2	Vliv aerosolu na zdraví člověka	14
3.2.1	Dýchací systém	14
3.2.2	Kardiovaskulární systém	15
3.2.3	Centrální nervový systém.....	15
3.2.4	Rožmnořovací systém.....	15
3.3	Speleoterapie.....	16
3.4	Aerosol uvnitř Císařské jeskyně	17
3.5	Vzorkování atmosférického aerosolu	18
3.5.1	Automatické vzorkovače aerosolu	19
3.5.2	Kaskádový impaktor	19
3.5.3	Hmotnostní koncentrace částic.....	20
3.5.4	Početní koncentrace částic	21
3.6	Extrakční metody.....	21
3.7	Analýza chemického složení aerosolů.....	22
3.7.1	Chromatografie.....	22
3.7.2	Elektromigrační metody	25
3.7.3	Průtokové analyzátory	25
3.7.4	Hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem.....	27
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	28
4.1	Materiály.....	28
4.1.1	Použitá chemikálie	28
4.1.2	Použitá pomůcky a přístroje.....	28
4.2	Roztoky.....	29
4.2.1	Příprava zásobních roztoků pro IC a CFA	29

4.2.2	Příprava kalibračních roztoků pro IC a CFA	29
4.2.3	Příprava reakčních roztoků pro CFA	29
4.3	Metody	30
4.3.1	Vzorkování aerosolu	30
4.3.2	Stanovení početní koncentrace částic	33
4.3.3	Stanovení hmotnostní koncentrace částic	33
4.3.4	Extrakce exponovaných filtrů	34
4.3.5	Stanovení koncentrace aniontů pomocí IC	34
4.3.6	Stanovení koncentrace NH_4^+ pomocí CFA	35
5	VÝSLEDKY A DISKUZE	37
5.1	Hmotnostní koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ aerosolu	37
5.2	Koncentrace iontů v $\text{PM}_{2,5}$ aerosolu	39
5.3	Početní koncentrace částic	43
6	ZÁVĚR	46
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	47
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	55
9	SEZNAM PŘÍLOH	56
10	PŘÍLOHY	57
10.1	Početní koncentrace částic v Ostrově u Macochy v průběhu zimní kampaně	57
10.2	Početní koncentrace částic v Ostrově u Macochy v průběhu letní kampaně	60
10.3	Abstrakty z konference OVZDUŠÍ V ČASE	62

1 ÚVOD

Znečištěné ovzduší představuje všudypřítomné riziko pro životní prostředí a všechny organismy. Nejčastější příčinou znečištěného ovzduší jsou antropogenní zdroje, které obvykle pocházejí z průmyslových emisí, automobilové dopravy a ze spalování fosilních paliv.

Mezi nejdůležitější atmosférické polutanty patří aerosol, který v lidském organismu přispívá k rozvoji nejrůznějších onemocnění. Mezi nejdůležitější vlastnosti aerosolu, určující dopad na lidské zdraví, patří velikost, chemické složení a koncentrace částic. Nejvíce ohroženou skupinou bývají děti a senioři, u nichž zvýšené koncentrace aerosolu mohou vyvolat akutní i dlouhodobé potíže.

Podpurná léčebná metoda, nazývaná speleoterapie, se začala používat již ve 40. letech 20. století. Tato terapie využívá přírodní jeskynní klima, které napomáhá při léčbě astmatu, alergií, zánětů dýchacích cest, bronchitidy a dalších respiračních onemocnění. Klinické studie potvrzují pozitivní účinky jeskynního prostředí na imunitní systém a celkovou fyzickou kondici. Pacienti absolvující speleoterapii mají sníženou potřebu medikace nebo jim je umožněno medikamenty zcela vynechat. Od roku 1982 je speleoterapie součástí léčby respiračních onemocnění v Dětské léčebně v Ostrově u Macochy. V severní části Moravského krasu se nachází speciálně přizpůsobená Císařská jeskyně, která svým prostředím poskytuje ideální podmínky k léčbě respiračních onemocnění. Od roku 2023 byly navíc staré prostory léčebny nahrazeny novými, které se nacházejí v těsné blízkosti Císařské jeskyně a umožňují vyšší komfort a kvalitnější péči přítomným pacientům.

Tato diplomová práce byla součástí grantu Akademie věd České republiky v rámci regionální spolupráce s krajem ČR pod názvem: Charakterizace atmosférických aerosolů v ovzduší v okolí Dětské léčebny se speleoterapií v Ostrově u Macochy (R200312301, 2023–2025), který byl vypsán RNDr. Pavlem Mikuškou, CSc. z oddělení Analytické chemie životního prostředí na Ústavu analytické chemie AV ČR. Průběžné výsledky měření byly prezentovány na konferenci OVZDUŠÍ V ČASe (23th Annual Conference of the Czech Aerosol Society), která proběhla 11.–13. listopadu 2024 ve Sněžném-Milovech.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo zpracování literární rešerše na téma výskytu iontů v atmosféře a možnosti jejich detekce.

Součástí experimentální části bylo vzorkování aerosolu v oblasti Dětské léčebny se speleoterapií v Ostrově u Macochy v letním a zimním období. Dále byl porovnán obsah iontů v PM_{2,5} aerosolu ve venkovních prostorech u nového a starého objektu dětské léčebny. Následně byla provedena analýza iontů v aerosolu pomocí iontové chromatografie a kontinuálního průtokového analyzátoru. Poslední částí bylo zpracování a interpretace výsledků měření.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Atmosférický aerosol

Atmosférický aerosol je označován jako směs pevných, kapalných či směsných částic, které jsou suspendovány v atmosféře. Jakožto nedílná složka atmosféry je aerosol součástí důležitých atmosférických dějů, jako je například tvorba srážek nebo teplotní bilance Země. Příliš velká koncentrace aerosolu v atmosféře může mít nepříznivé dopady na kvalitu ovzduší, změnu klimatu, a především na lidské zdraví [1][2].

Chování aerosolu v atmosféře je značně ovlivněno koncentrací a velikostí přítomných částic. Velikost částic atmosférického aerosolu se obvykle pohybuje v rozmezí 1 nm – 100 μm. Běžná koncentrace aerosolu představuje $1,6 \cdot 10^9$ částic, které jsou homogenně rozptýlené v 1 m³ vzduchu. V některých situacích však může koncentrace aerosolových částic dosahovat hodnot 10¹⁰ m⁻³. Množství aerosolu může být ovlivněno jednak svými zdroji, ale také meteorologickými změnami, klimatem a ročním obdobím [3].

Kapalný aerosol, jehož částice mají kulovitý tvar a velikost v rozsahu 10–100 μm se nazývá mlha. Vzniká kondenzací přesycených vodních par či atomizací kapaliny. Aerosol tvořený pevnými částicemi, které jsou menší než 0,05 μm je označován jako dým. Tento jev obvykle vzniká spalováním, stejně tak jako kouř. Kouř však kromě pevných částic obsahuje i kapalně částice. Hrubé částice o velikosti větší než 0,6 μm, které vznikají především mechanickým působením, definujeme jako prach. Často užívaným termínem v oblasti znečištění atmosféry je smog. Částice smogu mohou být kapalně nebo pevně a jejich rozměry obvykle nepřesahují 2 μm [2]. Smog vzniká při znečišťování ovzduší lidskou činností, spojením kouře a mlhy a odlišují se dva hlavní typy – redukční a oxidační. Redukční smog vzniká následkem spalovacích procesů a je převážně tvořen oxidy síry a dusíku. Oxidační neboli fotochemický smog je způsoben reakcí slunečního záření s polutanty a v jeho složení převládá ozon. Oba druhy mohou způsobovat zdravotní problémy, sníženou viditelnost a poškozovat životní prostředí [4].

3.1.1 Zdroje aerosolu

Atmosférické aerosoly se dělí na přirozené a antropogenní. Podstatný podíl antropogenního aerosolu je tvořen průmyslovými emisemi, výfukovými plyny z vozidel, spalováním fosilních paliv, odpadů a biomasy nebo cigaretovým kouřem. Přírodní zdroje, které mají dopad na kvalitu ovzduší, zahrnují především erozi půdy, větrem navátý pouštní prach, vulkanickou činnost, uhlíkaté aerosoly z lesních požárů či částice emitované z mořské hladiny [5]. Zvláštní skupinu, zahrnující aerosol pocházející z přírodních zdrojů, zastupuje bioaerosol. Tato kategorie zahrnuje veškeré organismy, jakou jsou viry, bakterie, řasy a plísně, případně živočišné a rostlinné produkty jako je například pyl [6].

Na základě zdroje rozlišujeme aerosol primární a sekundární. Pokud jsou částice emitovány do atmosféry přímo ze zdroje jedná se o primární aerosol. V případě sekundárního aerosolu je vznik způsoben chemickými reakcemi plynných složek v atmosféře [7].

3.1.2 Fyzikální vlastnosti aerosolu

Zásadním parametrem z hlediska fyzikálních vlastností aerosolových částic je jejich velikost. Velikost kulovitých částic je charakterizována průměrem dané částice. V případě aerosolu jsou pozorovány spíše nepravidelné tvary. Proto byl pro takové částice definován tzv. ekvivalentní průměr neboli průměr koule o stejném objemu. Velikost značně ovlivňuje transportní vlastnosti částic v lidském těle a obecně platí, že čím je částice menší, tím hlouběji může pronikat do organismu [1].

Dalším fyzikálním parametrem, který ovlivňuje aerodynamické a difúzní chování částic je tvar. Tvar je podmíněn vznikem částice, ale také následnými změnami v důsledku krystalizace, hydratace nebo aglomerace. Obecně není zcela možný matematický popis transportního chování nepravidelně tvarovaných částic. Z tohoto důvodu je využíván empirický dynamický tvarový faktor, který udává poměr odporu dané částice k odporu kulovité částice se stejným objemem.

Důležitými parametry pro interakci částic s plicní tkání jsou složení, povrch a náboj částice. Jestliže částice nese na svém povrchu elektrický náboj, musíme brát v úvahu následující vztahy. Pokud jsou elektrická síla F_e a odporová síla F_o působící na částici v plynu vyrovnány, lze elektromigrační rychlost v_e vyjádřit jako poměr elektrické síly F_e a koeficientu tření f :

$$v_e = \frac{F_e}{f}. \quad (1)$$

Tok částic J v důsledku difúze a pohybu v elektrickém poli lze vyjádřit součtem těchto dvou zmíněných účinků:

$$J = -D\Delta n + v_e n, \quad (2)$$

kde n udává počet částic a D je difúzní koeficient.

Pro popis pohybu kulovité částice o nějakém průměru v okolní plynu je využívána Langevinova rovnice. Tato rovnice říká, že hmotnost krát zrychlení je rovna výslednici všech sil působících na částici. První z těchto sil je viskózní odporová síla způsobená pohybem částice v_ξ vzhledem k pohybu okolní tekutiny v_o , přičemž se předpokládá, že koeficient tření f se řídí Stokesovým zákonem. Druhá síla je gravitační a třetí síla je stochastická neboli náhodná síla, která je charakteristická pro srážky molekul okolní tekutiny s částicí v důsledku Brownova pohybu

$$m \frac{dv_\xi}{dt} = -f(v_\xi - v_o) + mg + F(t). \quad (3)$$

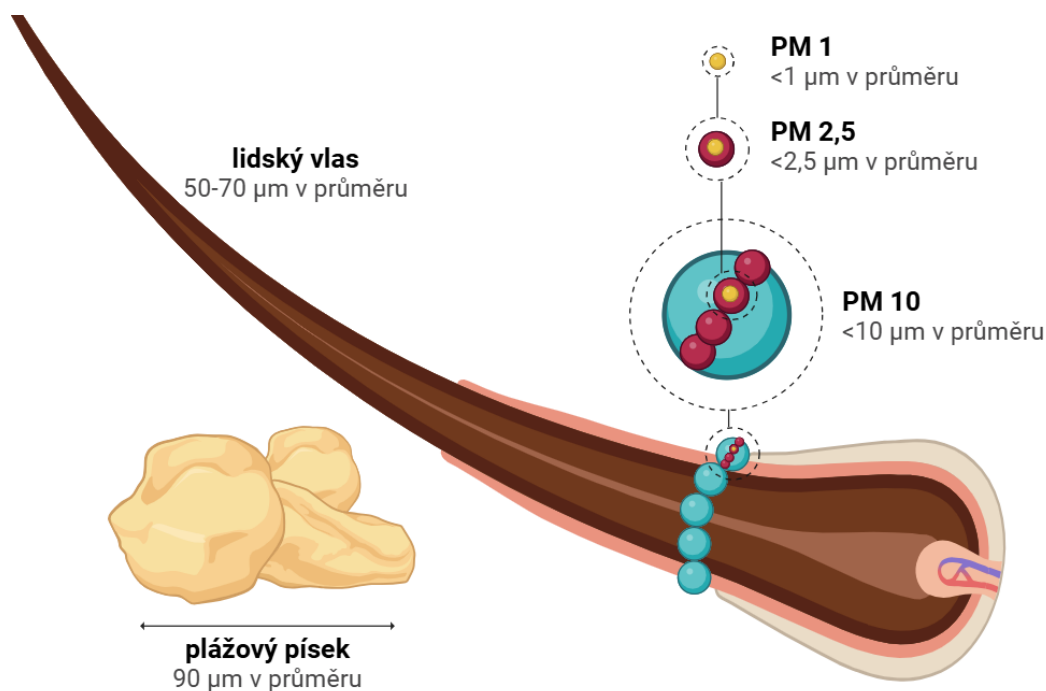
V případě malých částic, tedy částic o průměru menším než půl mikrometru lze z předešlé rovnice zanedbat gravitační člen a člen zrychlení, které jsou u takto malých částic nevýznamné. V takovémto případě se jedná o jednoduchý Brownův pohyb, kdy jsou pohyby způsobené náhodnými srážkami s částicemi plynu tlumeny viskózním odporem. To vede k difúzi částic, která je dána Einsteinovým vztahem pro difúzní koeficient:

$$D = \frac{k_B T}{3\pi\eta d_\xi}, \quad (4)$$

kde k_B je Boltzmanova konstanta [8].

3.1.3 Velikostní dělení aerosolu

Velikost částic aerosolu představuje klíčovou vlastnost při určování jejich vlivů na lidské zdraví a životní prostředí. Z hlediska zdravotního dopadu bylo definováno několik velikostních frakcí aerosolových částic PM_x (particulate matter; *Obrázek 1*), kde x označuje aerodynamický průměr dané částice udávaný v mikrometrech [2].



Obrázek 1: Porovnání velikosti aerosolových částic, upraveno podle [9]

3.1.3.1 Hrubé částice (PM₁₀)

Aerodynamický průměr hrubých částic se pohybuje v rozmezí 2,5–10 μm. Tyto částice jsou zachytávány přirozenými bariérami dýchacích cest, jako jsou chloupky v nose. Zasažují tak primárně horní dýchací cesty. Vlivem gravitace jsou poměrně rychle usazovány k zemi, čímž je snížena možnost jejich vdechnutí. Obvyklým zdrojem hrubých částic jsou mechanické procesy, zemědělská činnost a stavební práce [10].

3.1.3.2 Jemné částice (PM_{2,5})

Velikost jemných částic se nachází v rozmezí 0,1–2,5 μm. Vzhledem k takto malým rozměrům pronikají hluboko do dolních dýchacích cest, což pro člověka představuje vážné zdravotní riziko. Vznik jemných částic je způsoben zejména spalovacími procesy např. v elektrárnách, průmyslovými emisemi, vytápěním v domácnostech nebo při lesních požárech [11].

3.1.3.3 Submikrometrové částice (PM1)

Pokud je aerodynamický průměr částic menší než 1 μm , jedná se o částice submikrometrové. Takto malé částice prostupují hluboko do plicních sklípků, kde způsobují závažné respirační problémy. PM1 mohou v atmosféře setrvat po dobu několika týdnů a bývají transportovány na velké vzdálenosti. Submikrometrové částice jsou produkovány spalováním fosilních paliv, ale také přirozenými procesy jako jsou sopečné erupce nebo lesní požáry [12].

3.1.3.4 Ultrajemné částice (PM0,1)

Částice o velikosti menší než 0,1 μm , jsou označovány jako ultrajemné částice neboli nanočástice. Díky své velikosti snadno pronikají do krevního oběhu a mohou být rozšířeny do celého těla. Vdechování ultrajemných částic je pro člověka velmi nebezpečné a může vést k celé řadě zdravotních problémů [13].

3.1.3.5 Rozdělení dle módů

Dalším typem dělení aerosolových částic je tzv. modální distribuce. Jednotlivé módy mají odlišné nejen velikostní rozpětí, ale také mechanismy vzniku, zdroj a složení částic.

Nukleační mód zahrnuje částice menší než 0,02 μm . Vznikají nukleací v přítomnosti plynů nebo mohou být emitovány přímo ze spalovacích procesů. Vyznačují se vysokou reaktivitou a nízkou životností, neboť v důsledku koagulace přecházejí během několika minut v další mód [14].

Aitkenův mód je charakteristický velikostí částic v rozmezí 0,02–0,1 μm . Takovéto částice mohou vznikat koagulací částic nukleačního módu, přímou emisí ze spalovacích procesů nebo kondenzací plynů na částicích nukleačního módu. Aitkenův mód může být tvořen organickými sloučeninami, kovy či elementárním uhlíkem. Částice v tomto módu jsou důležité z hlediska studia atmosférických procesů, neboť mohou ovlivňovat tvorbu mraků a klimatické podmínky [15].

Částice akumulárního módu dosahují velikosti 0,1–2,5 μm . Zastupují podstatnou část hmotnosti atmosférického aerosolu a jejich životnost může být několik dnů až týdnů. Vznikají v důsledku koagulace či aglomerace menších částic emitovaných spalovacími procesy nebo kondenzací těkavých látek. Složení částic akumulárního módu je tvořeno především sloučeninami síry a dusíku, kovy, organickými sloučeninami a amonnými ionty [16].

3.1.4 Chemické složení aerosolu

Částice aerosolu jsou složeny z několika klíčových složek, z nichž každá představuje určité procento z celkové hmotnosti částic. Mezi hlavní složky patří zejména anorganické ionty, organické sloučeniny a saze. Méně než 1 % z celkové hmotnosti obvykle tvoří stopové prvky. Aerosol v městských oblastech zpravidla obsahuje obdobné hlavní složky, jejichž poměry se liší v závislosti na místě odběru vzorku [17]. Hlavní podíl městského aerosolu tvoří následující sloučeniny.

3.1.4.1 Sírany

Aerosolové částice obsahující sírany vznikají atmosférickou oxidací oxidu siřičitého, který je převážně produkován průmyslovou činností, spalováním fosilních paliv či vulkanickou aktivitou. Vzniklý oxid sírový je následně zdrojem kyseliny sírové, která společně s hydrogensíranem amonným zodpovídá za kyselost atmosférického aerosolu a může přispívat k tvorbě kyselých dešťů. Sírany bývají dále ve formě sloučenin jako je síran vápenatý nebo síran draselný [18].

3.1.4.2 Dusičnany

Značnou část aerosolových částic zastupují dusičnany. Dusičnany vznikají především oxidací atmosférického oxidu dusičitého a oxidu dusnatého. Jednou z jejich hlavních forem je dusičnan amonný, sodný a vápenatý. Dominantním zdrojem oxidů dusíku je spalování fosilních paliv, spalování biomasy a zemědělská činnost [19].

3.1.4.3 Amonné ionty

Amoniak je plynná látka, jejíž primárním zdrojem je biologická aktivita a zemědělská činnost. Protonací amoniaku vodíkem z kyselých látek, jako je kyselina sírová, dusičná nebo chlorovodíková, je produkován amonný ion, který přispívá k tvorbě sekundárních aerosolů [19].

3.1.4.4 Uhlík

Uhlíkatá složka aerosolových částic je tvořena elementárním a organickým uhlíkem. Obě tyto formy jsou uvolňovány do atmosféry přímo – prostřednictvím spalovacích procesů. Zdrojem primárního organického uhlíku je nedokonalé spalování organických materiálů (fosilní paliva, biomasa) a degradace produktů obsahující uhlík (vegetace, biologické částice). Sekundární organický uhlík může vznikat fotochemickými reakcemi skrze přeměny plynných organických látek na částice [20].

3.1.4.5 Chloridy

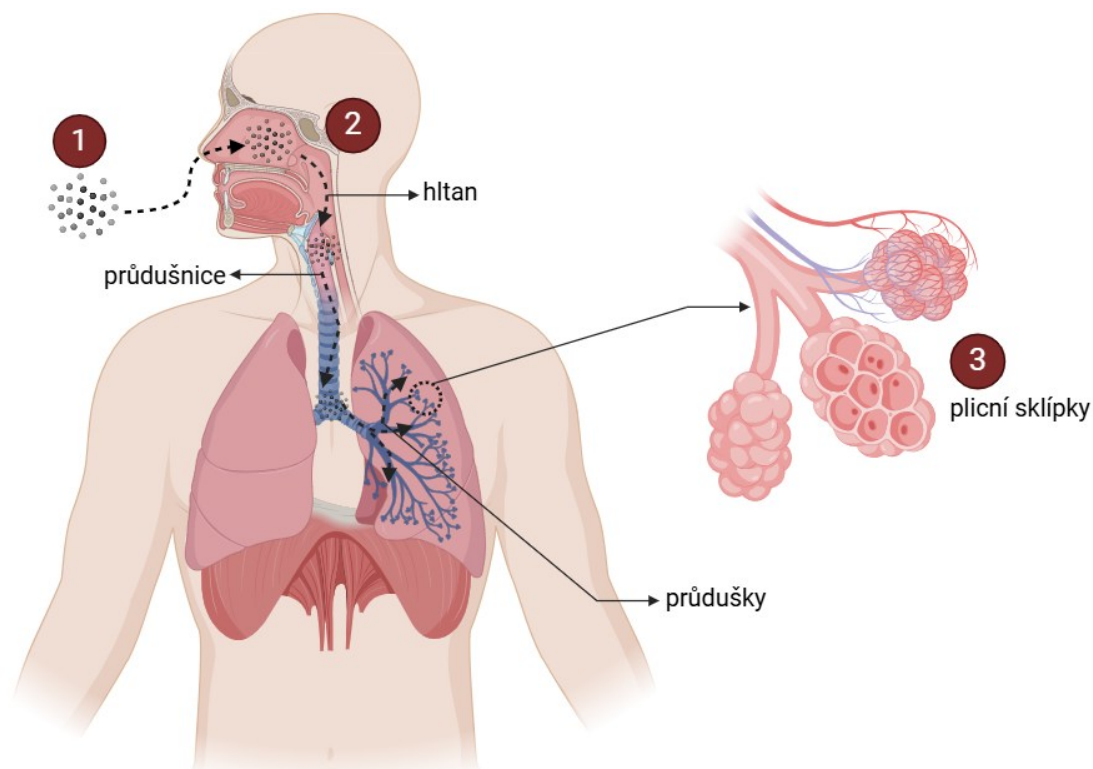
Hlavními zástupci chloridových částic je chlorid sodný, chlorid draselný a chlorid hořečnatý. Tyto sloučeniny mohou vznikat z mořského výparu, kdy jsou chloridové ionty uvolňovány z moří do atmosféry, ve které kondenzují a vytvářejí aerosolové částice. V zimním období může být přítomnost chloridů způsobena resuspendací z posypové soli na silnice. Dalším důležitým zástupcem je chlorid amonný, který vzniká v důsledku neutralizace výparů kyseliny chlorovodíkové amoniakem, které jsou emitovány ze spaloven či elektráren [21].

3.2 Vliv aerosolu na zdraví člověka

Aerosolové částice jednak přispívají k rozvoji celé řady respiračních onemocnění, ale také mají negativní vliv na kardiovaskulární systém a zvyšují riziko rakoviny. Dopad aerosolu na lidské zdraví závisí, kromě již zmíněných fyzikálně-chemických faktorů, také na době expozice a senzibilitě daného jedince. V tomto ohledu patří mezi nejvíce ohrožené skupiny děti, jejichž imunitní systém není zcela vyvinutý. Vdechování aerosolu může negativně ovlivnit vývoj plic, což vede k trvalému zhoršení plicní kapacity a zvýšení rizika respiračních onemocnění v pozdějším věku. Další takovouto skupinou bývají senioři, z důvodu celkového oslabení organismu a častému výskytu chronických onemocnění. Dlouhodobá expozice vysokým koncentracím aerosolových částic může být závažným zdravotním rizikem také pro osoby, které již trpí respiračním nebo kardiovaskulárním onemocněním [22][23].

3.2.1 Dýchací systém

Při vdechování vstupují částice do těla skrze nos a poté jsou postupně v dýchacím systému zachytávány v závislosti na jejich velikosti (*Obrázek 2*). Jemné částice (PM_{2,5}), které prostupují až hluboko do plic, způsobují poškození plicní tkáně, záněty dýchacích cest a celkové narušení plicních funkcí. To může vést k akutním stavům jako je kašel, dušnost či podráždění nosní dutiny. U lidí trpících astmatem, alergií nebo bronchitidou dochází ke zhoršení běžných symptomů. Vdechování aerosolových částic může oslabit obranné mechanismy, což zvyšuje náchylnost k bakteriálním a virovým infekcím. Dále mohou být vyvolány zánětlivé reakce v dýchacím traktu, což zvyšuje produkci volných radikálů a podporuje oxidační stres. Tento proces poškozuje buňky plicní tkáně a může vést k chronickým onemocněním, jako je plicní fibróza. V závažnějších případech jsou aerosolové částice spojovány s rakovinou plic [24].



Obrázek 2: Průchod částic aerosolu dýchací soustavou člověka, upraveno podle [25]

3.2.2 Kardiovaskulární systém

Jemné frakce aerosolu mohou pronikat skrze plicní sklípky až do krevního oběhu, čímž způsobují poškození srdeční tkáně a záněty cév. Následně pak může docházet ke zvýšení krevního tlaku a celkovému zvýšení rizika srdečních chorob. Dlouhodobé vystavení jemným částicím bývá spojováno s infarktem myokardu, cévní mozkovou příhodou, srdečními arytmiemi a v některých případech může vést k náhlé srdeční smrti [23].

3.2.3 Centrální nervový systém

Ultrajemné částice mohou pronikat skrze krevní bariéru až do mozku. Tam způsobují poškození nervových buněk a přispívají k neurodegenerativním poruchám, kterými jsou např. Alzheimerova a Parkinsonova choroba. Dlouhodobá expozice aerosolovým částicím může zhoršovat kognitivní funkce, jako je udržování pozornosti, paměť nebo schopnost učení. Výzkumy také poukazují na možný vliv aerosolů na duševní zdraví [26].

3.2.4 Rozmnožovací systém

Dle několika studií byl prokázán negativní dopad jemných částic aerosolu na reprodukční schopnost člověka. V případě mužů je tento problém spojován se snížením koncentrace, pohyblivosti a kvality spermatogenních buněk. Ženy se mohou potýkat s výskytem hormonální nerovnováhy, negativním ovlivněním funkce vaječníků a s tím souvisejícími problémy během těhotenství [27].

3.3 Speleoterapie

Speleoterapie je podpůrná léčebná metoda využívající jeskynní klima, která svými účinky doplňuje léčbu celé řady respiračních onemocnění. Mezi nejčastější onemocnění tohoto typu patří astma, alergické rýmy, záněty nosohltanu a hrtanu, záněty vedlejších dutin nosních, záněty průdušek, zápal plic, bronchitida nebo onemocnění spojená s oslabením imunity. Zpravidla se jedná o chronická respirační onemocnění k jejichž vzniku a klinickému obrazu přispívají genetické predispozice, faktory prostředí a vystavení specifickým alergenům. V poslední době je také patrný nárůst dermorespiračního syndromu, kdy se současně vyskytují kožní projevy jako je atopický ekzém. Dle dosavadních klinických výsledků bylo zjištěno, že jeskynní prostředí pozitivně působí na lidský organismus díky stimulaci imunitního a autoimunitního nervového systému. V důsledku toho u pacientů dochází k výraznému zvýšení odolnosti vůči infekcím, ke zlepšení celkové fyzické kondice, ke snížení dávek antibiotik a kortikoidů na minimum a v některých případech i k úplnému vynechání medikamentů [1][28].

Kvalita jeskynního klimatu musí odpovídat přísným požadavkům, které jsou stanoveny Mezinárodní unií speleoterapie. Mezi klíčové léčebné vlastnosti jeskyně patří:

- stálá teplota (7–8 °C)
- vysoká vlhkost vzduchu (téměř 100 %)
- malé kolísání atmosférického tlaku
- bezprašnost (nepřítomnost alergenů)
- vysoký obsah lehkých iontů zajišťující tzv. samočisticí schopnost jeskynního prostředí (například záporné ionty zlepšující krevní průtok kapilárami a následné prokrvení orgánů a zvyšující produkci hlenu)
- nízká koncentrace negativních iontů (například radon ovlivňující imunologické pochody v buňkách) [28].

Dětská léčebna v Ostrově u Macochy, nacházející se v severní části Moravského krasu, byla vybudována v roce 1982. Jejím specifikem je speleoterapie, která je prováděna v tamní Císařské jeskyni (*Obrázek 3*). Tato přírodní krasová jeskyně je veřejnosti nepřístupná a je tak zcela přizpůsobena pacientům trpícím chorobami dýchacího ústrojí. Pacienti navštěvují jeskyni každý všední den po dobu 3 hodin, přičemž polovinu času tráví sportovními aktivitami a druhá část je vyhrazena k odpočinku na lůžkách. Původní budova léčebny, situovaná uprostřed obce, byla na jaře 2023 nahrazena novými prostory, které se nacházejí v těsné blízkosti jeskyně. Nové prostory léčebny zajišťují kvalitnější péči a vyšší pohodlí pacientů i jejich doprovodu. Architektonicky zajímavá stavba využívá obnovitelné zdroje energie a je šetrná k přírodě a okolnímu prostředí. Součástí vnitřních a venkovních prostorů budovy je také bazén, sauna či tělocvična, což umožňuje uskutečnění veškerých rehabilitačních a rekondičních procedur na jednom místě [29][30].



Obrázek 3: Speleoterapie v Císařské jeskyni [31]

3.4 Aerosol uvnitř Císařské jeskyně

V rámci předchozích měření koncentrací a vlastností částic v Císařské jeskyni bylo zjištěno, že hodnoty uvnitř jeskyně jsou srovnatelné s venkovním prostředím, jako jsou venkovské a přímořské oblasti. Zdrojem aerosolu uvnitř jeskyně může být proudění vzduchu z vnějšího prostředí nebo tvorba částic přímo na místě. Nejpočetnější velikostní frakci uvnitř jeskyně tvoří ultrajemné částice. Převažující podobou těchto částic je nukleační mód, který poukazuje na vznik částic přímo v jeskyni přirozenými procesy, jako je přeměna plynů na částice či kondenzace a disperze kapající vody [32]. Takovýto aerosol se vyznačuje vysokým obsahem vápníku, který napomáhá kalciové homeostáze bronchiálních buněk, čímž může dojít ke snížení chronického zánětu průdušek a ke zlepšení celkového klinického stavu pacienta [33].

3.5 Vzorkování atmosférického aerosolu

Vzorkování aerosolu je prováděno k získání optimálního vzorku aerosolových částic, který je následně podroben např. analýze chemického složení nebo určení hmotnostní koncentrace studovaných frakcí.

Vzorkování je zpravidla založeno na separaci aerosolových částic z plynné matrice prostřednictvím filtrace. Tato metoda spočívá v mechanismu záchytu částic na filtrech, jejichž konkrétní typ je volen dle požadavků daného měření. Mezi rozhodující parametry filtru patří typ materiálu, velikost pórů, tloušťka, průměr, mechanická odolnost či teplotní a chemická stabilita. Filtry je možné dělit na dvě základní skupiny, a to membránové (např. polytetrafluorethylen – PTFE, nitrát celulózy – NC) a vláknité (např. křemenné, skleněné) [34]. Způsob záchytu částice a účinnost filtrace ovlivňuje několik faktorů. Prvním způsobem je zachycení dotykem, kdy dochází k depozici částice na filtr vlivem jejich srážky. Pokud je částice znehybněna z důvodu předání kinetické energie na filtr, jedná se o záchyt nárazem. Difuzní záchyt spočívá v zachycení částice proniknutím k fázovému rozhraní. Dalšími možnými mechanismy mohou být elektrostatický a gravitační záchyt [35].

Velikost separované frakce je určena selektivními předseparátory neboli inlety. Přes inlety je aerosol nasáván do vzorkovače, čímž dochází k zamezení vstupu částic s větším aerodynamickým průměrem, než je primárně požadováno. Prvním typem inletu je tzv. impaktor. Principem impaktoru je unášení menších částic proudem vzduchu na filtr, zatímco větší částice vylétávají k impakčnímu talíři, kde jsou zadržovány na tukové vrstvě. Druhým typem inletu je tzv. cyklon. V případě cyklonu dochází k separaci suspendovaných částic z proudu vzduchu s využitím odstředivé síly. Větší částice se vlivem odstředivé síly zachytávají na stěnách sběrné trubice, případně jsou usazeny na dně v rezervoáru. Menší částice vystupují společně se vzduchem vrchní částí cyklonu [36].

Na základě množství odebraného vzduchu dělíme vzorkovače do třech základních skupin na velkoobjemové (high-volume, 30–60 m³/h), středněobjemové (medium-volume, 3–6 m³/h) a nízkoobjemové (low-volume, 1 m³/h).

3.5.1 Automatické vzorkovače aerosolu

U automatických vzorkovačů je vzduch nasáván pomocí počítačem řízeného čerpadla, aby mohl být regulován konstantní průtok vzduchu a doba vzorkování. Vzduch je nejprve veden přes předseparátor a následně prochází přes filtr, který zachycuje aerosolové částice požadované frakce. Během vzorkování jsou automaticky zaznamenávány časy odběru, což umožňuje stanovení celkového objemu prosátého vzduchu, který je potřebný k výpočtu koncentrace částic. U některých typů vzorkovačů je součástí vnitřního systému i termostat a zásobník s filtry s automatickým podavačem. Exponovaný filtr je dále podroben analýzám pro stanovení chemického složení (ionty, kovy, organické sloučeniny), fyzikálních vlastností (velikost, tvar) či hmotností koncentrace částic [37].



Obrázek 4: Systém velkoobjemového vzorkovače aerosolu (Digitel DHA-80)

3.5.2 Kaskádový impaktor

Kaskádový neboli vícestupňový impaktor (Obrázek 5) je zařízení spočívající v separaci částic dle jejich aerodynamického průměru. Rozdělení částic do jednotlivých velikostních frakcí (pater) je uskutečněno na základě setrvačnosti a chování částic v proudu vzduchu. Kaskádové impaktory jsou obvykle tvořeny 3–13 patry [38].

V průběhu vzorkování je aerosol prosáván přes jednotlivá patra, která obsahují tryskovou a impakční (sběrnou) desku. Trysková deska je určena ke zrychlování proudu vzduchu. Impakční deska slouží jako sběrná plocha částic a obvykle obsahuje tukovou vrstvu, která zamezuje odrazu částic. Principem kaskádové impakce je prostoupení částic s dostatečnou setrvačností mimo proudnici vzduchu a následné zachycení na povrchu impakční desky. Částice s menším aerodynamickým průměrem, a tudíž menší setrvačností pokračují společně s proudem vzduchu do následujícího patra, dokud nedojde k jejich zachycení v odpovídající velikostní frakci [39].



Obrázek 5: Kaskádový impaktor

3.5.3 Hmotnostní koncentrace částic

Hmotnostní koncentrace aerosolových částic je nejběžněji stanovena z rozdílu hmotnosti čistých a exponovaných filtrů. Vzhledem k hygroscopické povaze filtrů může docházet k pohlcování vodní páry, což by mohlo negativně ovlivňovat výsledné hodnoty. Standardním způsobem minimalizace vlivu vlhkosti je ekvilibrace neboli stabilizace filtrů při konstantní teplotě a relativní vlhkosti po dobu 24–48 hodin, a to před i po vzorkování. Ekvilibrace bývá také v požadovaných případech předcházena vypalováním filtrů při vysokých teplotách, čímž jsou přečišťovány od organických polutantů. Vliv vlhkosti může být patrný i v případě zachycených částic, proto jsou využívány kontrolní vzorky, jejichž hmotnosti jsou zahrnovány ve finálním výpočtu hmotnostní koncentrace. Pomocí antistatické soupravy bývá z filtrů před vážením odstraňován elektrostatický náboj, který by mohl také způsobovat chyby během vážení [40].

3.5.4 Početní koncentrace částic

3.5.4.1 Spektrometry SMPS

Spektrometry SMPS (Scanning mobility particle sizer) jsou zařízení sloužící k měření početní koncentrace a velikostní distribuce aerosolových částic. Na vstupu SMPS bývá umístěn impaktor, k odstranění velkých částic, a následně se po průchodu neutralizérem zbylé částice přebijí na společný elektrický náboj. K rozdělení částic dochází poté v DMA (Differential Mobility Analyzer) na základě jejich elektrické pohyblivosti. Sekvenčním výstupem z DMA je monodisperzní aerosol, který je v konečném kroku detekován pomocí kondenzačního čítače částic (CPC, Condensation particle counter) [41].

3.5.4.2 Přenosný kondenzační čítač částic

Přenosný kondenzační čítač částic (mobilní CPC) je přístroj určený převážně k měření početní koncentrace částic v terénu.

V průběhu měření je vzorek vzduchu nasáván čerpadlem s konstantním průtokem přes separátor. Po nasátí je proud vzduchu nasycen parami rozpouštědla (izopropylalkohol, n-butylalkohol), které je za zvýšené teploty odpařováno. Následným ochlazením dochází ke kondenzaci rozpouštědla na částicích aerosolu. Vzniklé kapky jsou detekovány prostřednictvím optického detektoru, který funguje na principu rozptylu laserového záření [42].

3.6 Extrakční metody

Extrakce exponovaných filtrů je jednou z klíčových metod pro detekci a kvantifikaci kontaminantů při analýze ovzduší. Extrakce obvykle zahrnuje uvolnění částic z filtru do vhodného rozpouštědla. Konkrétní typ extrakce je volen na základě studovaných látek a metodách využívaných k následné analýze.

Anorganické látky jsou obvykle extrahovány ve vodě či v alkalických (NaOH, KOH) a kyselých rozpouštědlech (HCl, HNO₃). Extrakce organických látek je prováděna prostřednictvím organických rozpouštědel jako je aceton, methanol, hexan či dichlormethan.

Mezi nejběžněji využívané extrakční techniky patří ultrazvuková extrakce. Ultrazvukové vlny napomáhají rozrušení vláken filtru a urychlují difuzi rozpouštědla do vzorku. Ultrazvukový efekt je možné aplikovat v podobě ultrazvukové vodní lázně nebo sondy. Ultrazvukové sondy jsou výkonné systémy, které mají vysokou intenzitu a účinek díky možnosti ponoření sondy do vzorku. Ultrazvukové vodní lázně jsou levnější, ale neméně účinnou variantou. Tato metoda se vyznačuje rychlým provedením, možností extrahovat více vzorků a snadným použitím pro analýzu anorganických i organických látek [43].

V dnešní době již méně používanou technikou je Soxhletova extrakce. Během této techniky je filtr umístěn do extrakčního zařízení a opakovaně je proplachován horkým rozpouštědlem po dobu několika hodin. Soxhletova extrakce nalézala v minulosti využití pro širokou škálu analytů z pevných matic a u těžce extrahovatelných organických látek [44].

Mikrovlnná extrakce využívá mikrovlnné záření k uvolnění cílových látek ze vzorku do extrakčního rozpouštědla. Mikrovlnné záření poskytuje rychlé a rovnoměrné zahřátí vzorku bez nutnosti ohřevu samotného rozpouštědla. Tento přístup vyžaduje méně energie, umožňuje extrakci s menšími objemy rozpouštědel a současně je vytvářeno méně odpadu [45].

3.7 Analýza chemického složení aerosolů

Metody využívané k analýze chemického složení aerosolů jsou založeny na různých chemických a fyzikálních principech. Nejčastěji využívané metody jsou charakterizovány v následujících kapitolách.

3.7.1 Chromatografie

Chromatografie je analytická metoda využívaná k oddělování, identifikaci a zkoumání složek směsí. Princip chromatografie spočívá v distribuci složek vzorku mezi stacionární (nepohyblivou) a mobilní (pohyblivou) fází a jednotlivé sloučeniny analyzované směsi se dělí díky rozdílným fyzikálním a chemickým vlastnostem [46]. Směs analytů je unášena soustavou společně s mobilní fází a následně dochází k rozdílné interakci jednotlivých sloučenin s oběma fázemi. Výsledkem je rozdělení složek analyzované směsi na základě odlišné afinity ke stacionární a mobilní fází.

Grafickým výstupem z detektoru během chromatografického procesu je chromatogram, který vyjadřuje závislost signálu na elučním čase. Vrcholy (píky) chromatogramu odpovídají jednotlivým složkám v analyzované směsi. Základem kvantitativního vyhodnocení je určení plochy, respektive výšky píku, která odpovídá množství eluované látky. Důležitými parametry pro zpracování chromatografických dat je mez detekce (LOD – limit of detection) a mez stanovitelnosti (LOQ – limit of quantification). LOD vyjadřuje koncentraci, kdy je analytický signál výrazně odlišný od šumu a odpovídá trojnásobku šumu základní linie. LOQ charakterizuje koncentraci, při které přesnost stanovení umožňuje kvantitativní vyhodnocení, přičemž se uvažuje jako desetinásobek šumu základní linie [47].

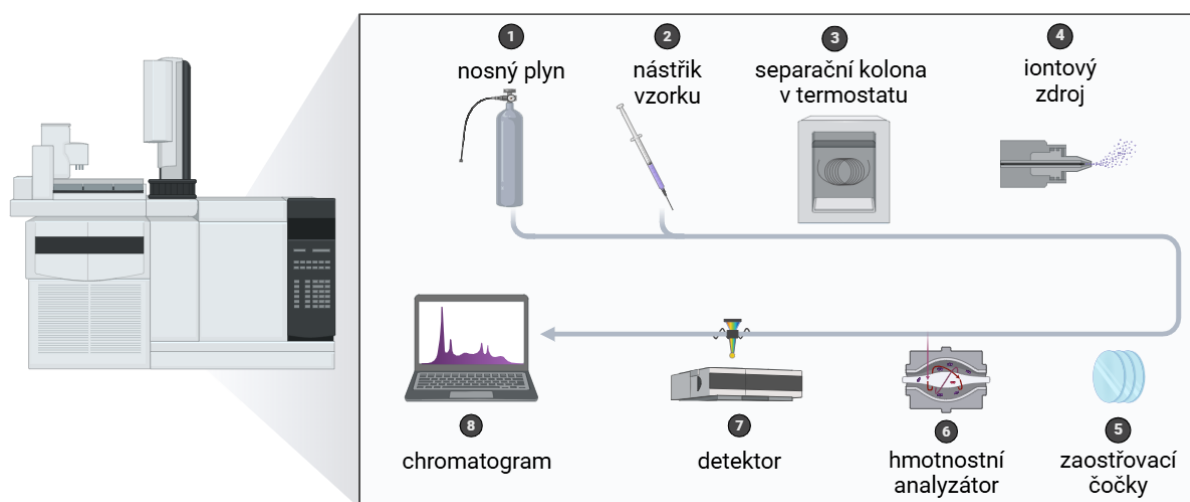
Dle skupenství mobilní fáze dělíme chromatografii na kapalinovou a plynovou (*Tabulka 1*).

Tabulka 1: Přehled chromatografických metod [48]

Metoda	Zkratka	Mobilní fáze	Stacionární fáze
Plynová rozdělovací chromatografie	GLC	plyn	kapalina
Plynová adsorpční chromatografie	GSC		pevná látka
Kapalinová rozdělovací chromatografie	LLC	kapalina	kapalina
Kapalinová adsorpční chromatografie	LSC		silikagel
Iontová chromatografie	IC		pevná látka
Gelová permeační chromatografie	GPC		porézní materiál
Tenkovrstvá chromatografie	TLC		porézní materiál
Papírová chromatografie	PC		chromatografický papír
Sloupcová chromatografie	CC		ve tvaru sloupce

3.7.1.1 Plynová chromatografie

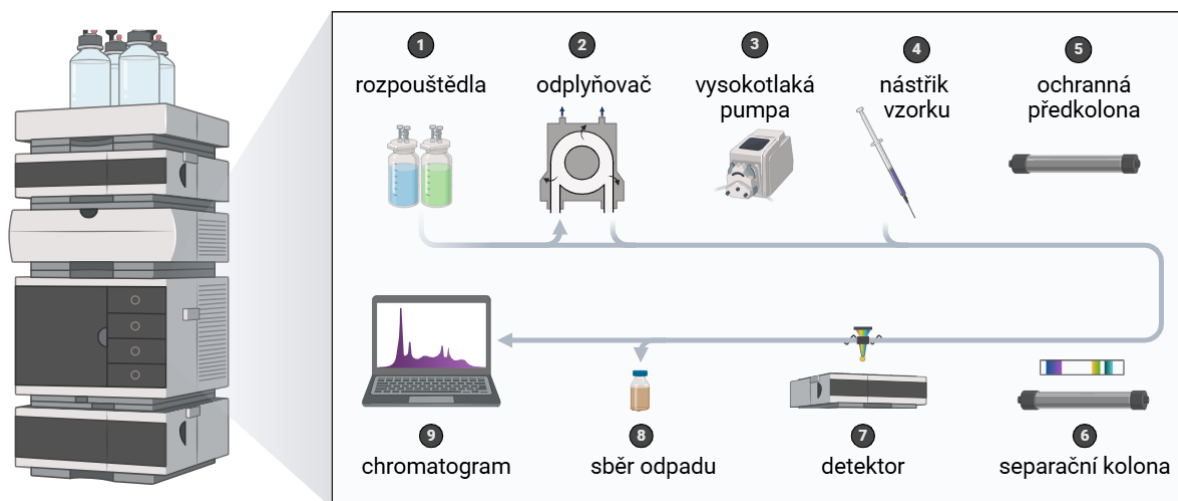
Jednou z nejrozsáhlejších chromatografických technik v rámci analýzy ovzduší je plynová chromatografie (GC, *Obrázek 6*). Tato metoda je používána k separaci a následné analýze těkavých (volatilních) látek ve směsi [48]. Mezi hlavní detektory v GC patřily v minulosti plamenový ionizační detektor (FID) či tepelně-vodivostní detektor (TCD). V současné době je nejvíce využíván hmotnostně-spektrometrický detektor (MS), který se prosadil u většiny aplikací a je charakteristický vysokou účinností a citlivostí. GC je možné využít i v případě semi-volatilních látek, kdy je ale nutné zařadit krok derivatizace neboli navázání funkční skupiny na analyzované látky za účelem zvýšení jejich bodu varu [49].



Obrázek 6: Schéma plynové chromatografie s hmotnostním spektrometrem, upraveno podle [50]

3.7.1.2 Kapalinová chromatografie

Nejčastěji používanou separační technikou tohoto typu je v dnešní době vysokoúčinná kapalinová chromatografie (HPLC, *Obrázek 7*) případně ultra-vysokoúčinná kapalinová chromatografie (UHPLC). V analýze ovzduší jsou využívány především ke stanovení organických polutantů. Složky v kapalných směsích jsou nejčastěji detekovány prostřednictvím MS, případně UV-VIS spektrometrického detektoru s diodovým polem (DAD) nebo fluorescenčního detektoru FLD [35].



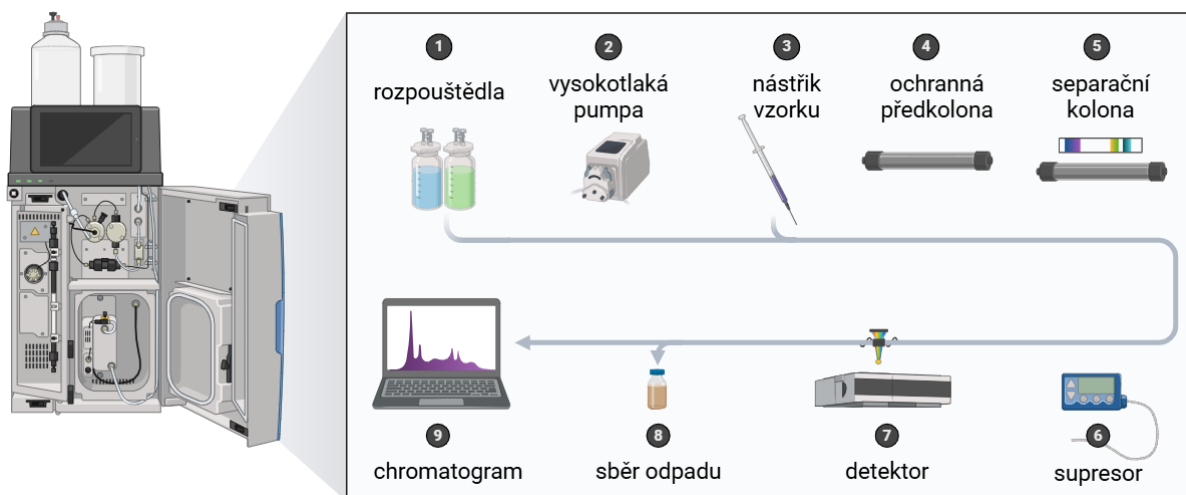
Obrázek 7: Schéma vysokoúčinné kapalinové chromatografie, upraveno podle [51]

3.7.1.3 Iontová chromatografie

Iontová chromatografie (IC, Obrázek 8) je speciálním typem kapalinové chromatografie, která byla vyvinuta pro separaci, identifikaci a stanovení koncentrace anorganických iontů a organických kyselin. Princip IC spočívá v interakci molekul analytu s povrchem stacionární fáze, ionexu (iontoměniče), který obsahuje opačně nabitě funkční skupiny oproti analytu.

Ionexy tvoří polymerní látky obsahující funkční skupiny, které jsou schopné v roztoku disociovat. Katexy, nesoucí funkční skupinu se záporným nábojem, slouží k separaci kationtů a obsahují kovalentně vázané kyselé skupiny jako je $-\text{SO}_3\text{H}$ nebo $-\text{COOH}$. Anexy, nesoucí funkční skupinu s kladným nábojem, jsou určeny k separaci aniontů a bývají tvořeny např. kovalentně vázanými aminy na vhodně vybraném nosiči (silikagel, polymer) [35].

Specifickou součástí IC je supresor, který slouží ke snížení signálu způsobeného ionty v mobilní fázi a k následnému zvýšení citlivosti detekce analyzovaných iontů [52]. IC se dále vyznačuje vysokou citlivostí, analýzou rozsáhlé škály látek schopných tvořit ionty, a poměrně snadnou obsluhou [53].



Obrázek 8: Schéma iontové chromatografie, upraveno podle [54]

3.7.2 Elektromigrační metody

Elektromigrační metody představují soubor technik, které využívají separaci sloučenin v elektrickém poli na základě jejich velikosti a náboje. Zahrnují dva elektrokinetické jevy, kterými jsou elektroforéza a elektroosmóza. Při elektroforéze dochází k přitahování iontů k opačně nabitě elektrodě, zatímco elektroosmóza spočívá v objemovém proudění kapaliny v kapiláře díky povrchovému náboji. Rychlost pohybu částice v elektrickém poli je dána elektroforetickou pohyblivostí [55].

Existuje několik typů elektroforetických metod, z nichž nejvyužívanějšími jsou kapilární elektroforéza a izotachoforéza. Principem izotachoforézy je umístění vzorku mezi dvěma elektrolyty (vedoucí a koncový) o rozdílné pohyblivosti iontů, přičemž jsou v jednom kroku separovány pouze kationty nebo jen anionty [56]. V případě kapilární elektroforézy je kapilára naplněná základním elektrolytem a díky vzniku elektroosmotického toku je možné v jednom kroku separovat kationty, anionty i neutrální sloučeniny [57].

3.7.3 Průtokové analyzátory

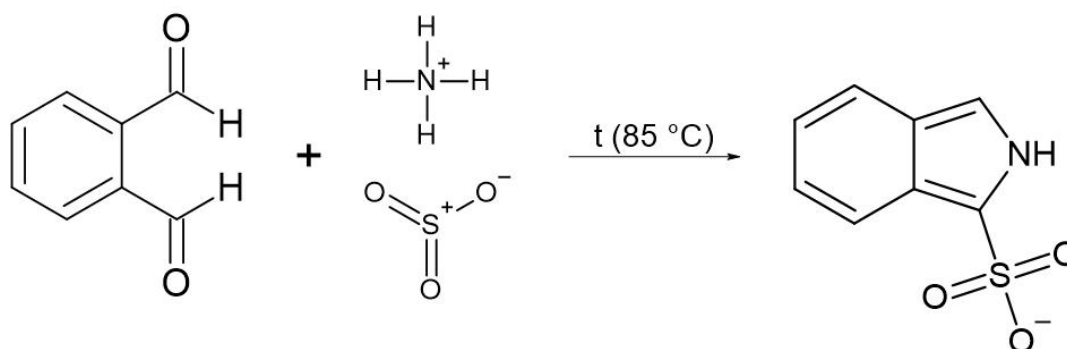
Průtokové analyzátory jsou přístroje určené k analýze kapalných a plyných vzorků v reálném čase. Základním principem této techniky je transport vzorku a reakčních roztoků v inertních hadičkách (teflon, sklo) prostřednictvím peristaltického čerpadla. Poté dochází ke vzájemnému smíchání a na základě chemické reakce či fyzikálního procesu je provedena identifikace produktu detektorem. Mezi výhody průtokových analyzátorů je řazena rychlá analýza, spotřeba malého množství vzorku, vysoká citlivost, automatizace a minimální riziko chyb způsobených lidskou manipulací. Díky zmíněným přednostem je metoda využívána v celé řadě odvětví jako je ochrana životního prostředí, farmacie, petrochemie a potravinářský průmysl [58].

Jednou z takovýchto technik je průtoková injekční analýza (FIA). FIA spočívá v dávkování vzorku do proudu nosného roztoku, kde společně s dalšími reakčními roztoky probíhají chemické reakce. Vzorek a reakční roztoky jsou smíchávány v důsledku řízené disperze s využitím laminárního proudění. Pokročilejší variantou je sekvenční injekční analýza (SIA), která umožňuje optimálnější řízení toku vzorku a reakčních činidel [59].

Kontinuální průtoková analýza (CFA) zajišťuje nepřetržitý tok vzorku, čímž je umožněno dlouhodobé a kontinuální pozorování celého procesu s vysokou citlivostí metody [60].

3.7.3.1 Kontinuální analyzátor NH_4^+

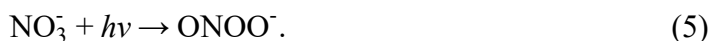
Ke stanovení koncentrace amonných iontů (NH_4^+) byl na Ústavu analytické chemie AV ČR (ÚIACH) vyvinut kontinuální průtokový analyzátor s fluorescenční detekcí (CFA-FLD). Principem analýzy je reakce amonného iontu ve fosfátovém pufru (pH 11) s ortho-ftaldialdehydem (OPA) a siřičitanovým iontem za vzniku vysoce fluorescenčního produktu isoindol-1-sulfonátu (Obrázek 9) [61][62]. Takto vzniklý isoindol-1-sulfonát je excitován primárním zářením o vlnové délce 365 nm. Následně dochází k fluorescenci, kdy je emitované (sekundární) záření detekováno fotonásobičem při vlnové délce 425 nm prostřednictvím fotonásobiče a analogově-digitálního převodníku spojeného s počítačem [63][64].



Obrázek 9: Princip detekce NH_4^+

3.7.3.2 Kontinuální analyzátor NO_3^-

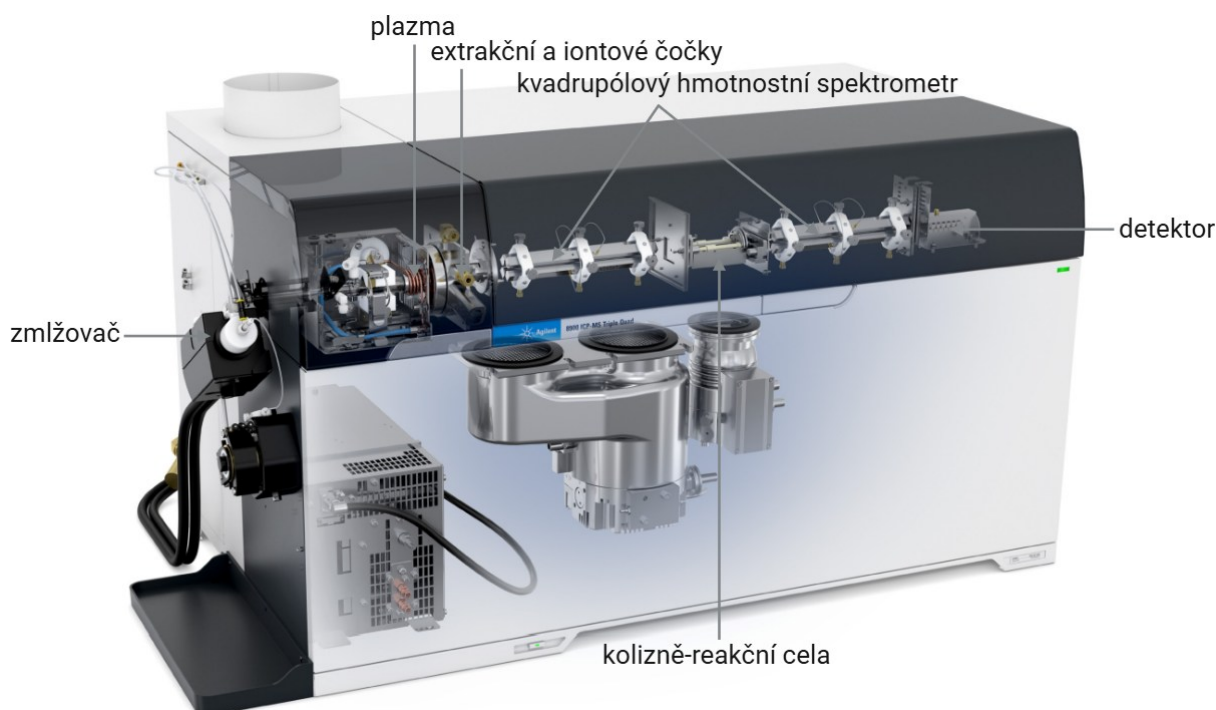
Jednou z využívaných metod ve spojení s průtokovými analyzátory je také chemiluminiscenční detekce. Tento druh detekce se vyznačuje vysokou citlivostí a širokým lineárním rozsahem. Kontinuální průtokový analyzátor dusičnanů (NO_3^-) s chemiluminiscenční detekcí byl vyvinut a optimalizován na ÚIACH, aby bylo možné sledovat koncentraci kyseliny dusičné a dusičnanů v ovzduší v reálném čase. Principem analýzy je nejprve konverze dusičnanu na peroxodusitan (ONOO^-) pomocí UV záření:



Peroxodusitan poté reaguje s luminolem (5-amino-2,3-dihydroftalazin-1,4-dion), čímž dochází ke vzniku chemiluminiscence a emitované záření je poté detekováno pomocí fotonásobiče [65].

3.7.4 Hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem

ICP-MS neboli hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem je vysoce účinná analytická metoda, která se používá ke stanovení obsahu stopových i významných koncentrací prvků v atmosférickém aerosolu. Vyznačuje se vysokou citlivostí od jednotek ppt po stovky ppm a umožňuje analyzovat téměř veškeré prvky periodické tabulky. Díky zmíněným výhodám nahrazuje ICP-MS tradičně využívané metody jako je atomová absorpční spektroskopie (AAS) nebo atomová emisní spektroskopie (AES), i přes vysoké pořizovací a provozní náklady [66]. Principem ICP-MS je propojení dvou technik – hmotností spektrometrie (MS) a indukčně vázaného plazmatu (ICP). Celý proces je zahájen zmlžením kapalného vzorku na aerosol a následně dochází k atomizaci a ionizaci prvků vzorku v horkém argonovém plazmatu. Nakonec jsou vytvořené ionty separovány na základě poměru hmotnosti a náboje (m/z) a detekovány prostřednictvím MS [67].



Obrázek 10: ICP-MS/MS Spektrometr 8900 Triple Quadrupole (Agilent Technologies), upraveno podle [68]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Materiály

4.1.1 Použité chemikálie

- Chlorid sodný p.a. (Lachema, ČR)
- Deionizovaná voda (ÚIACH, ČR)
- Destilovaná voda (ÚIACH, ČR)
- Dihydrát kyseliny šťavelové p.a. (Lach-Ner, ČR)
- Dodekahydrát hydrogenfosforečnanu sodného (Lachema, ČR)
- Dusičnan sodný p.a. (Lachema, ČR)
- Dusitan sodný p.a. (Lachema, ČR)
- Fluorid sodný p.a. (Lachema, ČR)
- Formaldehyd 37 % (Merck, Německo)
- Hydroxid draselný p.a. (Lach-Ner, ČR)
- Isopropylalkohol (Lach-Ner, ČR)
- Kyselina dusičná (Merck, Německo)
- Methanol (Honeywell, Německo)
- Ortho-ftaldialdehyd 97 % (Sigma Aldrich, USA)
- Siřičitan sodný p.a. (Lachema, ČR)
- Síran amonný p.a. (Lach-Ner, ČR)
- Síran draselný p.a. (Lach-Ner, ČR)

4.1.2 Použité pomůcky a přístroje

- Analytické mikrováhy M5P (Sartorius, Německo)
- Analytické váhy (Ohaus, Švýcarsko)
- Antistatická souprava (Mettler-Toledo, Švýcarsko)
- Automatické pipety (Biohit, Finsko)
- Běžné laboratorní vybavení
- CPC – přenosný kondenzační čítač částic, model 3007 (TSI, USA)
- Hmotnostní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem ICP-MS/MS, 8800 (Agilent Technologies, Německo)
- Injekční stříkačky (Chirana, ČR)
- Iontový chromatograf ICS-2100 (Dionex, USA)
- Kontinuální průtokový analyzátor NH_4^+ (prototyp ÚIACH, ČR)
- Kontinuální analyzátor částic PX-375 (Horiba, USA)
- Křemenné filtry, průměr 150 mm (Whatman, USA)
- Meteorologická stanice (Envitech Bohemia, ČR)
- Středněobjemový vzorkovač aerosolu Leckel SEQ47/50 (Sven Leckel, Německo)
- Stříkačkové filtry (Labicom, ČR)
- Špičky (Witeg, Německo)
- Teflonové filtry, průměr 47 mm (Pall Corporation, USA)
- Ultrazvuková vodní lázeň Teson 1 (Tesla, ČR)
- Velkoobjemové vzorkovače aerosolu DH-77 a DHA-80 (Digitel, Švýcarsko)

4.2 Roztoky

4.2.1 Příprava zásobních roztoků pro IC a CFA

Z příslušných standardů studovaných iontů byly připraveny zásobní roztoky o koncentraci 0,1 M. Navážky byly provedeny na analytických vahách do 50 ml baněk (*Tabulka 2*) a zásobní roztoky byly poté uchovávány v lednici při teplotě 4 °C a používány pro přípravu kalibračních roztoků.

Tabulka 2: Navážky standardů pro přípravu zásobních roztoků

Ion	Standard	Navážka [g]
F ⁻	NaF	0,2099
Cl ⁻	NaCl	0,2920
NO ₂ ⁻	NaNO ₂	0,3449
NO ₃ ⁻	NaNO ₃	0,4270
SO ₄ ²⁻	K ₂ SO ₄	0,8760
C ₂ O ₄ ²⁻	C ₂ H ₂ O ₄ ·2H ₂ O	0,6304
NH ₄ ⁺	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,6610

4.2.2 Příprava kalibračních roztoků pro IC a CFA

Směsné kalibrační roztoky pro vyhodnocení koncentrací aniontů pomocí IC byly připraveny ze zásobních roztoků v koncentračním rozmezí 0,5–50 μM. Kalibrační roztoky pro vyhodnocení koncentrací NH₄⁺ pomocí CFA byly připraveny ze zásobního roztoku v koncentračním rozmezí 0,02–1 μM. Kalibrační roztoky obou metod byly vždy proměřeny před měřením jednotlivých extraktů z filtrů.

4.2.3 Příprava reakčních roztoků pro CFA

4.2.3.1 Fosfátový pufr

Bylo naváženo 15,606 g dihydrogenfosforečnanu sodného, 0,756 g siřičitanu sodného a napipetováno 0,23 ml formaldehydu. Následně byl přilít 1 l deionizované vody a vše bylo důkladně promícháno, dokud nedošlo k úplnému rozpuštění. Poté byl roztok doplněn deionizovanou vodou na celkový objem 2 l a pomocí 3 M hydroxidu draselného bylo upraveno pH roztoku na hodnotu 11. Výsledný roztok byl v průběhu obou kampaní uchováván v tmavé lahvi.

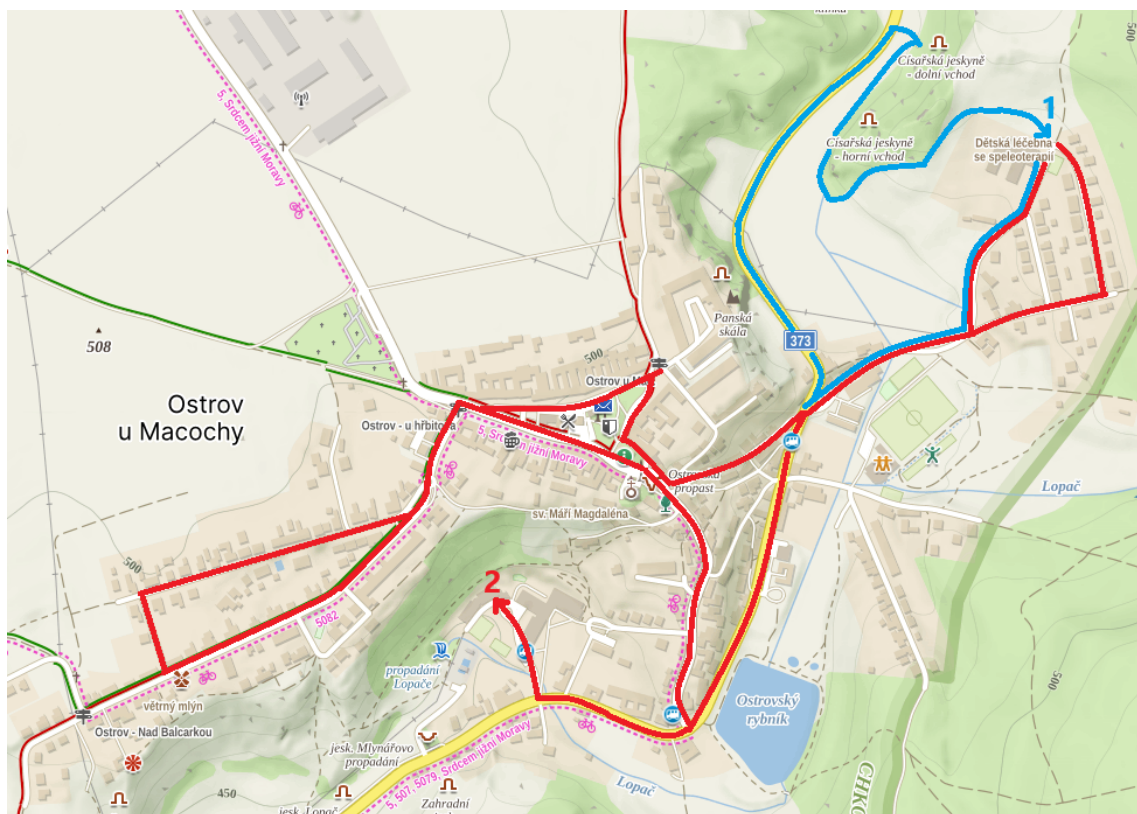
4.2.3.2 Ortho-ftaldialdehyd (OPA)

Bylo naváženo 2,678 g OPA a následně rozpuštěno v 500 ml methanolu. Následně byl roztok doplněn deionizovanou vodou na celkový objem 2 l. Výsledný roztok byl v průběhu obou kampaní uchováván v tmavé lahvi.

4.3 Metody

4.3.1 Vzorkování aerosolu

Vzorkování aerosolu bylo provedeno v rámci letní a zimní kampaně. Měření zimní kampaně bylo z důvodu nepříznivého počasí v polovině přerušeno a probíhalo tak v časových rozmezích 30.1.–6.2.2024 a 13.2.–27.2.2024. Letní kampaň probíhala v období 13.8.–27.8.2024. Cílovou lokalitou byly venkovní prostory u nového a starého objektu Dětské léčebny se speleoterapií v Ostrově u Macochy (Obrázek 11).



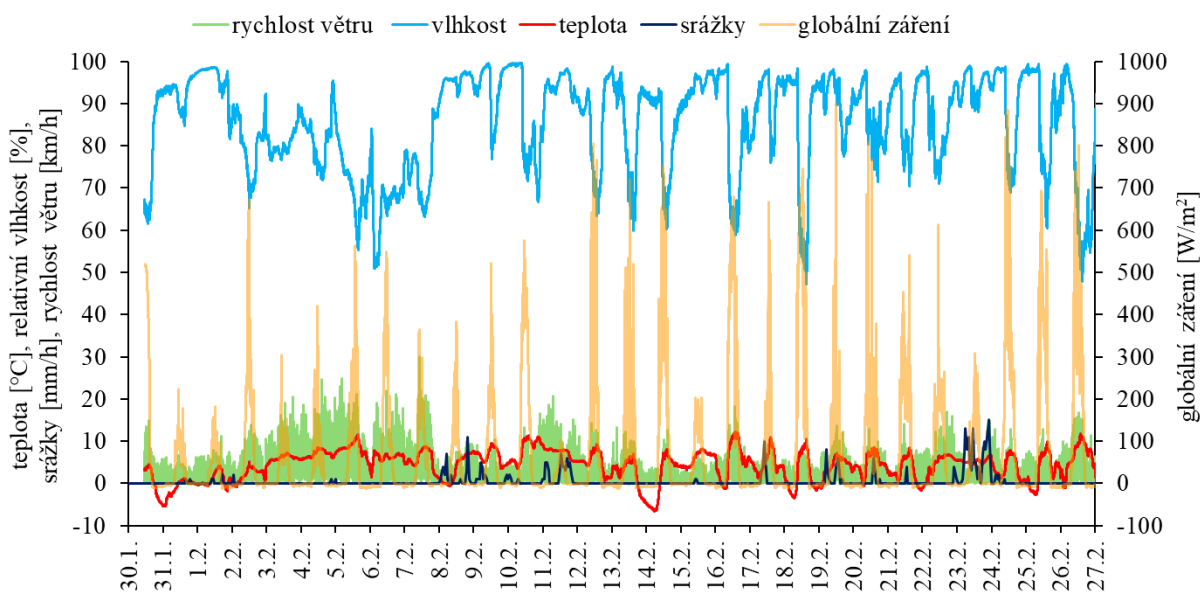
Obrázek 11: Trasa měření 1 (nová budova léčebny) a 2 (stará budova léčebny); Ostrov u Macochy

Vzorkování aerosolu pro účely této práce bylo uskutečněno prostřednictvím velkoobjemových vzorkovačů Digitel DH-77 a DHA-80 (Obrázek 12) (průtoky vzduchu 30 m³/h) a středněobjemového vzorkovače Leckel SEQ47/50 (průtok vzduchu 2,3 m³/h). Částice byly zachytávány na křemenných (Ø 150 mm) a teflonových filtrech (Ø 47 mm), přičemž jednotlivé vzorky byly odebírány ve 48hodinových intervalech.

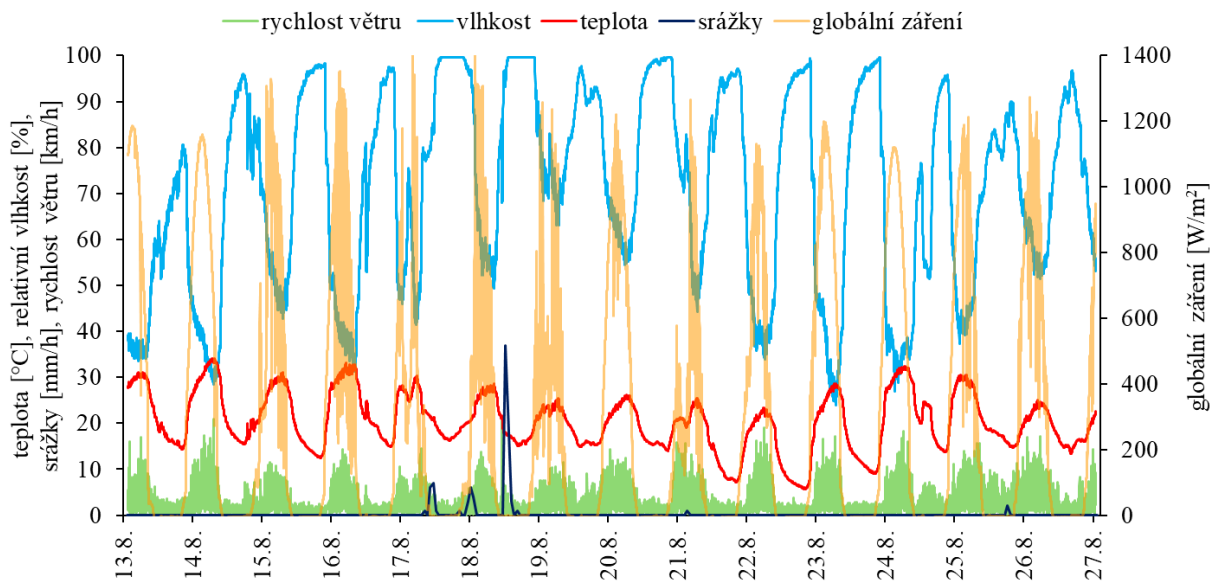


Obrázek 12: Velkoobjemový vzorkovač DHA-80

Přenosnou meteorologickou stanicí byly zaznamenávány hodnoty teploty, relativní vlhkosti vzduchu, globálního záření, rychlosti a směru větru. Jako doplňující informace byly zaznamenávány hodinové úhrny srážek v blízké stanici Sloup, která je součástí monitorovací sítě Českého hydrometeorologického ústavu (Obrázek 13) (Obrázek 14).

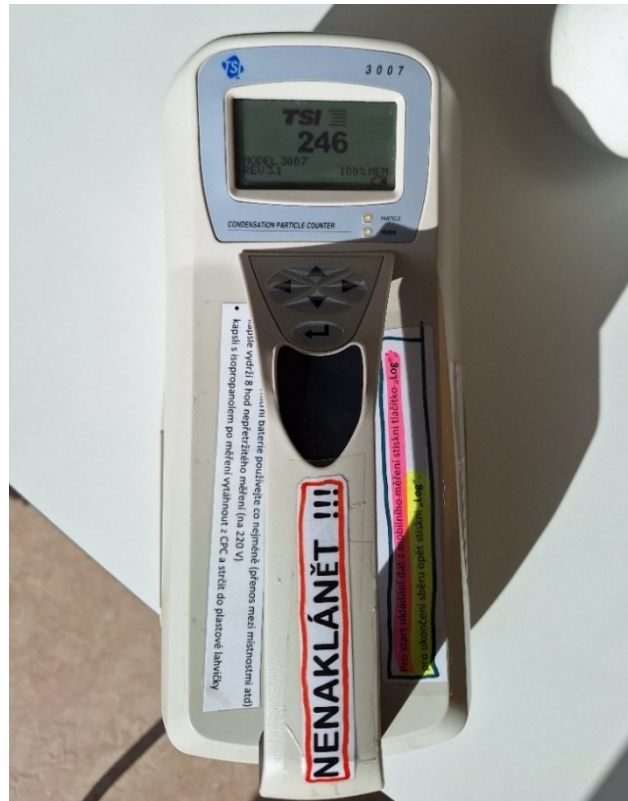


Obrázek 13: Meteorologické údaje během zimní kampaně



Obrázek 14: Meteorologické údaje během letní kampaně

V průběhu vzorkování bylo současně provedeno mobilní měření početní koncentrace částic prostřednictvím mobilního CPC (model 3007) (Obrázek 15). V Ostrově u Macochy byly stanoveny dvě měřící trasy (Obrázek 11). Trasa 1 (modrá čára) se nacházela v okolí nové budovy léčebny a Císařské jeskyně, zatímco trasa 2 (červená čára) byla vytyčena v rámci celé obce, včetně oblasti staré budovy léčebny. Přesné souřadnice byly zaznamenávány trasovací aplikací Tracklia pomocí mobilního telefonu. Rovněž bylo provedeno měření ve vnitřních prostorech současné léčebny, kde se pacienti v průběhu léčebného pobytu pohybují.



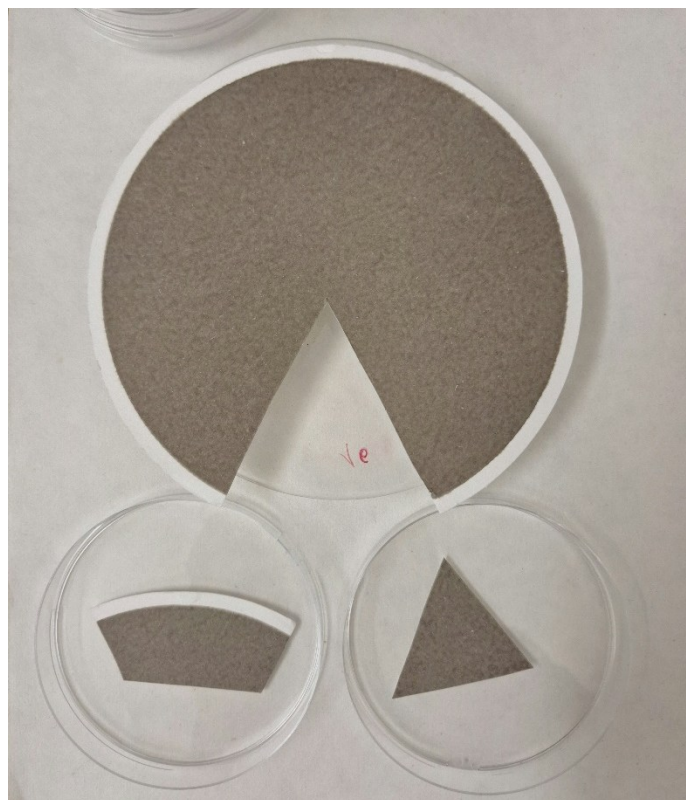
Obrázek 15: Přenosný kondenzační čítač částic – CPC, model 3007

4.3.2 Stanovení početní koncentrace částic

Naměřené početní koncentrace částic z mobilního CPC byly prostřednictvím programu Aerosol Instrument Manager 10.3. exportovány do formátu CSV. K těmto hodnotám byly přiřazeny příslušné GPS souřadnice z mobilní aplikace Tracklia. Prostřednictvím doplňku ArcGIS pro Excel byly vykresleny mapy s početními koncentracemi částic. Současně byla znázorněna mapa Císařské jeskyně a zobrazeny příslušné koncentrace částic.

4.3.3 Stanovení hmotnostní koncentrace částic

Hmotnostní koncentrace částic byla stanovena vážením čistých a exponovaných filtrů. Filtry byly před samotným vážením nejprve ekvilibrovány v mikrováhovně při teplotě 21 °C ($\pm 0,5$ °C) a relativní vlhkosti 50 % (± 2 %) po dobu 48 hodin. Prostřednictvím antistatické soupravy byl z filtrů odstraněn elektrostatický náboj a poté byly jednotlivé filtry zváženy na analytických mikrováhách a byla zapsána jejich celková hmotnost. Křemenné filtry byly během obou kampaní použity k několika různým analýzám, a proto byly před první ekvilibrací vypáleny při 500 °C po dobu 24 hodin. Po expozici a následné ekvilibraci a zvážení byly tyto filtry rozděleny na několik částí (Obrázek 16), zváženy a uloženy do mrazáku (-18 °C) pro následné analýzy.



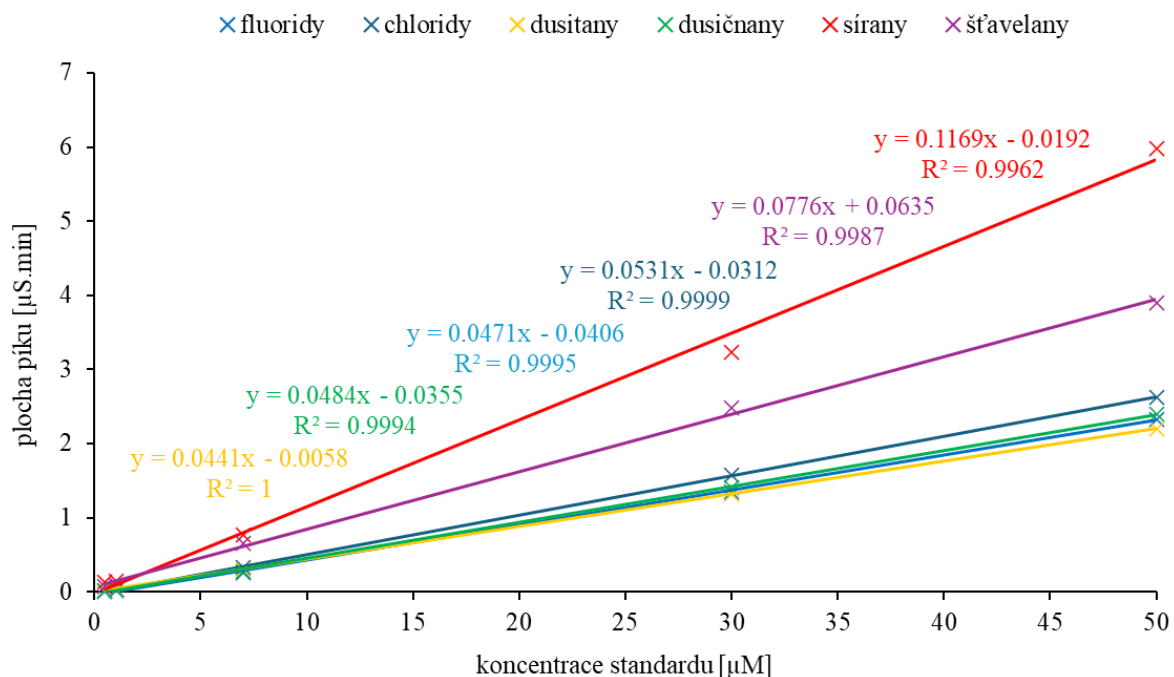
Obrázek 16: Rozstřížení exponovaného křemenného filtru

4.3.4 Extrakce exponovaných filtrů

Exponované teflonové filtry a části křemenných filtrů byly pomocí pinzety stočeny a vloženy do zkumavek. Poté bylo do zkumavek přidáno 13 ml deionizované vody. Zkumavky byly uzavřeny a extrahovány po dobu 20 minut v ultrazvukové lázni.

4.3.5 Stanovení koncentrace aniontů pomocí IC

Koncentrace studovaných aniontů (fluoridy, chloridy, dusitany, dusičnany, sírany a šřavelany) byla stanovena pomocí iontového chromatografu Dionex ICS-2100. Část extraktů z jednotlivých filtrů byla odlita do připravených 5 ml vialek s fritou a ty byly následně umístěny do autosampleru. Jako mobilní fáze byl využíván hydroxid draselný s průtokem 0,38 ml/min a gradientem 2–50 mM. Gradient mobilní fáze byl nastaven tak, aby došlo k optimální separaci daných aniontů. Analýza jednoho vzorku probíhala po dobu 30 minut. Koncentrace aniontů v jednotlivých vzorcích byly vyhodnoceny pomocí kalibrační řady v koncentračním rozmezí 0,5–50 μM (Obrázek 17). Meze detekce a stanovitelnosti studovaných aniontů jsou uvedeny v *Tabulce 3*.



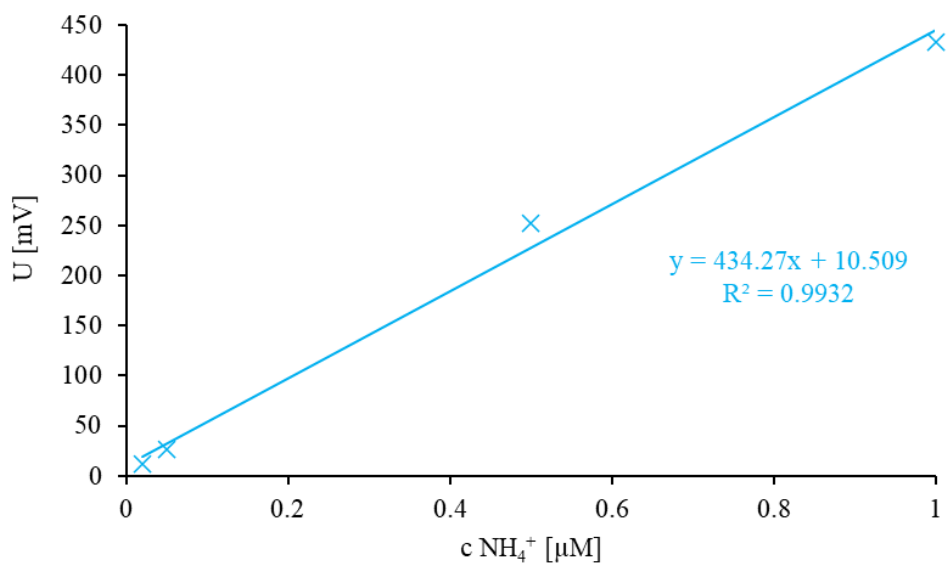
Obrázek 17: Kalibrační křivky pro vyhodnocení koncentrace aniontů

Tabulka 3: Meze detekce a stanovitelnosti aniontů

Aniont	Digitel		Leckel	
	LOD [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	LOQ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	LOD [$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$]	LOQ [$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$]
Fluoridy	0,99	3,29	0,12	0,38
Chloridy	1,39	4,62	0,24	0,79
Dusitany	2,17	7,23	0,35	1,17
Dusičnany	2,61	8,69	0,37	1,21
Sírany	1,66	5,52	0,38	1,24
Šťavelany	2,25	7,52	0,40	1,33

4.3.6 Stanovení koncentrace NH_4^+ pomocí CFA

Zbylé extrakty z filtrů byly nejprve přečištěny stříkačkovými filtry (1,5 μm) od uvolněných vláken z křemenných filtrů. Vzhledem k vysoké citlivosti fluorescenční detekce (LOD = 0,57 nM NH_4^+) byly jednotlivé extrakty 100krát zředěny a zbylý objem extraktů byl uchován pro analýzu kationtů prostřednictvím ICP-MS. Koncentrace amonných iontů v jednotlivých vzorcích byly vyhodnoceny prostřednictvím kalibrační řady v koncentračním rozmezí 0,02–1 μM (Obrázek 18).



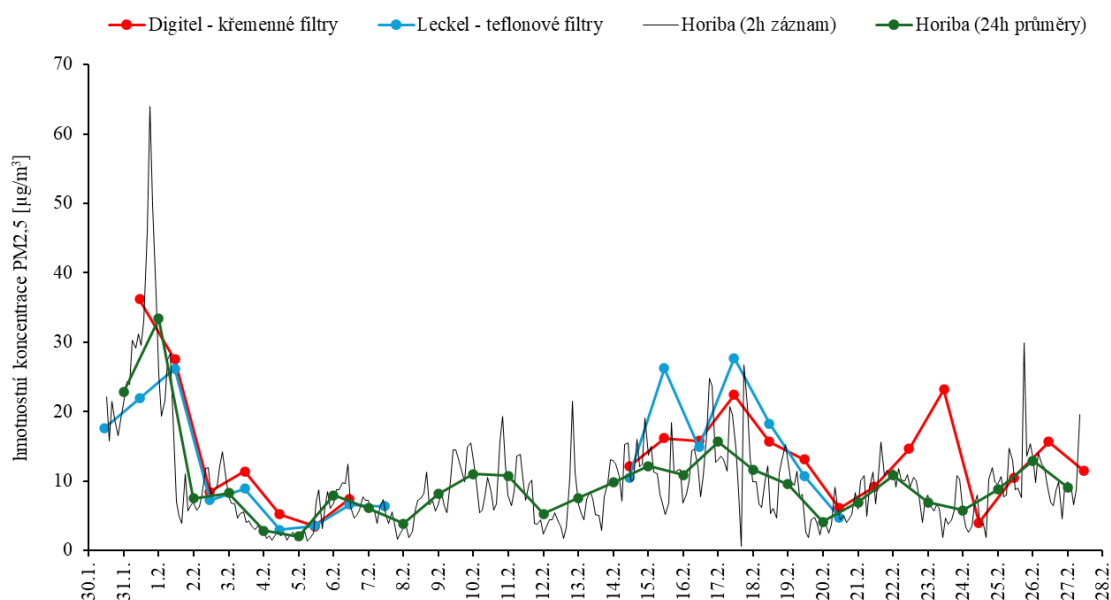
Obrázek 18: Kalibrační křivka pro vyhodnocení koncentrace NH₄⁺

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

V rámci experimentální části této diplomové práce bylo uskutečněno vzorkování aerosolu v oblasti Dětské léčebny se speleoterapií v Ostrově u Macochy. Hlavním předmětem práce bylo porovnání obsahu iontů v PM_{2,5} aerosolu ve venkovních prostorách u starého a nového objektu dětské léčebny v průběhu zimního a letního období.

5.1 Hmotnostní koncentrace PM_{2,5} aerosolu

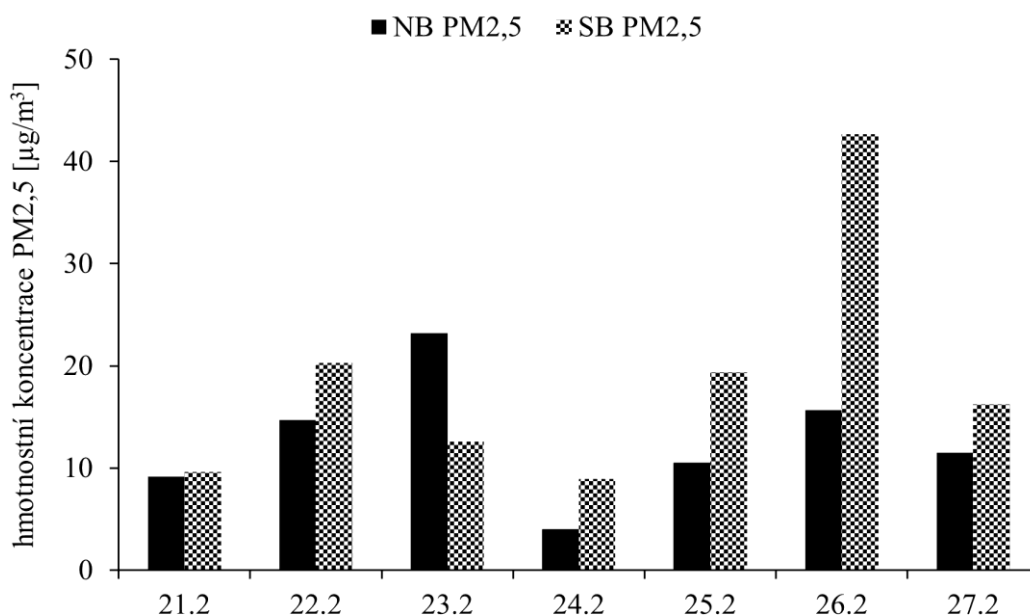
Vzhledem k celkovému množství prováděných analýz PM_{2,5} aerosolu (hmotnostní koncentrace, koncentrace aniontů a kationtů, celkový obsah prvků, organický/elementární uhlík, PAHs atd.) v rámci každé kampaně a omezenému množství vzorkovačů, bylo nejprve nutné provést porovnávací měření. V rámci zimní kampaně byly u nové budovy mezi sebou porovnávány výsledné hodnoty z různých typů vzorkovačů (Digitel, Leckel, Horiba) a filtrů (křemenné, teflonové). Výsledné hmotnostní koncentrace PM_{2,5} aerosolu jsou uvedeny na *Obrázku 19*. Průměrná hodnota hmotnostní koncentrace stanovená pomocí vzorkovače Digitel na křemenných filtrech činila $13,8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($3,5\text{--}36,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), průměrná hodnota stanovená prostřednictvím vzorkovače Leckel a teflonových filtrů činila $13,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($2,9\text{--}27,7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) a pomocí vzorkovače Horiba byla tato hodnota $9,7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($2,1\text{--}33,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Rozdílné hodnoty hmotnostních koncentrací jsou dány jednak principem vzorkování a také použitým materiálem filtrů [69]. Křemenné filtry jsou standardně využívanou metodou pro určení hmotnostní koncentrace aerosolu, a proto byly výsledné hodnoty právě z těchto filtrů vyhodnocovány ve všech dalších měřeních. Kontinuální analyzátor Horiba byl primárně využit pro určení celkové koncentrace prvků v PM_{2,5} aerosolu.



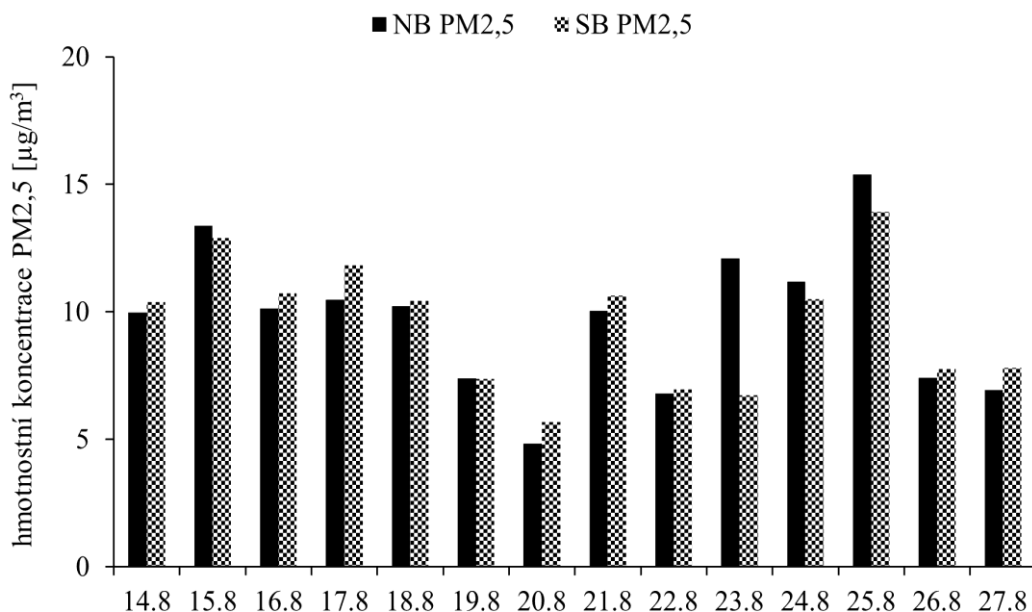
Obrázek 19: Porovnání hmotnostních koncentrací PM_{2,5} aerosolu naměřených různými typy vzorkovačů a filtrů

Hmotnostní koncentrace částic PM_{2,5} aerosolu naměřená v rámci zimního období (Obrázek 20) dosahovala v průměru hodnoty 15,0 μg·m⁻³ (3,5–42,7 μg·m⁻³). V letním období (Obrázek 21) odpovídala průměrná hmotnostní koncentrace hodnotě 9,6 μg·m⁻³ (4,8–15,4 μg·m⁻³). Vyšší hmotnostní koncentrace PM_{2,5} aerosolu v průběhu zimního období lze vysvětlit příspěvkem z vytápění domácností [70].

V průběhu zimní (21.–27.2.) a letní (14.–27.8.) kampaně byly porovnávány hodnoty hmotnostních koncentrací u nové budovy léčebny (NB) a staré budovy léčebny (SB). Průměrná hmotnostní koncentrace v zimním období v blízkosti staré budovy činila 18,5 μg·m⁻³ (8,9–42,7 μg·m⁻³) a u nové budovy 12,7 μg·m⁻³ (4,0–23,2 μg·m⁻³). V letním období byla průměrná hodnota hmotnostní koncentrace u staré budovy stanovena na 9,6 μg·m⁻³ (5,7–13,9 μg·m⁻³) a u nové budovy 9,7 μg·m⁻³ (4,8–15,4 μg·m⁻³). Z uvedených hodnot je patrné, že v zimním období dosahují naměřené hmotnostní koncentrace PM_{2,5} aerosolu v okolí staré budovy vyšších hodnot v porovnání s naměřenými hodnotami v okolí budovy nové. Tento rozdíl je možno vysvětlit lokalitou jednotlivých budov. Stará budovy léčebny se nachází přibližně ve středu Ostrova u Macochy (Obrázek 11) v údolí potoka Lopače, kudy vede hlavní silnice. Nová budova leží na severovýchodním okraji Ostrova u Macochy, na kopci, v těsné blízkosti lesa, kde lze předpokládat menší znečištění ovzduší automobilovou dopravou [71] nebo lokálními topeništi [70]. Hodnoty naměřené v letním období na obou lokalitách vykazovaly výrazně menší rozdíly v hmotnostních koncentracích PM_{2,5} aerosolu (průměr 1,9 %) oproti zimním hodnotám (průměr 31,6 %). Mírně vyšší hmotnostní koncentrace u nové budovy v letních měsících mohou být způsobeny příspěvkem sekundárního aerosolu vznikajícího z přírodních zdrojů (emise biogenních volatilních látek, např. isopren nebo monoterpeny) [72].



Obrázek 20: Hmotnostní koncentrace PM_{2,5} aerosolu během zimní kampaně



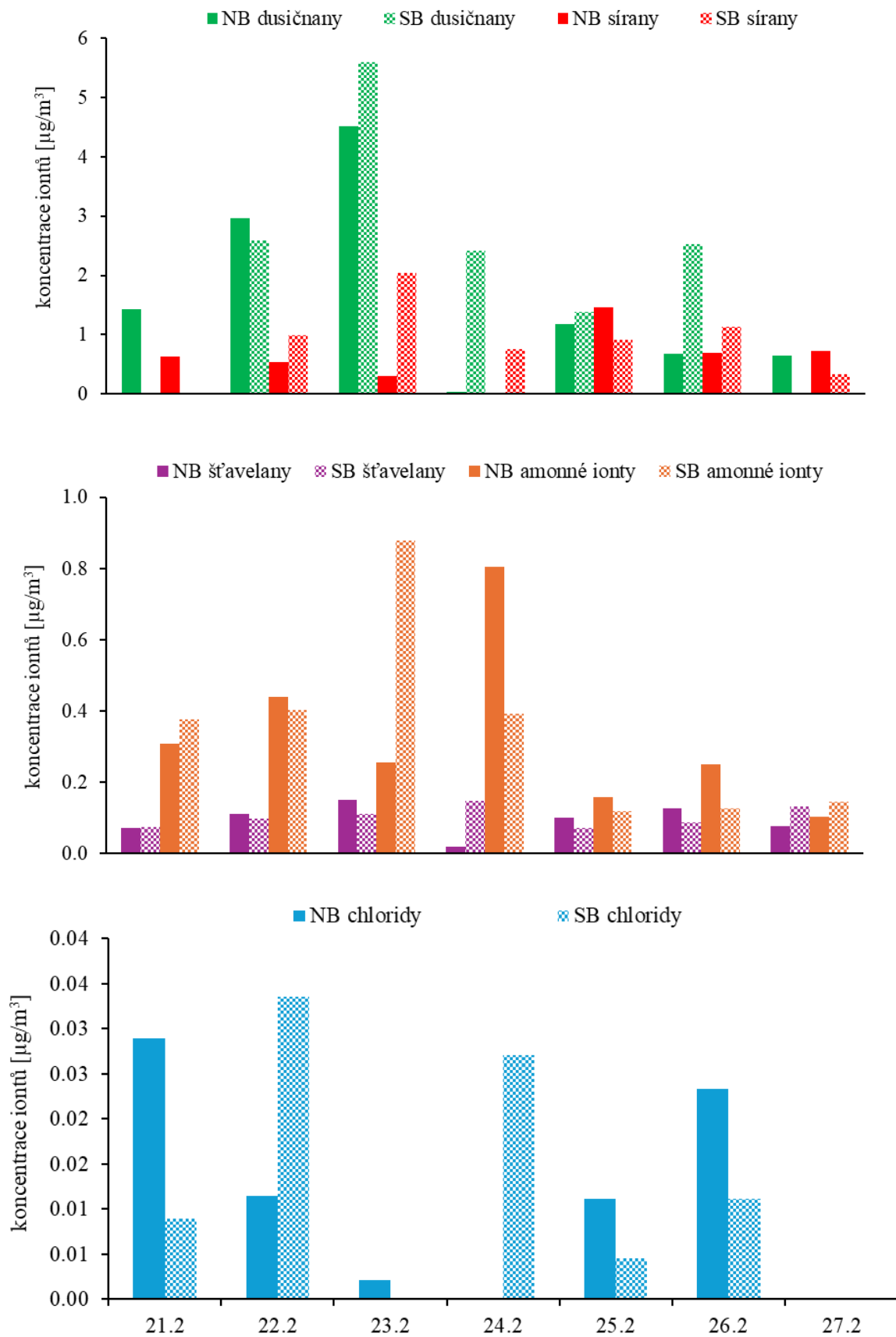
Obrázek 21: Hmotnostní koncentrace PM2,5 aerosolu během letní kampaně

5.2 Koncentrace iontů v PM2,5 aerosolu

Při chemické analýze PM2,5 aerosolu byla pro stanovení fluoridů, chloridů, dusitanů, dusičnanů, síranů a šťavelanů použita IC [73][74] a pro stanovení amonných iontů byla použita metoda CFA [61][62]. Koncentrace iontů v rámci zimní kampaně jsou uvedeny na *Obrázku 22* a průměrné hodnoty v *Tabulce 4*. Nejvyšší průměrné koncentrace byly zaznamenány u dusičnanů, následované sírany, amonnými ionty, šťavelany a chloridy. Při porovnání měřených lokalit byly znatelně vyšší koncentrace změřeny u dusičnanů (44 %) a síranů (29 %) v oblasti staré budovy léčebny. U dalších iontů již nebyly rozdíly tak významné, ale vyšších průměrných hodnot bylo vždy dosaženo u staré budovy (šťavelany 10 %, chloridy 10 %, amonné ionty 5 %). Koncentrace fluoridů a dusitanů se pohybovaly pod detekčním limitem.

Tabulka 4: Koncentrace studovaných iontů v PM2,5 aerosolu během zimní kampaně

Ionty	Nová budova		Stará budova	
	Ø [µg·m ⁻³]	rozsah [µg·m ⁻³]	Ø [µg·m ⁻³]	rozsah [µg·m ⁻³]
Dusičnany	1,63	0,03–4,52	2,90	1,38–5,59
Sírany	0,73	0,30–1,46	1,02	0,32–2,03
Amonné ionty	0,33	0,10–0,80	0,35	0,12–0,88
Šťavelany	0,09	0,02–0,15	0,10	0,07–0,15
Chloridy	0,02	0,01–0,03	0,02	0,01–0,03



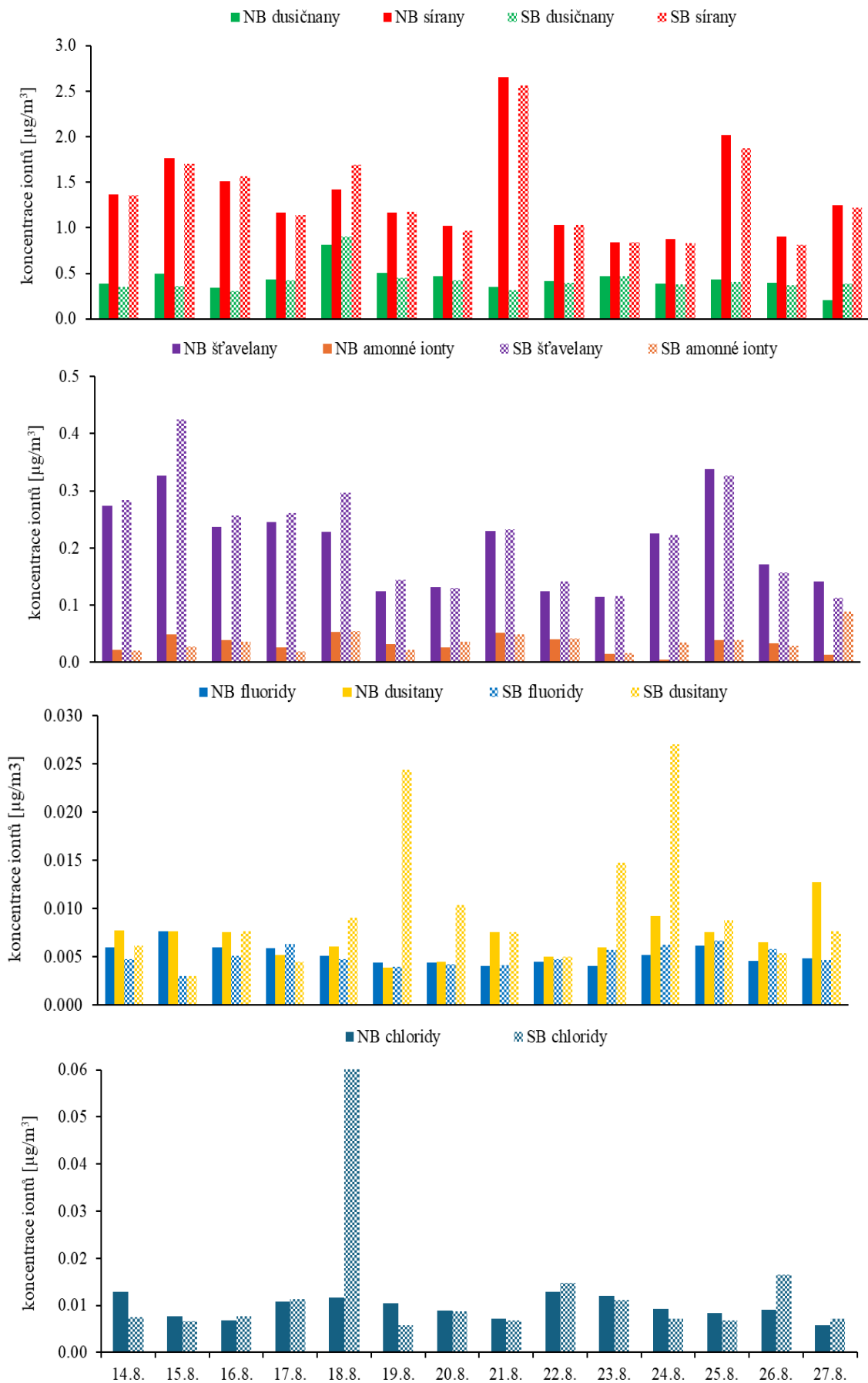
Obrázek 22: Koncentrace ionů v $\text{PM}_{2.5}$ aerosolu během zimní kampaně

Koncentrace iontů v rámci letní kampaně jsou uvedeny na *Obrázku 23* a průměrné hodnoty v *Tabulce 5*. Nejvyšší průměrné koncentrace byly, na rozdíl od zimy, zaznamenány u síranů, následované dusičnany, šťavelany, amonnými ionty, chloridy, dusitany a fluoridy. Při porovnání lokalit nové a staré budovy nebyly zjištěny žádné významné rozdíly v koncentracích jednotlivých iontů.

Tabulka 5: Koncentrace studovaných iontů v PM_{2,5} aerosolu během letní kampaně

Ionty	Nová budova		Stará budova	
	ø [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	rozsah [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	ø [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	rozsah [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
Sírany	1,36	0,84–2,66	1,34	0,81–2,56
Dusičnany	0,43	0,21–0,81	0,42	0,31–0,91
Šťavelany	0,21	0,11–0,34	0,22	0,11–0,42
Amonné ionty	0,03	0,01–0,05	0,04	0,02–0,09
Chloridy	0,010	0,006–0,013	0,013	0,006–0,063
Dusitany	0,007	0,004–0,013	0,010	0,003–0,027
Fluoridy	0,005	0,004–0,008	0,005	0,003–0,007

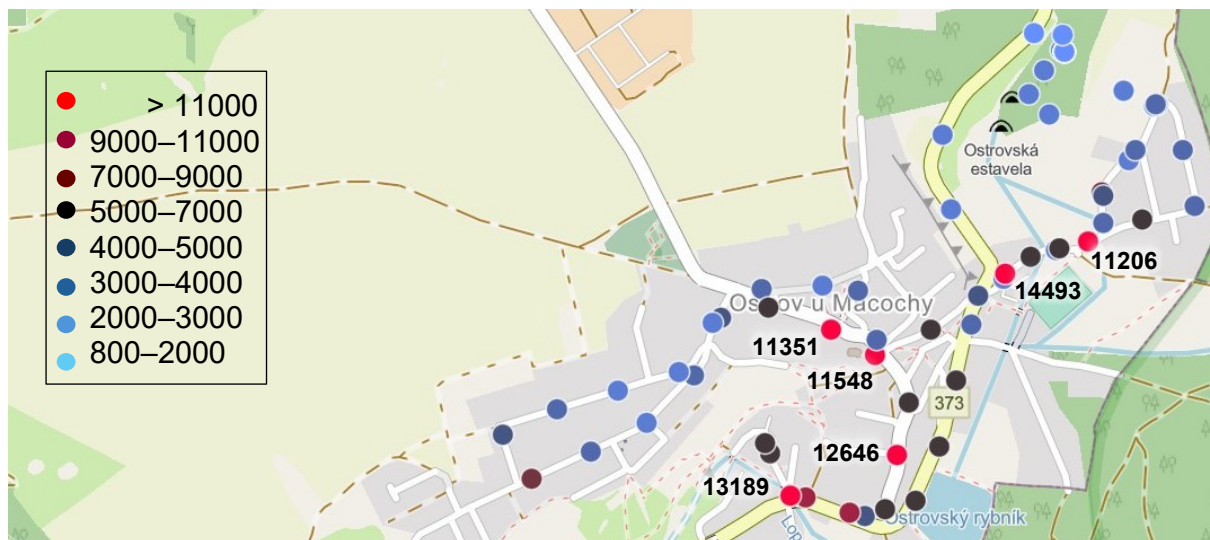
Porovnáním výsledků z obou kampaní jsou vidět znatelné poklesy koncentrací v letním období u dusičnanů a amonných iontů, což potvrzuje jako hlavní zdroj vytápění v zimním období. Dalším důvodem jsou vyšší letní teploty (*Obrázek 14*), kdy těkavější sloučeniny, jako je dusičnan amonný, přechází do plynné fáze [75]. Vyšší koncentrace u síranů a šťavelanů v letním období jsou způsobeny fotochemickými reakcemi, které v atmosféře snáze probíhají za vyšších hodnot globálního záření (*Obrázek 14*). Šťavelany mohou být také uvolňovány z přírodních zdrojů, jako jsou rostliny a půdní mikroorganismy, jejichž aktivita je maximální v letních měsících [76]. Vyšší koncentrace chloridů v zimním období mohly být způsobeny resuspenzí posypové soli na silnice [77] [78]. Výsledky koncentrací jednotlivých iontů obsažených v PM_{2,5} aerosolu ukazují, že nová lokalita je pro umístění dětské léčebny vhodnější.



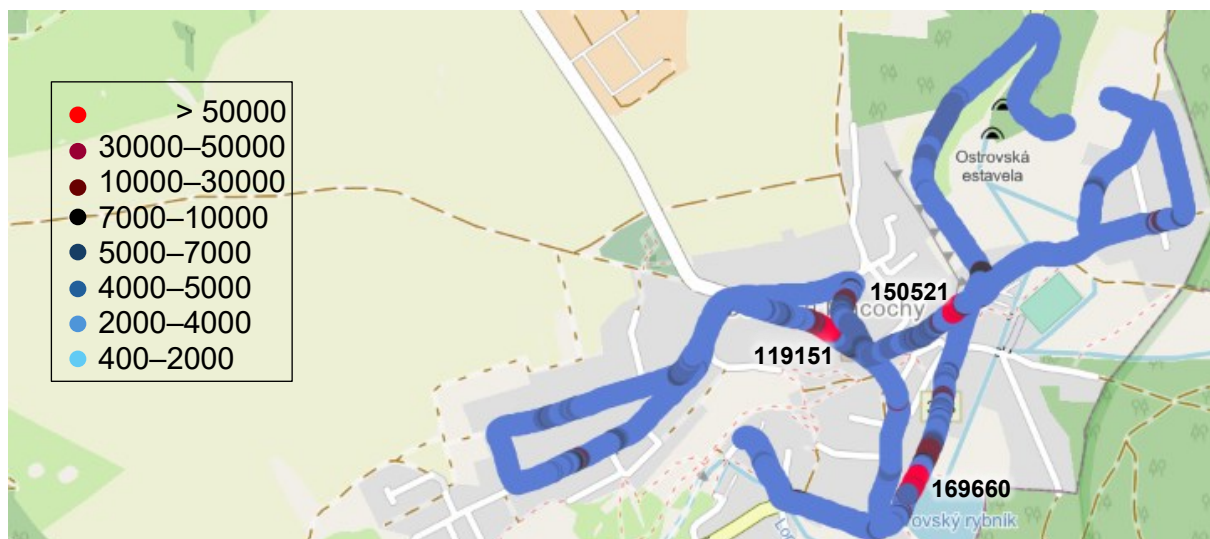
Obrázek 23: Koncentrace iontů v $PM_{2.5}$ aerosolu během letní kampaně

5.3 Početní koncentrace částic

Po změření početních koncentrací částic prostřednictvím mobilního CPC a následným zpracováním dat byly výsledné hodnoty vykresleny do map jednotlivých tras v rámci zimní a letní kampaně. V průběhu zimy byly průměrné hodnoty v CPC ukládány v 1 min intervalech (Obrázek 24), kdežto v létě byly, kvůli předpokládaným menším koncentracím, zaznamenávány vteřinové hodnoty (Obrázek 25). To zároveň umožnilo přesnější zachycení zdroje částic. Mapy s dalšími měřeními v jednotlivých dnech jsou uvedeny v Přílohách 10.1 a 10.2.



Obrázek 24: Početní koncentrace částic [č/cm³] v Ostrově u Macochy 23.2.2024 (11:15–12:30)



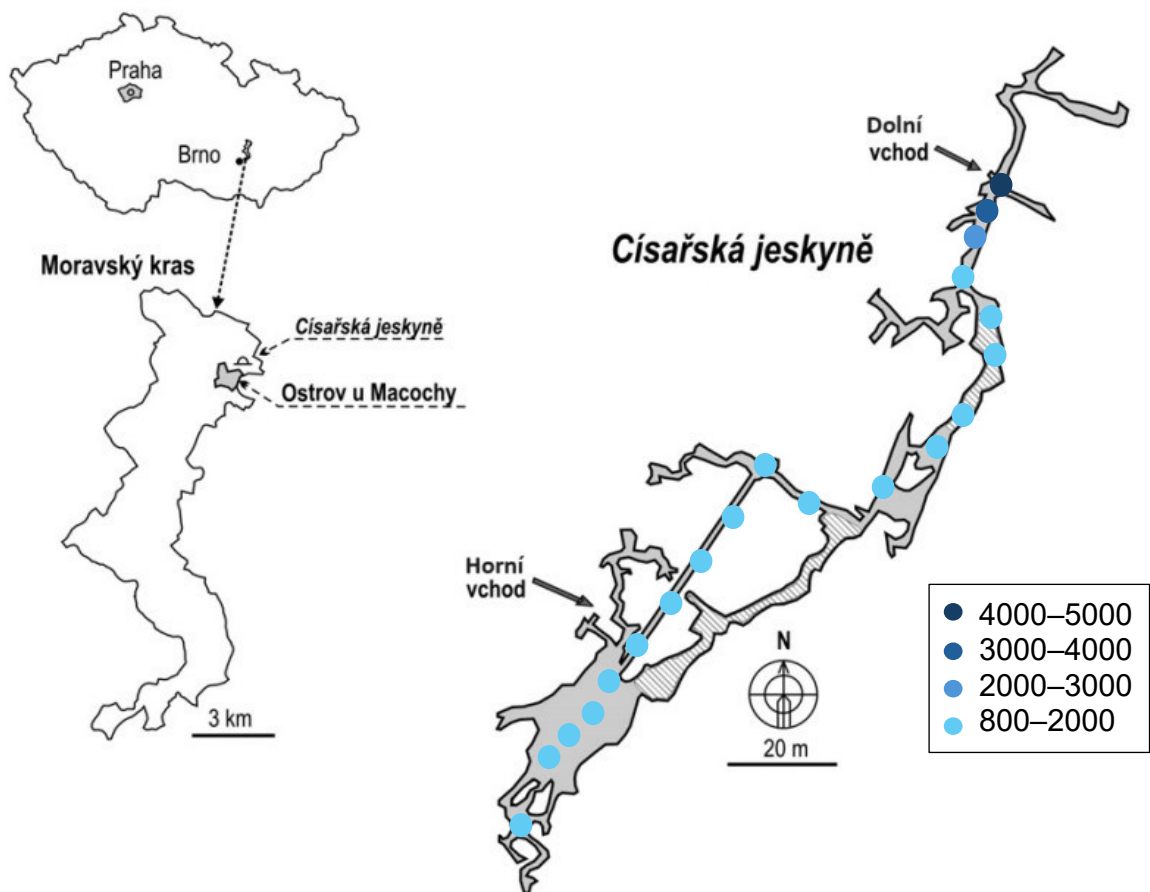
Obrázek 25: Početní koncentrace částic [č/cm³] v Ostrově u Macochy 23.8.2024 (10:10–11:30)

Nejvyšší početní koncentrace v průběhu obou kampaní byly zaznamenány zejména v okolí silnice, kde je hlavním zdrojem aerosolu automobilová doprava, respektive výfukové plyny z vozidel. V této souvislosti byl také znatelný rozdíl v typu motoru automobilu. Po průjezdu aut s benzínovým motorem vzrůstaly hodnoty o několik stovek částic/cm³, kdežto v případě aut s diesellovým motorem se hodnoty zvyšovaly až o několik tisíc částic/cm³. Důvodem je rozdílné množství emitovaných oxidů dusíku a pevných částic do ovzduší. Benzínovými motory je emitováno méně oxidů dusíku a více CO₂, naopak diesellové motory produkují méně CO₂ a více pevných částic. Variabilita ve složení a míře emisí je dále závislá na stáří a typu daného vozidla, splňování emisních norem, následně úpravě výfukových plynů a přítomnosti filtru částic [71]. Dalším důvodem vyšších koncentrací v blízkosti hlavní silnice mohla být resuspenze silničního prachu [77].

Rozdíl v koncentraci částic byl také patrný v závislosti na časovém rozmezí měření, kdy v odpoledních hodinách došlo k vzrůstu hodnot z důvodu četnějšího vytápění. V zimním období byly také zaznamenány místy zvýšené koncentrace částic v západní části obce, pocházející z lokálního vytápění domů (*Příloha 10.1*).

Během letní kampaně (20. 8. 2024) byla zaznamenána zvýšená koncentrace částic při průchodu kolem zadní části nové budovy léčebny, kde se nachází kuchyně a kde v době vzorkování (10:10–11:20) byla otevřena okna a zapnuto odsávání z digestoří. Hlavní chemické sloučeniny, které jsou emitovány v důsledku vaření, zahrnují mastné kyseliny, dikarboxylové kyseliny, steroly, polycyklické aromatické uhlovodíky (PAHs), alkany a laktony. Složení kuchyňského aerosolu může být různorodé v závislosti na mnoha faktorech jako je konkrétní typ přípravy jídla (např. smažení, grilování, pečení), použité suroviny či teplota vaření [79]. Navzorkování takového aerosolu pravděpodobně způsobilo zahlcení CPC, čímž došlo ke zkreslení výsledných dat neustále se zvyšující početní koncentrací i po opuštění zdroje (*Příloha 10.2*).

Kvůli srovnání bylo měření početní koncentrace částic provedeno během obou kampaní i ve vnitřních prostorách nové léčebny (*Tabulka 6 a Tabulka 7*) a uvnitř Císařské jeskyně (*Obrázek 26, Obrázek 33, Obrázek 37*). V průběhu obou kampaní byly v budově naměřeny nejvyšší hodnoty koncentrací částic v jídelních prostorech, což opět poukazuje na vznik částic v průběhu vaření [79]. Příznivě nízké hodnoty byly v obou kampaních zaznamenány u bazénu, kde jsou díky využití slané vody zajišťovány podpůrné léčebné procedury. Nízké hodnoty naměřené také uvnitř Císařské jeskyně, ukazují kvalitu jeskynního klimatu, který není příliš ovlivněn okolním prostředím. Zvýšené koncentrace částic naměřené 16. 2. 2024 u dolního vchodu (*Obrázek 26*), který se nachází v těsné blízkosti hlavní silnice, byly způsobeny dlouhodobým otevřením dveří při úpravě vnitřních prostor jeskyně.



Obrázek 26: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Císařské jeskyni 16.2.2024 (13:00–13:20)

Tabulka 6: Početní koncentrace částic ve vnitřních prostorách dětské léčebny (16.2.2024)

místnost	koncentrace [$\text{č}/\text{cm}^3$]
dětské pokoje	3864
klubovna	4150
tělocvična	1091
bazén	694
jídelna	23265
učebna	3424
klimatizace	14459

Tabulka 7: Početní koncentrace částic ve vnitřních prostorách dětské léčebny (23.8.2024)

místnost	koncentrace [$\text{č}/\text{cm}^3$]
dětské pokoje	3639
klubovna	3678
tělocvična	1600
bazén	657
jídelna	25212
učebna	2975
sušárna na spacáky	3464

6 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla provedena analýza PM_{2,5} aerosolu v oblasti Dětské léčebny se speleoterapií v Ostrově u Macochy během zimního (30.1.–27.2.) a letního (13.–27.8.) období v roce 2024. Vzorkování aerosolu pro následné analýzy bylo uskutečněno pomocí velkoobjemových vzorkovačů Digitel DH-77 a DHA-80 a středněobjemového vzorkovače Leckel SEQ47/50. Během obou kampaní bylo současně provedeno měření početní koncentrace aerosolu pomocí mobilního CPC na dvou trasách v rámci obce, uvnitř nového objektu léčebny a v Císařské jeskyni. Cílem práce bylo porovnání obsahu iontů v PM_{2,5} aerosolu v okolí nového a starého objektu léčebny.

Tato práce byla vypracována jako součást komplexního měření v rámci grantu AV ČR a regionální spolupráce s krajem ČR pod názvem: Charakterizace atmosférických aerosolů v ovzduší v okolí Dětské léčebny se speleoterapií v Ostrově u Macochy. Kvůli velkému množství prováděných analýz v rámci grantu bylo nutné během zimní kampaně nejprve provést porovnávací měření s různými druhy vzorkovačů a filtrů. Na základě dílčích výsledků se poté během zimní a navazující letní kampaně volily další postupy.

Vážením filtrů byly stanoveny hodnoty hmotnostních koncentrací PM_{2,5} aerosolu. Exponované filtry byly podrobeny analýze pomocí IC a CFA, a z výsledků byly vypočítány koncentrace fluoridů, chloridů, dusitanů, dusičnanů, síranů, šťavelanů a amonných iontů v PM_{2,5} aerosolu.

Provedenými analýzami bylo potvrzeno, že nové umístění dětské léčebny je pro léčbu dětí s respiračními onemocněními vhodnější. Původní budova se nacházela přibližně ve středu obce v blízkosti hlavní silnice, kde bylo díky analýzám možné sledovat vyšší koncentrace PM_{2,5} aerosolu především během zimního období. Nová budova léčebny je umístěna na okraji obce, na kopci, poblíž Císařské jeskyně. Ze získaných výsledků měření vyplývá, že tato lokalita je, zejména v zimě, méně zasažena aerosoly ze zdrojů, jako jsou automobilová doprava, a především vytápění domácností. Doplňující měření byly dále provedeny uvnitř léčebny a Císařské jeskyně, kde byla potvrzena vysoká kvalita jeskynního klima, neovlivněného okolním prostředím.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LIČBINSKÝ, Roman. *Aerosol v atmosféře krasové jeskyně*. Disertační práce. Brno: Masarykova universita, Přírodovědecká fakulta, Ústav geologických věd, 2020.
- [2] BRANIŠ, Martin a HŮNOVÁ, Iva (ed.). *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. Praha: Univerzita Karlova, Nakladatelství Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.
- [3] SPURNÝ, Zdeněk. *Atmosférická ionizace*. Cesta k vědění. Praha: Academia, 1985.
- [4] GRZYWA-CELIŃSKA, Anna; KRUSIŃSKI, Adam a MILANOWSKI, Janusz. 'Smoging kills' - Effects of air pollution on human respiratory system. Online. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2020, roč. 27, č. 1, s. 1-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.26444/aaem/110477>. [cit. 2025-02-10].
- [5] VIANA, M.; PEY, J.; QUEROL, X.; ALASTUEY, A.; DE LEEUW, F. et al. Natural sources of atmospheric aerosols influencing air quality across Europe. Online. *Science of The Total Environment*. 2014, roč. 472, s. 825-833. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.140>. [cit. 2024-12-20].
- [6] NAMASIVAYAM, S. Karthick Raja; PRIYANKA, S.; LAVANYA, M.; SHREE, S. Krithika; FRANCIS, A.L. et al. A review on vulnerable atmospheric aerosol nanoparticles: Sources, impact on the health, ecosystem and management strategies. Online. *Journal of Environmental Management*. 2024, roč. 365, s. 121-644. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121644>. [cit. 2024-11-08].
- [7] KANELLOPOULOS, Panagiotis Georgios; VEROUTI, Eleni; CHRYSOCHOU, Eirini; KOUKOULAKIS, Konstantinos a BAKEAS, Evangelos. Primary and secondary organic aerosol in an urban/industrial site: Sources, health implications and the role of plastic enriched waste burning. Online. *Journal of Environmental Sciences*. 2021, roč. 99, s. 222-238. ISSN 1001-0742. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.06.012>. [cit. 2024-12-20].
- [8] TSUDA, Akira; HENRY, Frank S. a BUTLER, James P. Particle transport and deposition: basic physics of particle kinetics. Online. *Comprehensive Physiology*. 2013, roč. 3, č. 4, s. 1437–1471. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/cphy.c100085>. [cit. 2024-10-31].
- [9] DAVDA, Kruti. *Particulate Matter monitoring – PM2.5*. Online. In: Oizom Redefining Resources. 2020, 2024. Dostupné z: <https://oizom.com/knowledgege-bank/particulate-matter-monitoring/>. [cit. 2024-11-15].
- [10] DONALDSON, Kenneth; GILMOUR, M. Ian a MACNEE, William. Asthma and PM10. Online. *Respiratory Research*. 2000, roč. 1, č. 1, s. 12-15. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/rr5>. [cit. 2024-12-27].
- [11] ENGLERT, Norbert. Fine particles and human health—a review of epidemiological studies. Online. *Toxicology Letters*. 2004, roč. 149, č. 1–3, s. 235-242. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2003.12.035>. [cit. 2024-12-27].

- [12] AVINO, Pasquale a MANIGRASSO, Maurizio. Dynamic of submicrometer particles in urban environment. Online. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017, roč. 24, č. 16, s. 13908–13920. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6752-8>. [cit. 2024-12-27].
- [13] FLOOD-GARIBAY, Jessica Andrea; ANGULO-MOLINA, Aracely a MÉNDEZ-ROJAS, Miguel Ángel. Particulate matter and ultrafine particles in urban air pollution and their effect on the nervous system. Online. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2023, roč. 25, s. 704-726. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/D2EM00276K>. [cit. 2024-11-11].
- [14] NØJGAARD, Jacob K.; NGUYEN, Quynh T.; GLASIUS, Marianne a SØRENSEN, Lise L. Nucleation and Aitken mode atmospheric particles in relation to O₃ and NO_x at semirural background in Denmark. Online. *Atmospheric Environment*. 2012, roč. 49, s. 275-283. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.040>. [cit. 2025-02-10].
- [15] PÖHLKER, Mira L.; ZHANG, Minghui; BRAGA, Ramon Campos; KRÜGER, Ovid O.; PÖSCHL, Ulrich et al. Aitken mode particles as CCN in aerosol- and updraft-sensitive regimes of cloud droplet formation. Online. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021, roč. 21, č. 15, s. 11723–11740. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/acp-21-11723-2021>. [cit. 2025-02-10].
- [16] COTTERELL, Michael I.; MASON, Bernard J.; PRESTON, Thomas C.; ORR-EWING, Andrew J. a REID, Jonathan P. Optical extinction efficiency measurements on fine and accumulation mode aerosol using single particle cavity ring-down spectroscopy. Online. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2015, roč. 17, č. 24, s. 15843-15856. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C5CP00252D>. [cit. 2025-02-10].
- [17] HARRISON, Roy M. a YIN, Jianxin. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? Online. *Science of The Total Environment*. 2000, roč. 249, č. 1-3, s. 85-101. ISSN 0048-9697. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00513-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00513-6). [cit. 2024-10-30].
- [18] LIU, Tengyu; CHAN, Arthur W. H. a ABBATT, Jonathan P. D. Multiphase Oxidation of Sulfur Dioxide in Aerosol Particles: Implications for Sulfate Formation in Polluted Environments. Online. *Environmental Science & Technology*. 2021, roč. 55, č. 8, s. 4227-4242. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06496>. [cit. 2024-11-09].
- [19] DONG, Xinyuan; GUO, Qingjun; HAN, Xiaokun; WEI, Rongfei a TAO, Zhenghua. The isotopic patterns and source apportionment of nitrate and ammonium in atmospheric aerosol. Online. *Science of The Total Environment*. 2022, roč. 803, s. 149-559. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149559>. [cit. 2024-11-10].
- [20] MORETTI, Sacha; TASSONE, Antonella; ANDREOLI, Virginia; CARBONE, Francesco; PIRRONE, Nicola et al. Analytical study on the primary and secondary organic carbon and elemental carbon in the particulate matter at the high-altitude Monte Curcio GAW station, Italy. Online. *Environmental Science and Pollution Research*.

- 2021, roč. 28, s. 60221–60234. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-021-15014-x>. [cit. 2024-11-09].
- [21] WANG, Xuan; JACOB, Daniel J.; EASTHAM, Sebastian D.; SULPRIZIO, Melissa P.; ZHU, Lei et al. The role of chlorine in global tropospheric chemistry. Online. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019, roč. 19, č. 6, s. 3981–4003. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-19-3981-2019>. [cit. 2024-11-10].
- [22] DONDI, Arianna; CARBONE, Claudio; MANIERI, Elisa; DANIELE ZAMA, Daniele; DEL BONO, Chiara et al. Outdoor Air Pollution and Childhood Respiratory Disease: The Role of Oxidative Stress. Online. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023, roč. 24, č. 5. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijms24054345>. [cit. 2024-09-27].
- [23] ARFIN, Tanvir; PILLAI, Anupama M.; MATHEW, Nikhila; TIRPUDE, Abha; BANG, Roshani et al. An overview of atmospheric aerosol and their effects on human health. Online. *Environmental Science and Pollution Research*. Roč. 30, s. 125347–125369. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-023-29652-w>. [cit. 2024-09-27].
- [24] RAHMAN, M.M.; ZHAO, Ming; ISLAM, Mohammad S.; DONG, Kejun a SAHA, Suvash C. Aerosol Particle Transport and Deposition in Upper and Lower Airways of Infant, Child and Adult Human Lungs. Online. *Atmosphere*. 2021, roč. 12, č. 11. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/atmos12111402>. [cit. 2024-09-27].
- [25] THANH, Tien. *How air pollution particles travel through human body*. Online. In: VnExpress International. 1997. Dostupné z: <https://e.vnexpress.net/infographics/news/how-air-pollution-particles-travel-through-human-body-3990933.html>. [cit. 2024-10-07].
- [26] YE, Mengwen; YANG, Jiacheng; LI, Jiaxin; WANG, Yifan; CHEN, Weiqiang et al. Progress in Mechanisms, Pathways and Cohort Studies About the Effects of PM_{2.5} Exposure on the Central Nervous System. Online. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2023, roč. 261, č. 7. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s44169-023-00034-0>. [cit. 2024-09-29].
- [27] CARRÉ, Julie; GATIMEL, Nicolas; MOREAU, Jessika; PARINAUD, Jean a LÉANDRI, Roger. Does air pollution play a role in infertility?: A systematic review. Online. *Environmental Health*. Roč. 16, č. 82, article 2017. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s12940-017-0291-8>. [cit. 2024-09-29].
- [28] HUBELOVA, Dana; ULMANN, Vit; MIKUSKA, Pavel; LICBINSKY, Roman; ALEXA, Lukas et al. Nontuberculous Mycobacteria Prevalence in Aerosol and Spiders' Webs in Karst Caves: Low Risk for Speleotherapy. Online. *Microorganisms*. 2021, roč. 9, č. 2573. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9122573>. [cit. 2024-07-03].
- [29] BOHÁČ, Stanislav; JIRKA, Zdeněk; PUČÁLKA, Radomil; SLÁDEK, Petr; SVOZIL, Vladimír et al. *Speleoterapie - principy a zkušenosti*. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 2001. ISBN 80-244-0346-3.

- [30] GALILEO CORPORATION S.R.O. *Dětská léčebna Ostrov u Macochy*. Online. 2024, 25. 10. 2024. Dostupné z: <https://ostrov.detskelecebny.cz/>. [cit. 2024-10-30].
- [31] *Cisarská jeskyně*. Online. In: GALILEO CORPORATION S.R.O. *Dětská léčebna Ostrov u Macochy*. 2024, 5. 2. 2025. Dostupné z: https://ostrov.detskelecebny.cz/onas/foto-a-video/fotogalerie/#evt_185. [cit. 2025-02-08].
- [32] FAIMON, Jiří; LIČBINSKÝ, Roman; LANG, Marek; ÜBERHUBEROVÁ, Jarmila a HEBELKA, Jiří. Cave microclimatology: diurnal variations in aerosol particle concentrations. Online. 2019, roč. 137, s. 2841–2852. ISSN Theoretical and Applied Climatology. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00704-019-02776-1>. [cit. 2024-12-17].
- [33] TRIGGLE, D. J. Calcium, the control of smooth muscle function and bronchial hyperreactivity. Online. *European Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 1983, roč. 38, č. 1, s. 1-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.1983.tb00849.x>. [cit. 2025-02-10].
- [34] FRANZIN, Bruno T.; GUIZELLINI, Filipe C.; DE BABOS, Diego V.; HOJO, Ossamu; PASTRE, Iêda et al. Characterization of atmospheric aerosol (PM10 and PM2.5) from a medium sized city in São Paulo state, Brazil. Online. *Journal of Environmental Sciences*. 2020, roč. 89, s. 238-251. ISSN 1001-0742. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.09.014>. [cit. 2024-11-06].
- [35] SKÁCEL, František a TEKÁČ, Viktor. *Analýza ovzduší*. Vydání: první. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-038-6.
- [36] SHANTHAKUMAR, S.; SINGH, D.N. a PHADKE, R.C. Flue gas conditioning for reducing suspended particulate matter from thermal power stations. Online. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008, roč. 34, č. 6, s. 685-695. ISSN 0360-1285. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.04.001>. [cit. 2024-11-05].
- [37] WATSON, John a CHOW, Judith. *Guideline on Speciated Particulate Monitoring*. Online. 3. USA: Desert Research Institute, 1998. [cit. 2024-10-30].
- [38] MARPLE, Virgil A. History of Impactors—The First 110 Years. Online. *Aerosol Science and Technology*. 2004, roč. 38, č. 3, s. 247-292. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02786820490424347>. [cit. 2024-11-27].
- [39] HERING, Susanne V. Impactors, Cyclones, and Other Inertial and Gravitational Collectors. Online. In: *Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants*. California, 1995, s. 279–321. ISBN 9780936712826. [cit. 2024-11-27].
- [40] RAYNOR, Peter C.; LEITH, David; LEE, K. W. a MUKUND, R. Sampling and Analysis Using Filters. Online. In: *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. John Wiley, 2011, s. 107 - 128. ISBN 9781118001684. [cit. 2025-02-11].
- [41] BARON, Paul A.; KULKARNI, Pramod a WILLEKE, Klaus. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. Online. 3. John Wiley, 2011. ISBN 9780470387412. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781118001684>. [cit. 2025-02-11].

- [42] DIAPOULI, E.; CHALOULAKOU, A. a SPYRELLIS, N. Levels of ultrafine particles in different microenvironments — Implications to children exposure. Online. *Science of The Total Environment*. 2007, roč. 388, č. 1–3, s. 128-136. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.063>. [cit. 2024-11-07].
- [43] A. PÉREZ, Rosa a ALBERO, Beatriz. Ultrasound-assisted extraction methods for the determination of organic contaminants in solid and liquid samples. Online. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023, roč. 166, s. 117-204. ISSN 0165-9936. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117204>. [cit. 2024-12-13].
- [44] DEAN, John R. a XIONG, Guohua Xiong. Extraction of organic pollutants from environmental matrices: selection of extraction technique. Online. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2000, roč. 19, č. 9, s. 553-564. ISSN 0165-9936. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(00\)00038-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-9936(00)00038-8). [cit. 2024-12-13].
- [45] CASTRO, Dionísia; SLEZAKOVA, Klara; OLIVA-TELES, Maria Teresa; DELERUE-MATOS, Cristina; ALVIM-FERRAZ, Maria C. et al. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particulate samples by microwave-assisted extraction and liquid chromatography. Online. *The Journal of Separation Science*. 2009, s. 501 – 510. ISSN 1615-9314. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/jssc.200800495>. [cit. 2024-12-16].
- [46] DOUŠA, Michal. *Základní charakteristiky chromatografického procesu*. Online. HPLC.CZ. 2008. Dostupné z: <http://www.hplc.cz/>. [cit. 2024-12-19].
- [47] DOUŠA, Michal. *Mez detekce a mez stanovitelnosti*. Online. HPLC.CZ. 2009. Dostupné z: http://www.hplc.cz/tip/lod_loq.htm. [cit. 2024-12-19].
- [48] SMOLKOVÁ, Eva; PACÁKOVÁ, Věra a FELTL, Ladislav. *Plynová chromatografie, 1. [díl]: Teoretické základy*. Online. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1975. Dostupné z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:cc41f4f0-2aa2-11e3-b79f-5ef3fc9bb22f>. [cit. 2024-11-16].
- [49] KATAOKA, Hiroyuki. Derivatization reactions for the determination of amines by gas chromatography and their applications in environmental analysis. Online. *Journal of Chromatography A*. 1996, roč. 733, č. 1–2, s. 19-34. ISSN 0021-9673. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9673\(95\)00726-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9673(95)00726-1). [cit. 2025-02-11].
- [50] Schematic of a GC-MS system. Online. In: WU, Shubin; LYU, Gaojin a LOU, Rui. *Applications of Chromatography Hyphenated Techniques in the Field of Lignin Pyrolysis*. 2012. ISSN 978-953-51-0260-1. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-GC-MS-system_fig1_221927526. [cit. 2025-02-13].
- [51] Schematic diagram of the High Performance Liquid Chromatography (HPLC) system. Online. In: CZAPLICKI, Sylwester. *Chromatography in Bioactivity Analysis of Compounds*. InTech, 2013, s. 99-122. ISSN 978-953-51-1074-3. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-High-Performance-Liquid-Chromatography-HPLC-system_fig2_236146377. [cit. 2025-02-12].

- [52] ZHONG, Zhixiong a PAN, Xinhong. Recent Trends in Suppressor Techniques for Ion Chromatography. Online. *Chromatographia*. 2023, roč. 86, s. 447–468. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10337-023-04253-4>. [cit. 2025-02-12].
- [53] WEISS, Joachim. *Handbook of ion chromatography*. Online. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co., 2016. ISBN 9783527651610. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9783527651610>. [cit. 2024-11-27].
- [54] Schematic diagram of ion chromatography analysis. Online. In: XIONG, Yan; WANG, Qing; LI, Xiang a FANG, Shenwen. *Chromatographia*. 81. Germany: Springer Nature, 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-diagram-of-ion-chromatography-analysis-b-Schematic-diagram-of-SPE-process_fig1_325476162. [cit. 2025-02-13].
- [55] KLOUDA, Pavel. *Moderní analytické metody*. 2., upr. a dopl. vyd. Ostrava: Pavel Klouda, 2003. ISBN 80-86369-07-2. Dostupné také z: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:79f8ee60-54bf-11e2-8888-005056827e51>.
- [56] RAMACHANDRAN, Ashwin a SANTIAGO, Juan G. Isotachophoresis: Theory and Microfluidic Applications. Online. *Chemical Reviews*. 2022, roč. 122, č. 15, s. 12904–12976. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00640>. [cit. 2025-02-12].
- [57] XU, Yan. Capillary electrophoresis. Online. *Analytical Chemistry*. 1995, roč. 67, č. 12, s. 463-473. ISSN 0003-2700. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ac00108a031>. [cit. 2025-02-12].
- [58] RŮŽIČKA, Jaromír a HANSEN, Elo Harald. *Flow Injection Analysis*. 2nd ed. New York, USA: John Wiley, 1988.
- [59] ALDSTADT, Joseph; OLSON, Don C.; WOLCOTT, Duane a MARSHALL, Graham. Flow and Sequential Injection Analysis Techniques in Process Analysis. Online. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. 2006. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a2104>. [cit. 2024-12-11].
- [60] IDRIS, Abubakr M. An Overview of the Generations and Recent Versions of Flow Injection Techniques. Online. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2010, roč. 40, č. 3, s. 150-158. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10408340903103437>. [cit. 2024-12-11].
- [61] ALEXA, Lukáš a MIKUŠKA, Pavel. Simultaneous Determination of Gaseous Ammonia and Particulate Ammonium in Ambient Air Using a Cylindrical Wet Effluent Diffusion Denuder and a Continuous Aerosol Sampler. Online. *Analytical Chemistry*. 2020, roč. 92, č. 24, s. 15827-15836. ISSN 0003-2700. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c03037>. [cit. 2024-11-25].
- [62] HLAVÁČKOVÁ, Hana. *Využití nového typu kontinuálního vzorkovače pro stanovení sloučenin v ultra-jemném aerosolu*. Diplomová práce, vedoucí Lukáš Alexa. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí, 2022.

- [63] GENFA, Zhang; DASGUPTA, Purnendu K. a DONG, Shen. Measurement of Atmospheric Ammonia. Online. *Environmental Science & Technology*. 1989, roč. 23, č. 12, s. 1467 - 1474. ISSN 0013-936X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/es00070a003>. [cit. 2024-12-30].
- [64] YIN, Li Qian; YUAN, Dong Xing a ZHANG, Min. Determination of sulfite in water samples by flow injection analysis with fluorescence detection. Online. *Chinese Chemical Letters*. 2010, roč. 21, č. 12, s. 1457-1461. ISSN 1001-8417. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2010.06.029>. [cit. 2024-12-30].
- [65] ČMELÍKOVÁ, Dorota. *Simultánní stanovení ultrastopových koncentrací kyseliny dusičné a dusičnanů v ovzduší pomocí chemiluminiscenčních online analyzátorů*. Diplomová práce, vedoucí Lukáš Alexa. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí, 2023.
- [66] KRÍŽEK, Martin a ŠÍMA, Jan. *Analytická chemie*. Online. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 2015. ISBN 978-80-7394-486-5. Dostupné z: http://kch.zf.jcu.cz/vyuka/download/Analyticka_chemie_komplet.pdf. [cit. 2024-11-26].
- [67] THOMAS, ROBERT. *A Beginner's Guide to ICP-MS*. Online. In: Spectroscopy Online. 2001, 2024. Dostupné z: <http://scientificsolutions1.com/Beginners%20guide%20to%20ICP-MS.pdf>. [cit. 2024-11-26].
- [68] *Handbook of ICP-QQQ Applications using the Agilent 8800 and 8900*. Online. In: Agilent. 5. 2022, 2025. Dostupné z: https://www.agilent.com/cs/library/applications/appcompendium_icp-qqq-5991-2802en-us-agilent.pdf. [cit. 2025-04-01].
- [69] PARSHINTSEV, Jevgeni; RUIZ-JIMENEZ, Jose; PETÄJÄ, Tuukka; HARTONEN, Kari; KULMALA, Markku et al. Comparison of quartz and Teflon filters for simultaneous collection of size-separated ultrafine aerosol particles and gas-phase zero samples. Online. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2011, roč. 400, č. 10, s. 3527–3535. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00216-011-5041-0>. [cit. 2025-03-05].
- [70] KRŮMAL, Kamil; MIKUŠKA, Pavel; HORÁK, Jiří; JAROCH, Miroslav; HOPAN, František et al. Gaseous and particulate emissions from the combustion of hard and soft wood for household heating: Influence of boiler type and heat output. Online. *Atmospheric Pollution Research*. 2023, roč. 14, č. 7. ISSN 1309-1042. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101801>. [cit. 2025-03-13].
- [71] GENTNER, Drew R.; JATHAR, Shantanu H.; GORDON, Timothy D.; BAHREINI, Roya; DAY, Douglas A. et al. Review of Urban Secondary Organic Aerosol Formation from Gasoline and Diesel Motor Vehicle Emissions. Online. *Environmental Science & Technology*. 2017, roč. 51, č. 3, s. 1074-1093. ISSN 0013-936X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04509>. [cit. 2025-01-27].

- [72] KŘŮMAL, Kamil; MIKUŠKA, Pavel; VEČEŘOVÁ, Kristýna; URBAN, Otmar; PALLOZZI, Emanuele et al. Wet effluent diffusion denuder: The tool for determination of monoterpenes in forest. Online. *Talanta*. 2016, roč. 153, s. 260-267. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.03.032>. [cit. 2025-03-13].
- [73] MIKUŠKA, Pavel; ČAPKA, Lukáš a VEČEŘA, Zbyněk. Aerosol sampler for analysis of fine and ultrafine aerosols. Online. *Analytica Chimica Acta*. 2018, roč. 1020, s. 123-133. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.02.070>. [cit. 2025-03-13].
- [74] ČAPKA, Lukáš; MIKUŠKA, Pavel a KŘŮMAL, Kamil. Determination of dicarboxylic acids in atmospheric aerosols using continuous aerosol sampler with on-line connected ion chromatography system. Online. *Atmospheric Environment*. 2020, roč. 222, s. 117-178. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117178>. [cit. 2025-03-13].
- [75] POHL, Vivien; GILMER, Alan; HELLEBUST, Stig; MCGOVERN, Eugene; CASSIDY, John et al. Ammonia Cycling and Emerging Secondary Aerosols from Arable Agriculture: A European and Irish Perspective. Online. *Air*. 2023, roč. 1, č. 1, s. 37-54. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/air1010003>. [cit. 2025-03-11].
- [76] REYERS, Fred a NAUDÉ, Theuns W. Oxalate-containing plants. Online. In: *Veterinary Toxicology*. 2. Academic Press, 2012, s. 1128-1139. ISBN 9780123859266. [cit. 2025-03-11].
- [77] AMATO, F.; FAVEZ, O.; PANDOLFI, M.; ALASTUEY, A.; QUEROL, X. et al. Traffic induced particle resuspension in Paris: Emission factors and source contributions. Online. *Atmospheric Environment*. 2016, roč. 129, s. 114-124. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.022>. [cit. 2025-01-24].
- [78] MCKONE, Thomas E. Pollution, Soil. Online. In: *Encyclopedia of Toxicology*. 2. Elsevier, 2005, s. 489-496. ISBN 9780123694003. [cit. 2025-01-24].
- [79] ABDULLAHI, Karimatu L.; DELGADO-SABORIT, Juana Maria a HARRISON, Roy M. Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: A review. Online. *Atmospheric Environment*. 2013, roč. 71, s. 260-294. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.061>. [cit. 2025-01-27].

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AAS	Atomová absorpční spektroskopie
AES	Atomová emisní spektroskopie
AV ČR	Akademie věd České republiky
CC	Sloupcová chromatografie
CPC	Condensation particle counter
DMA	Differential Mobility Analyzer
FIA	Průtoková injekční analýza
FID	Plamenový ionizační detektor
FLD	Fluorescenční detektor
GC	Plynová chromatografie
GLC	Plynová rozdělovací chromatografie
GPC	Gelová permeační chromatografie
GSC	Plynová adsorpční chromatografie
HPLC	Vysokoúčinná kapalinová chromatografie
IC	Iontová chromatografie
ICP-MS	Hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
LLC	Kapalinová rozdělovací chromatografie
LOD	Mez detekce
LOQ	Mez stanovitelnosti
LSC	Kapalinová adsorpční chromatografie
NC	Nitrát celulózy
NB	Nová budova léčebny
OPA	Ortho-ftaldialdehyd
PAHs	Polycyklické aromatické uhlovodíky
PC	Papírová chromatografie
PM	Particulate matter
PTFE	Polytetrafluorethylen
SB	Stará budova léčebny
SIA	Sekvenční injekční analýza
SMPS	Scanning mobility particle sizer
TCD	Tepelně-vodivostní detektor
TLC	Tenkovrstvá chromatografie
UHPLC	Ultra-vysokoúčinná kapalinová chromatografie
ÚIACH	Ústav analytické chemie Akademie věd České republiky

9 SEZNAM PŘÍLOH

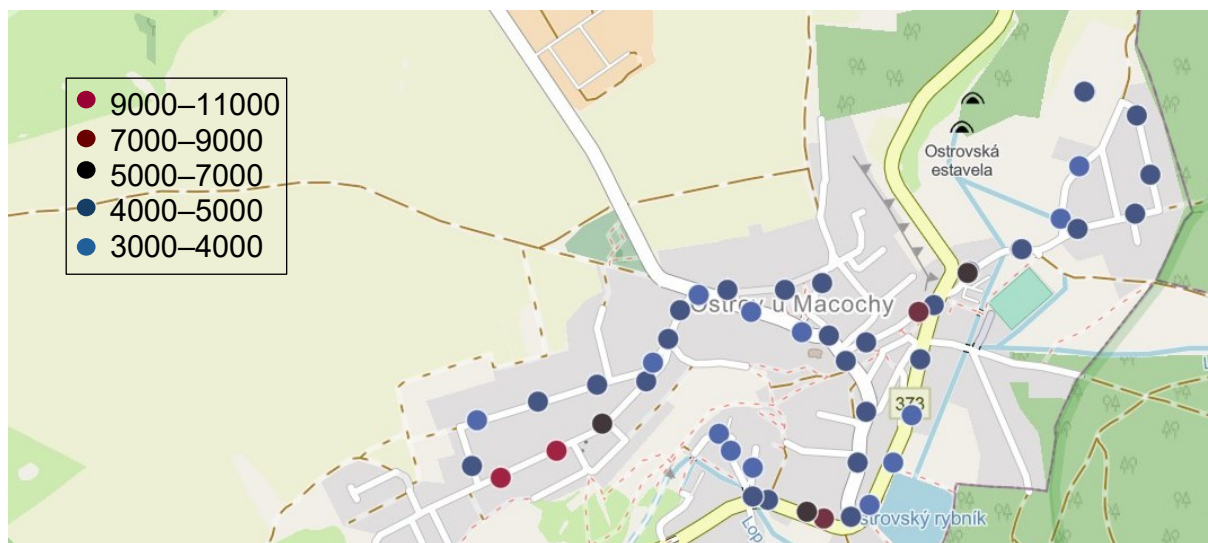
Příloha 1: Početní koncentrace částic v Ostrově u Macochy v průběhu zimní kampaně

Příloha 2: Početní koncentrace částic v Ostrově u Macochy v průběhu letní kampaně

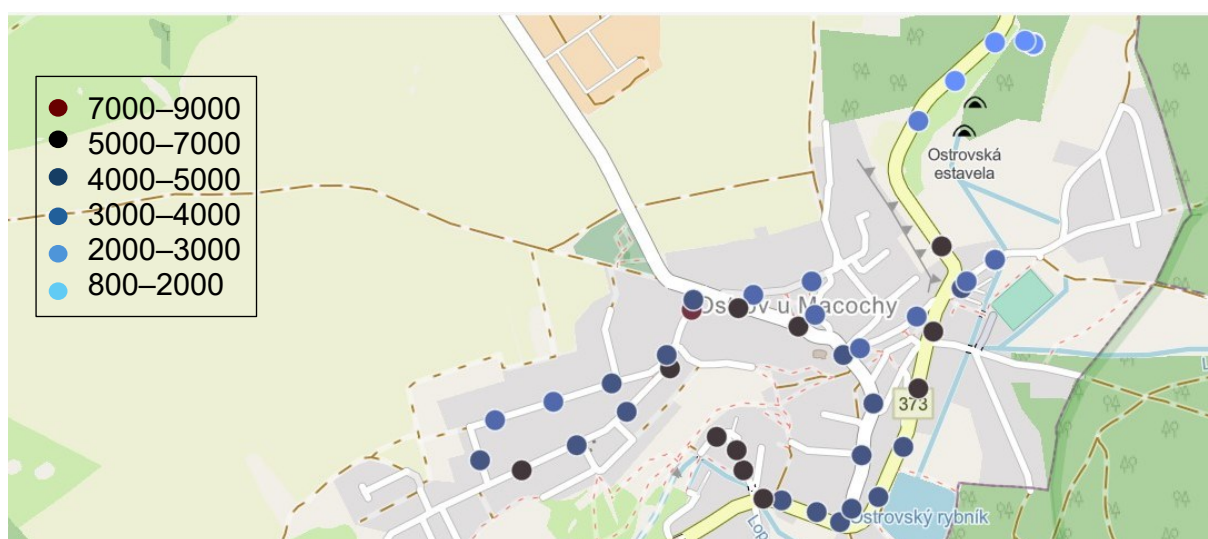
Příloha 3: Abstrakty z konference OVZDUŠÍ V ČASe

10 PŘÍLOHY

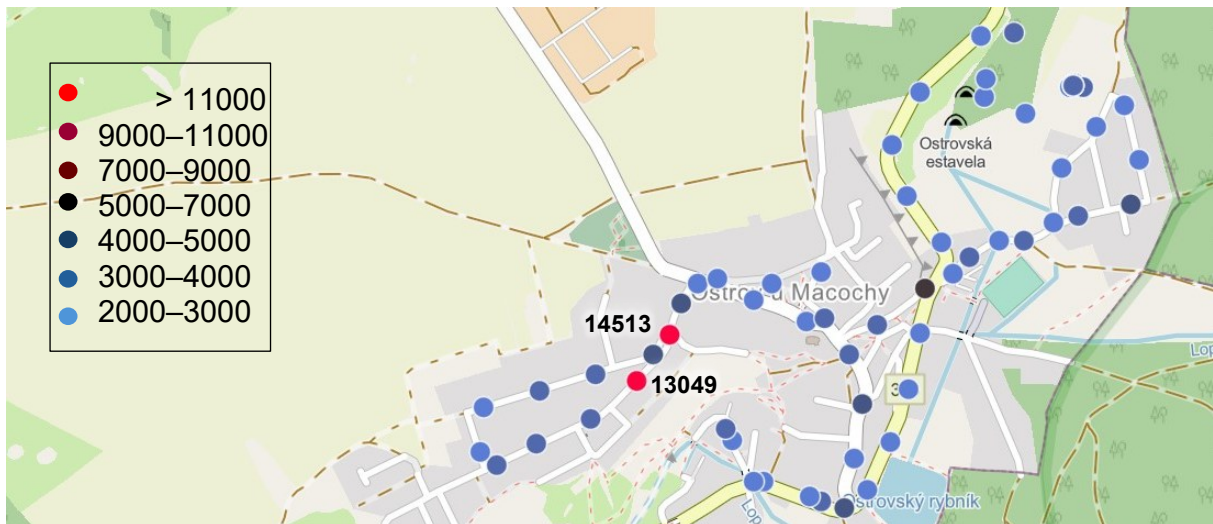
10.1 Početní koncentrace částic v Ostrově u Macochy v průběhu zimní kampaně



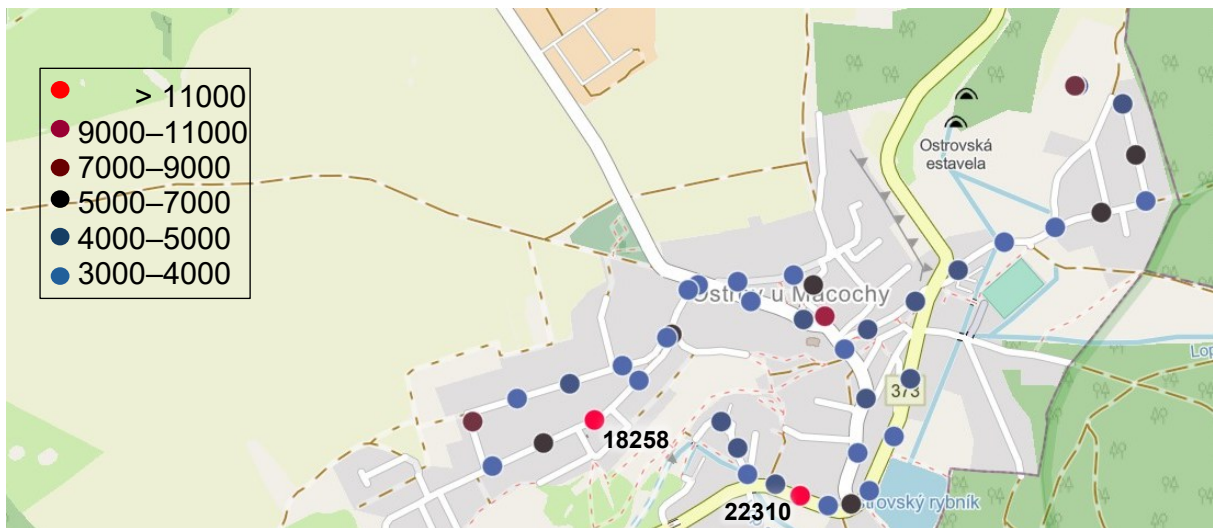
Obrázek 27: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Ostrově u Macochy 30.1.2024 (11:05–11:50)



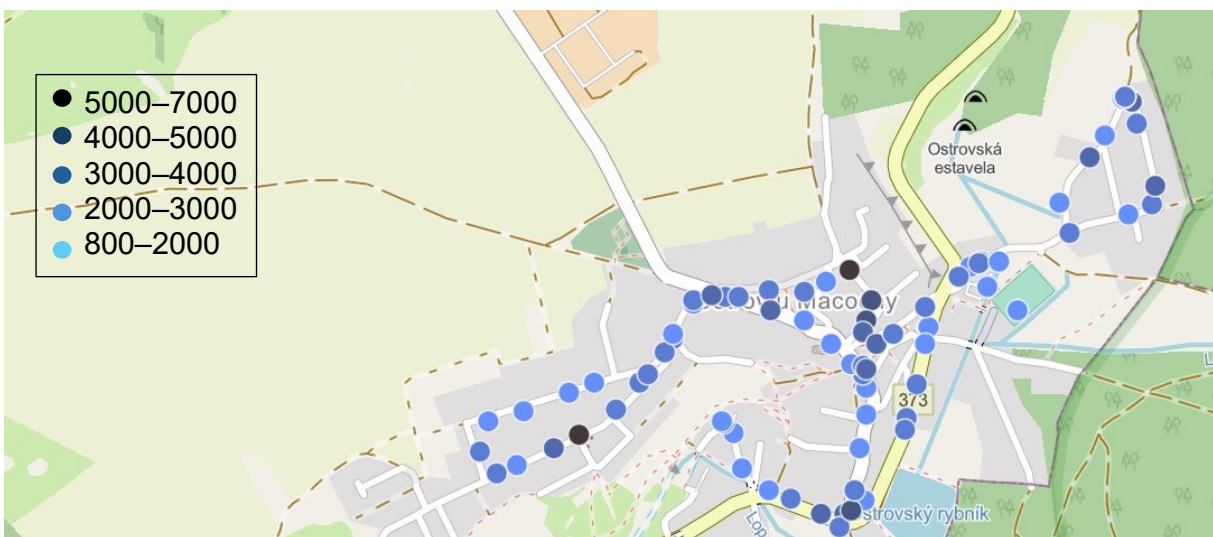
Obrázek 28: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Ostrově u Macochy 2.2.2024 (11:20–13:35)



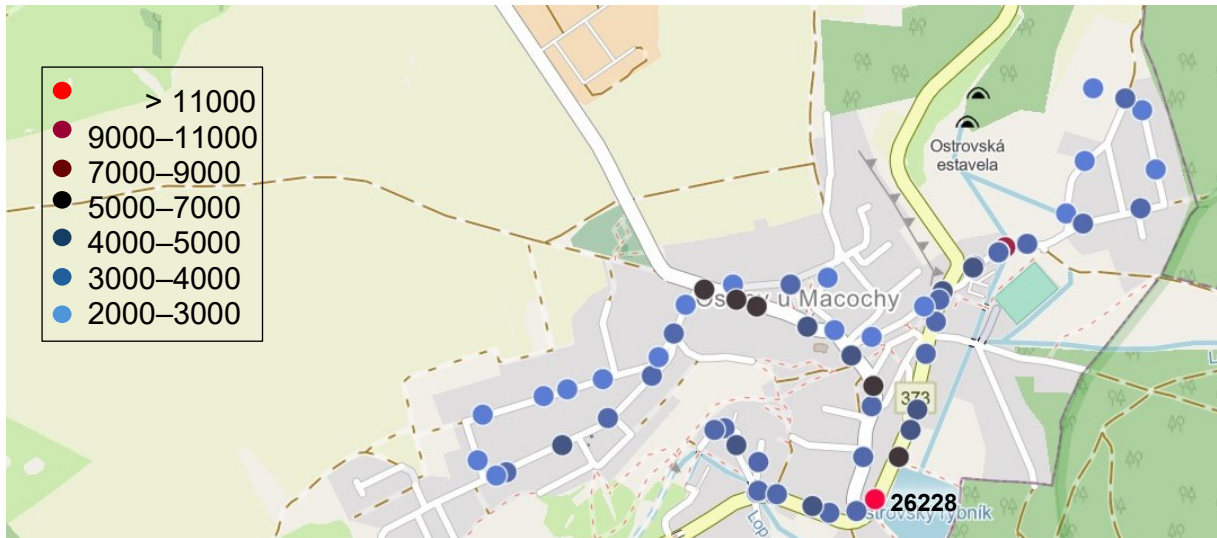
Obrázek 29: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Ostrově u Macochy 16.2.2024 (10:40–11:45)



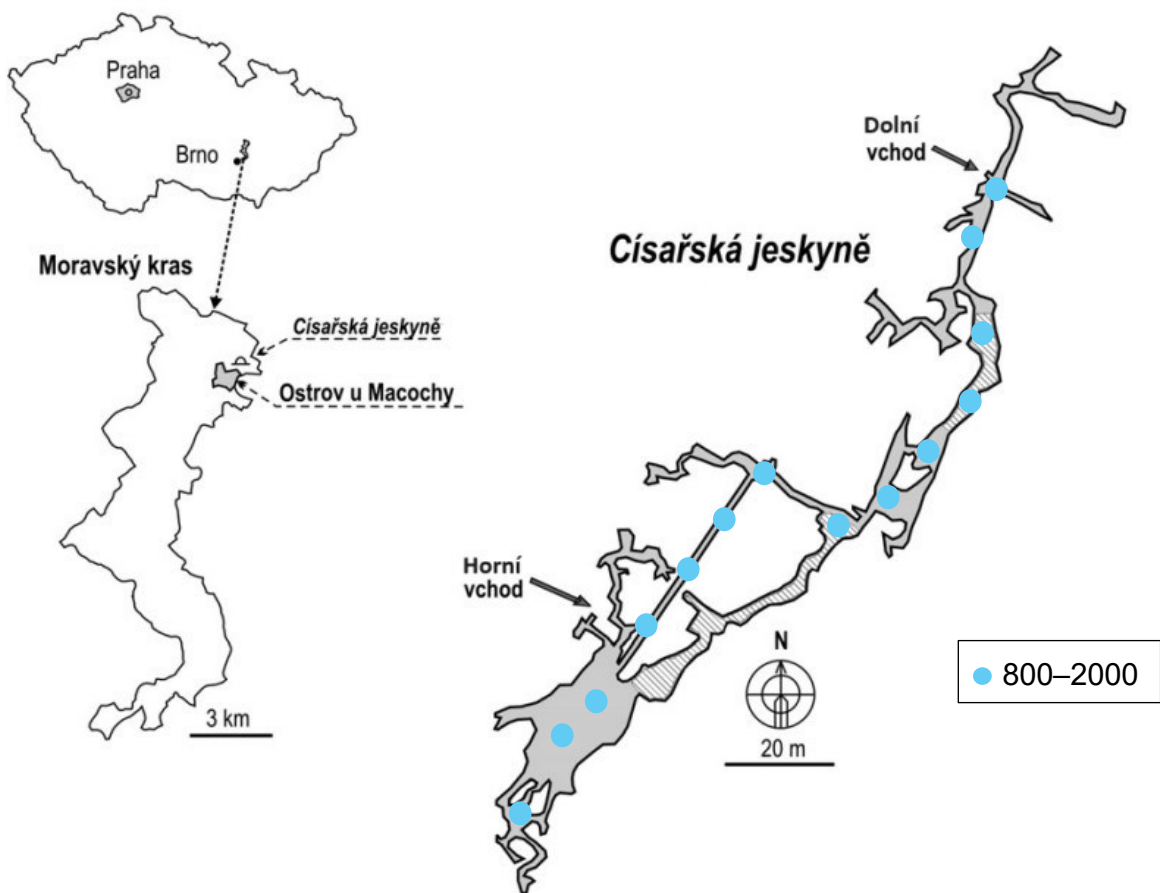
Obrázek 30: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Ostrově u Macochy 16.2.2024 (15:50–16:35)



Obrázek 31: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Ostrově u Macochy 18.2.2024 (11:00–12:20)



Obrázek 32: Početní koncentrace částic [č/cm³] v Ostrově u Macochy 20.2.2024 (10:50–11:55)

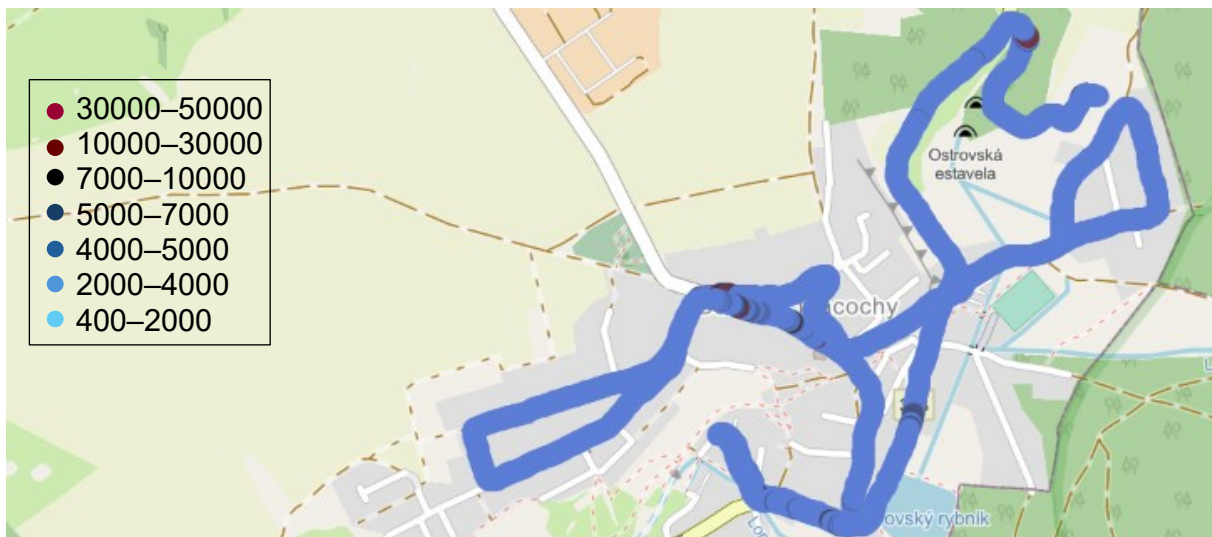


Obrázek 33: Početní koncentrace částic [č/cm³] v Císařské jeskyni 23.2.2024 (12:10–12:20)

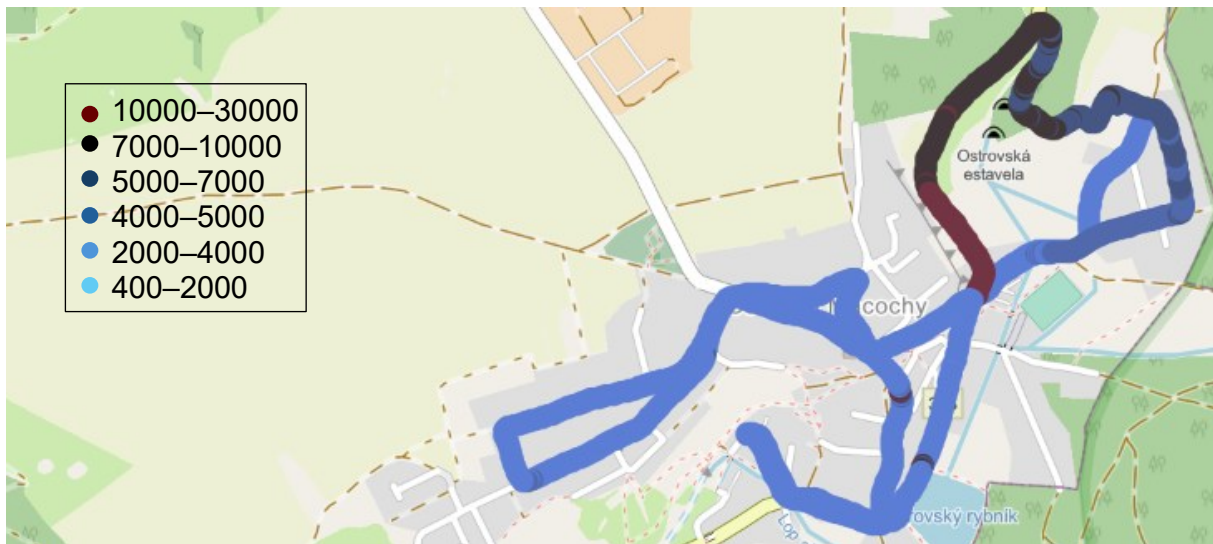
10.2 Početní koncentrace částic v Ostrově u Macochy v průběhu letní kampaně



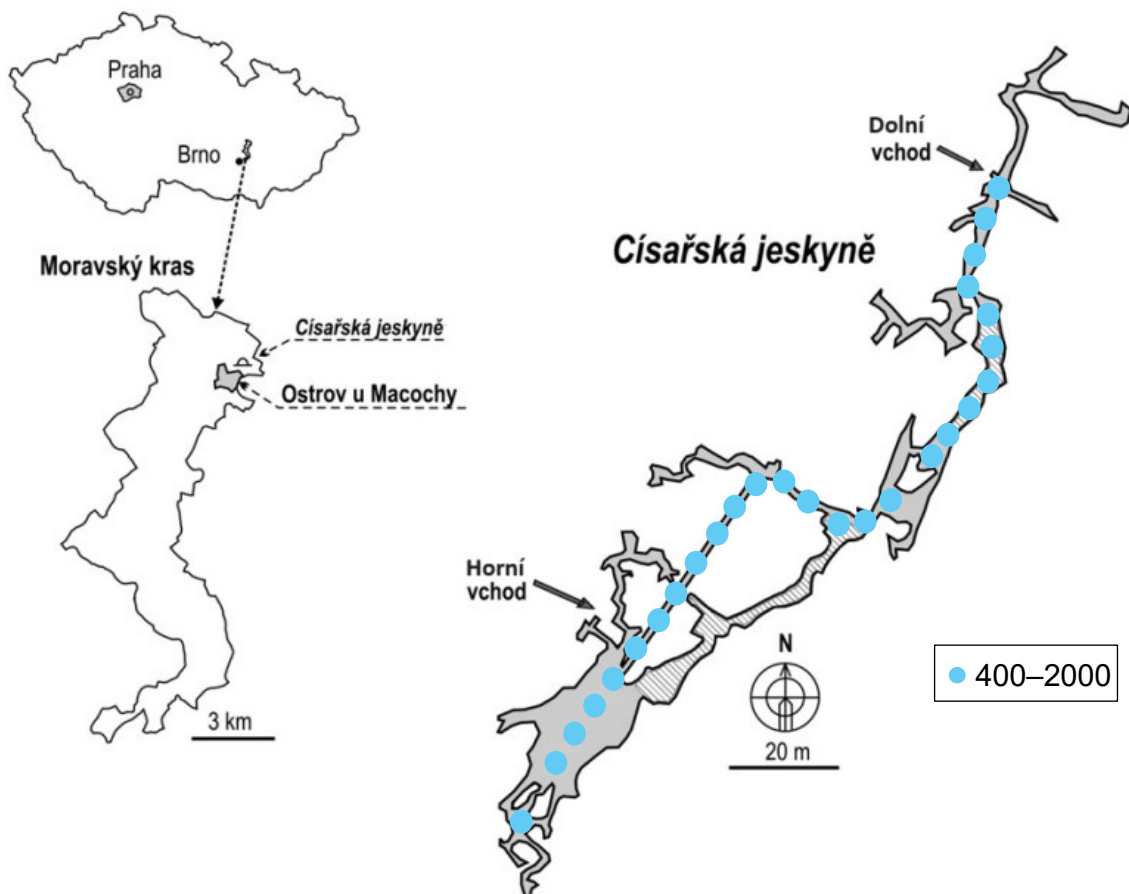
Obrázek 34: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Ostrově u Macochy 13.8.2024 (9:55–10:55)



Obrázek 35: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Ostrově u Macochy 16.8.2024 (9:40–11:20)



Obrázek 36: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Ostrově u Macochy 20.8.2024 (10:10–11:20)



Obrázek 37: Početní koncentrace částic [$\text{č}/\text{cm}^3$] v Císařské jeskyni 16.8.2024 (10:00–10:20)

10.3 Abstrakty z konference OVZDUŠÍ V ČASe

INORGANIC COMPONENTS OF PM_{2.5} AEROSOL IN THE AREA OF CHILDREN'S SANATORIUM WITH SPELEOTHERAPY

Lukáš ALEXA¹, Markéta HORKÁ², Pavel MIKUŠKA¹, Kamil KŘŮMAL¹, Hana HLAVÁČKOVÁ^{1,2}, Hana CIGÁNKOVÁ¹, Pavel COUFALÍK¹, Hana ZMRZLÁ³, Jitka HEGROVÁ⁴, Roman LIČBINSKÝ⁴, Radek VÍT⁴, Jiří HUZLÍK⁴, Saliou MBENGUE⁵, Roman PROKEŠ^{5,6}

¹ Institute of Analytical Chemistry of the CAS, v. v. i., Brno, Czech Republic, alexa@iach.cz

² Brno University of Technology, Faculty of Chemistry, Brno, Czech Republic

³ Children's sanatorium with speleotherapy, Ostrov u Macochy, Czech Republic

⁴ Transport Research Centre, v. v. i., Brno, Czech Republic

⁵ CzechGlobe - Global Change Research Institute of the CAS, v. v. i., Brno, Czech Republic

⁶ RECETOX, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic

Keywords: Aerosol, PM_{2.5}, anions, cations, elements

INTRODUCTION

Aerosols (Particulate Matter, PM) are responsible for many negative effects on the environment and human health, mainly respiratory and cardiovascular diseases (Warneck, 1988). Speleotherapy uses the natural climate in the cave as a treatment method for respiratory and other diseases (Jirka, 2001). Children's sanatorium in Ostrov u Macochy is situated in Moravian Karst south from Císařská cave, used for speleotherapy. The original sanatorium's building in the middle of the village was replaced to a new place on the hill nearby the Císařská cave.

The aim of the study was to compare the outdoor air quality of the original and new buildings of the children's sanatorium.

EXPERIMENTAL SETUP

PM_{2.5} aerosol was sampled during 3 weeks in winter and 2 weeks in summer 2024. A sequential sampler (SEQ 47/50, Leckel) was used for 24h sampling on Teflon filters (TF-1000, 1.0 µm pore size, 47 mm, Pall). High-volume samplers (30 m³/h, DHA-80 or DHA-77, Digtel) was used for 24h sampling on quartz filters (150 mm, Whatman) and nitrocellulose filters (3.0 µm pore size, 142 mm, Merck Milipore).

Determination of ions was provided by sonication of filters (quartz, Teflon) in deionized water (20 min) with subsequent analysis of anions by ion chromatography (ICS-2100, Dionex), cations by triple quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS/MS, 8800, Agilent Technologies) and ammonium by continuous flow analyser (Alexa, 2020).

Determination of elements was provided by decomposition of nitrocellulose filters by UltraWave microwave mineraliser (MA 149-010, Milestone) in sub-boiling HNO_3 and subsequent analysis by ICP-MS/MS. The elements were also measured in parallel using an X-ray fluorescence analyser (model PX-375, HORIBA) at time resolution of 2 hours.

Electrical low-pressure impactor (ELPI+, Dekati) with 14 impactor stages (polycarbonate foils, 25 mm, Whatman) and final filter was used for real time measurement of particle number concentration in the range from 6 nm to 10 μm .

A condensation particle counter (CPC, Model 3007, TSI) was used for mobile measurement of particle number concentration.

RESULTS AND CONCLUSIONS

Filters with collected aerosols were analysed for anions, cations and elements. Measurement of particulate elements with high time resolution was performed only during winter campaign. Mobile measurement of particle number concentration was provided during both (winter and summer) campaigns in the village, sanatorium building and Čísařská cave. Detailed results of aerosol components will be presented.

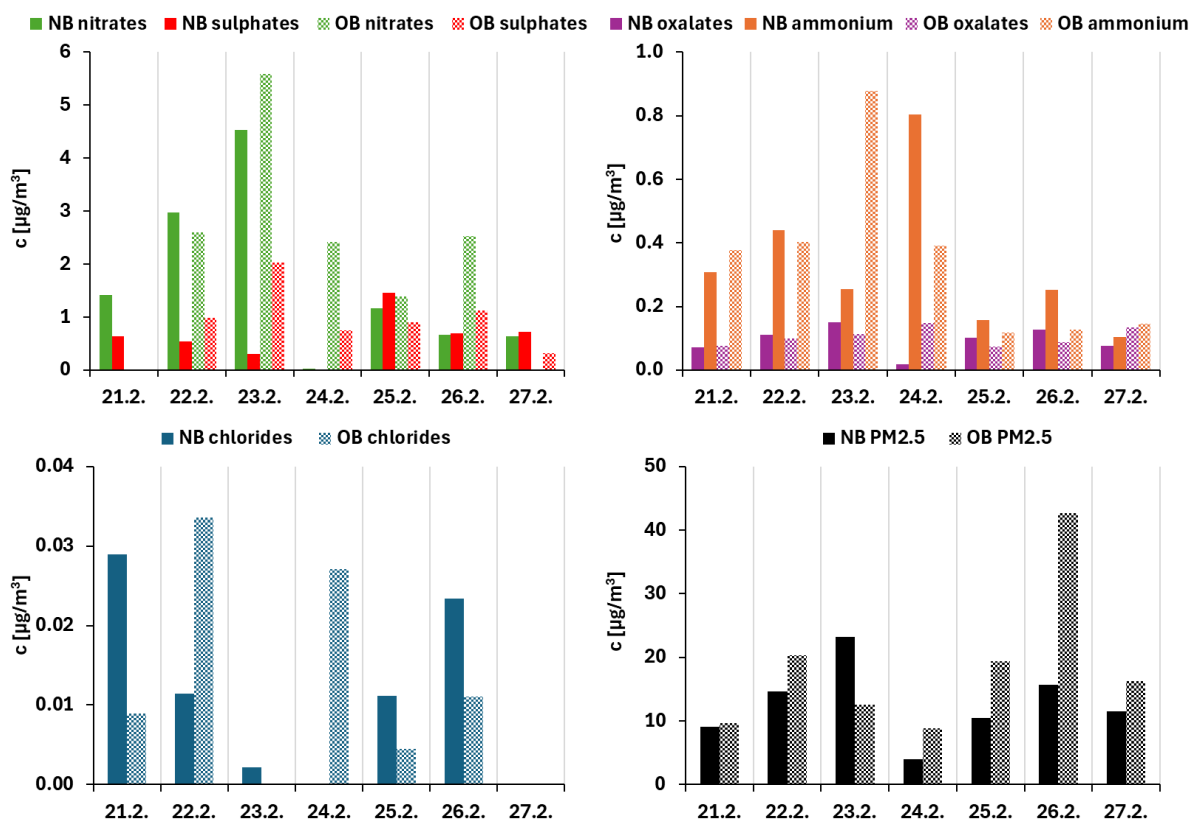


Fig. 1: Concentration of ions in PM2.5 aerosol near the new (NB) and original building (OB) of the sanatorium during February 2024

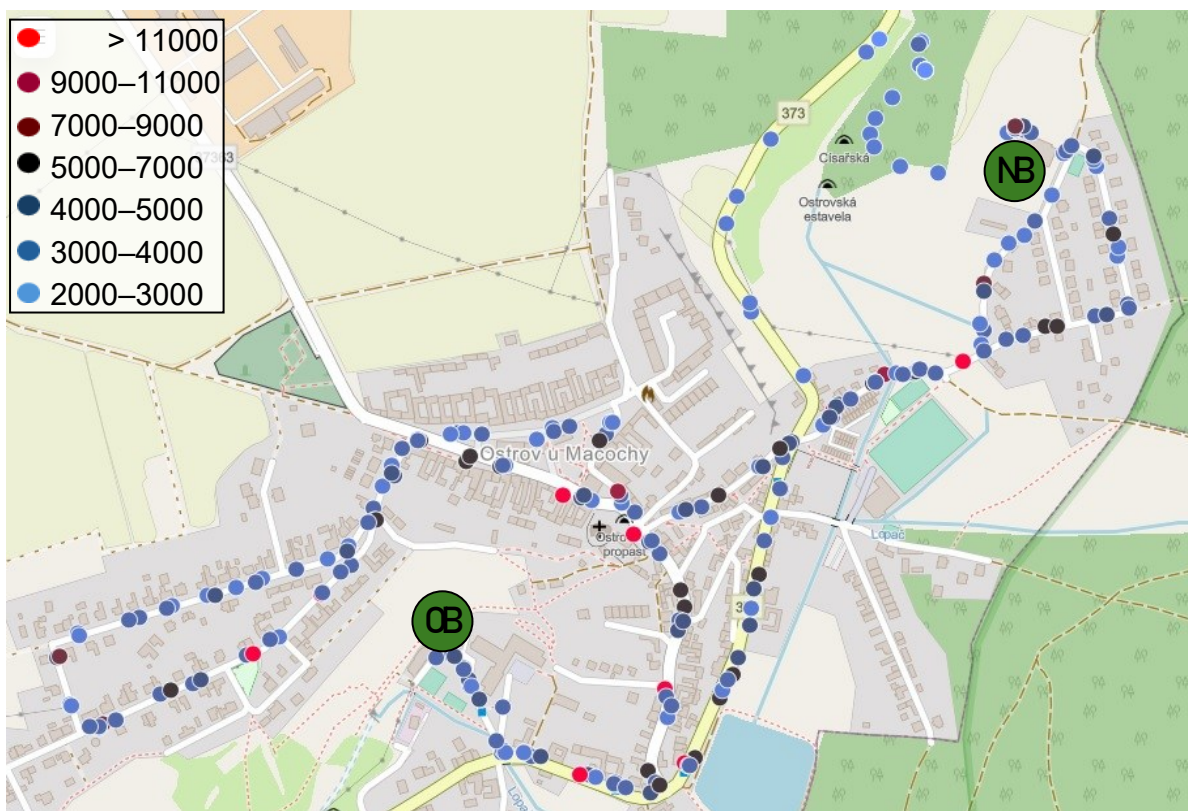


Fig. 2: Particle number concentration of aerosol (P/cm^3) in the village Ostrov u Macochy during February 2024

ACKNOWLEDGEMENT

The project has been supported by the program of Regional Cooperation of the Czech Academy of Sciences in 2023-2025, No. R200312301. This work has been also supported by the Ministry of Transport as part of the long-term conceptual development programme for research organisations, by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic within the Large Research Infrastructure Support Project - ACTRIS Participation of the Czech Republic (grant number: LM2023030), and within the CzeCOS programme (grant number: LM2023048) and by Brno University of Technology within the project No. FCH-S-24-8591.

REFERENCES

- Alexa, L. and Mikuška, P., Simultaneous Determination of Gaseous Ammonia and Particulate Ammonium in Ambient Air Using a Cylindrical Wet Effluent Diffusion Denuder and a Continuous Aerosol Sampler, *Anal. Chem.* 92, 15827-15836 (2020).
- Jirka, Z., *Speleoterapie: principy a zkušenosti*. 1st e. Olomouc: Univerzita Palackého, (2001).
- Warneck, P., *Chemistry of the natural atmosphere*. International Geophysics Series 41, 757(1988).

CHARACTERISATION OF ATMOSPHERIC AEROSOLS IN AIR AROUND THE CHILDREN'S SANATORIUM

Pavel MIKUŠKA¹, Kamil KŘŮMAL¹, Hana HLAVÁČKOVÁ^{1,2}, Lukáš ALEXA¹, Pavel COUFALÍK¹, Hana CIGÁNKOVÁ¹, Hana ZMRZLÁ³, Jitka HEGROVÁ⁴, Roman LIČBINSKÝ⁴, Radek VÍT⁴, Jiří HUZLÍK⁴, Saliou MBENGUE⁵, Roman PROKEŠ^{5,6}, Markéta HORKÁ²

¹ Institute of Analytical Chemistry of the CAS, v. v. i., Brno, Czech Republic

² Brno University of Technology, Faculty of Chemistry, Brno, Czech Republic

³ Children's sanatorium with speleotherapy, Ostrov u Macochy, Czech Republic

⁴ Transport Research Centre, v. v. i., Brno, Czech Republic

⁵ CzechGlobe - Global Change Research Institute of the CAS, v. v. i., Brno, Czech Republic

⁶RECETOX, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic

Keywords: aerosol, PM_{2.5}, organic compounds, black carbon, elemental carbon

INTRODUCTION

Air pollution is responsible for many health effects, mainly respiratory and cardiovascular diseases (Brunekreef and Holgate, 2002). The Children's Sanatorium with speleotherapy in Ostrov u Macocha in Moravian Karst focuses on the treatment of young children suffering from respiratory tract, asthma, allergies, atopic eczema and to strengthening the overall immunity. For several decades, the sanatorium was situated in a small building in the middle of the village. Last year, the sanatorium moved to a new, modern building located at the end of the village on a small hill.

The aim of the presented project is to analyse the air quality in the new location of sanatorium with a focus on the characterisation of atmospheric aerosols in the PM_{2.5} size fraction and to compare the aerosols in the old and new location.

EXPERIMENTAL SETUP

PM_{2.5} aerosols were sampled using a high-volume sampler (DHA-80, Digitel) for 24 hours on quartz fiber filters (diameter 150 mm, Whatman). Sampling took place during 3 weeks within winter season and 2 weeks within summer season of 2024. Black carbon (BC) content in PM₁₀ was analysed using an Aethalometer (model AE31, Magee Scientific). Aerosol mass concentration was determined gravimetrically based on the difference in weight of the filters before and after sampling. In winter, mass concentration of PM_{2.5} was also measured in parallel at a time resolution of 2 hours using beta-ray attenuation method with an on-line continuous particulate analyzer (Model PX-375).

RESULTS AND DISCUSSION

Filters with collected aerosols were analysed for organic carbon, elemental carbon, monosaccharide anhydrides, polyaromatic hydrocarbons, hopanes and steranes, resin acids and methoxyphenols (Křůmal et al., 2010; Křůmal et al., 2013; Mikuška et al., 2015).

A detailed results of mass concentration of aerosols and the concentrations of particulate organic compounds and BC will be presented.

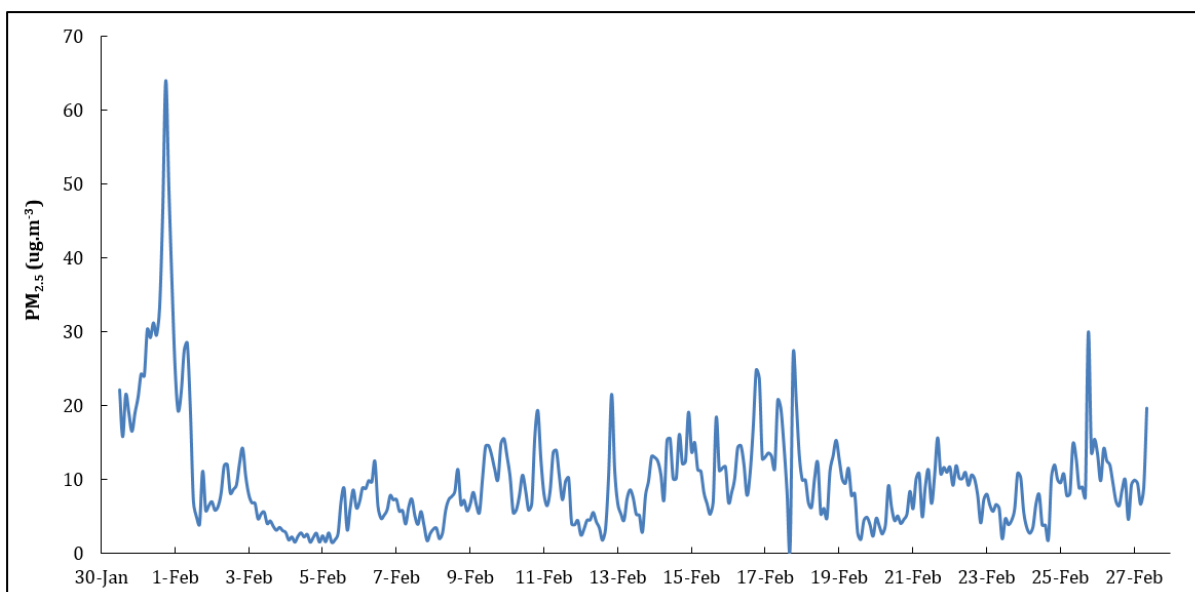


Fig. 1: PM_{2.5} concentration measured with 2 hours time resolution during the winter campaign.

CONCLUSIONS

Higher aerosol concentrations during the winter campaign than during the summer campaign indicate greater air pollution during heating period. Both local and regional emission sources may contribute to the pollution, and the contribution of long-range transport of aerosols cannot be neglected. The main emission sources of pollution in winter were identified as the burning of wood and coal, mainly for domestic heating.

ACKNOWLEDGEMENT

The project has been supported by the programme of Regional Cooperation of the Czech Academy of Sciences in 2023-2025, No. R200312301. This work has been also supported by the Ministry of Transport as part of the long-term conceptual development programme for research organisations, by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic within the Large Research Infrastructure Support Project - ACTRIS Participation of the Czech Republic (grant number: LM2023030), and within the CzeCOS programme (grant number: LM2023048) and by Brno University of Technology within the project No. FCH-S-24-8591.

REFERENCES

- Brunekreef B., Holgate S. T., Air pollution and health, *Lancet*, 360, 1233-1242, (2002).
- Křůmal, K., Mikuška, P., Vojtěšek M., Večeřa, Z., Seasonal variations of monosaccharide anhydrides in PM₁ and PM_{2.5} aerosol in urban areas, *Atmos. Environ.*, 44, 5148-5155, (2010).
- Křůmal, K., Mikuška, P., Večeřa Z., Polycyclic aromatic hydrocarbons and hopanes in PM₁ aerosols in urban areas, *Atmos. Environ.*, 67, 27-37, (2013).
- Mikuška, P., Křůmal, K., Večeřa, Z., Characterization of organic compounds in the PM_{2.5} aerosols in winter in an industrial urban area, *Atmos. Environ.*, 105, 97-108, (2015).