



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

ZHODNOCENÍ VÝSKYTU JEMNÝCH A ULTRAJEMNÝCH ČÁSTIC V OVZDUŠÍ V PRŮMYSLOVÉ ZÓNĚ

EVALUATION OF THE PRESENCE OF FINE AND ULTRAFINE PARTICLES IN THE AIR IN AN INDUSTRIAL
ZONE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Kysilka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Helena Doležalová Weissmannová, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1880/2022 Akademický rok: 2022/23
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany
životního prostředí
Student: **Matěj Kysilka**
Studijní program: Chemie a technologie ochrany
životního prostředí
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Mgr. Helena Doležalová**
Weissmannová, Ph.D.

Název bakalářské práce:

Zhodnocení výskytu jemných a ultrajemných částic v ovzduší v průmyslové zóně

Zadání bakalářské práce:

1. Analýza současného stavu poznání zaměřené na problematiku výskytu jemných a ultrajemných částic v průmyslové zóně, vliv částic na zdraví. Přehled metod pro stanovení jemných a ultrajemných částic.
2. Odběr vzorků k analýze. Odběr vzorků na filtry a jejich analýza.
3. Vyhodnocení získaných dat.
4. Interpretace získaných dat.

Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2023:

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

Matěj Kysilka
student

Mgr. Helena Doležalová
Weissmannová, Ph.D.
vedoucí práce

vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou výskytu jemných a ultrajemných částic v průmyslové zóně. Na začátku teoretické části jsou nejprve popsány prachové částice a jejich dělení podle velikosti. Následně jsou zmíněny zdroje částic, metody jejich měření a podrobněji jsou popsány metody analýzy. Významná část rešerše je věnována zdravotním rizikům souvisejících s expozicí částicím, zmíněn je i zásadní vliv na životní prostředí. V experimentální části jsou popsány podmínky měření, která probíhala venku v blízkosti nejmenovaného průmyslového podniku. V úvodu experimentální části jsou představeny použité přístroje. Následně jsou představena naměřená a graficky vyhodnocená data o koncentraci částic v ovzduší. Při měření byly částice odebírány na filtr a byla u nich provedena analýza vybraných kovů. Analýza vybraných kovů byla provedena také u vzorků půdy a rostlinného materiálu. Získaná data koncentrace kovů byla vyhodnocena a okomentována.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of the presence of the fine and ultrafine particles in an industrial zone. At the beginning of the theoretical part, dust particles and their division by size are described. Subsequently, sources of particles, methods of their measurement are mentioned and methods of analysis are described in more detail. Significant part of the research is devoted to health risks related to exposure to particles, the fundamental impact on the environment is also mentioned. The experimental part describes the measurement conditions that took place outdoor near an unnamed industrial zone. At the beginning of the experimental part, the used devices are presented. Subsequently, measured and graphically evaluated data on the concentration of particles in the air are presented. Particles collected on filter were used for analysis of selected metals. Analysis of selected metals was performed also on the samples of soil and plant material. The obtained metal concentration data were evaluated and commented.

KLÍČOVÁ SLOVA

Znečištění ovzduší, jemné částice, ultrajemné částice, průmyslový podnik, těžké kovy, zdravotní rizika

KEY WORDS

Air pollution, fine particles, ultrafine particles, industrial plant, heavy metals, health risks

KYSILKA, Matěj. *Zhodnocení výskytu jemných a ultrajemných částic v ovzduší v průmyslové zóně* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/147919>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí. Vedoucí práce Helena Doležalová Weissmannová.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval za veškeré rady a pomoc své vedoucí Mgr. Heleně Doležalové Weissmanové, Ph.D. Dále děkuji také své rodině a přátelům za psychickou podporu při tvorbě této práce.

Obsah

1	ÚVOD	7
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	8
2.1	Definice PM.....	8
2.2	Rozdělení podle velikosti	8
2.3	Koncentrace částic v ovzduší	9
2.4	Složení částic	10
2.4.1	Těžké kovy	11
2.5	Zdroje prašných polutantů	12
2.5.1	Antropogenní zdroje.....	12
2.5.2	Přírodní zdroje.....	15
2.6	Měření částic ovzduší	15
2.6.1	Vzorkování	15
2.7	Metody stanovení koncentrace částic	16
2.7.1	Gravimetrie.....	16
2.7.2	Optické metody	17
2.8	Metody stanovení velikosti částic.....	19
2.8.1	Mikroskop	19
2.8.2	Analyzátor mobility.....	19
2.9	Vliv částic na zdraví člověka.....	20
2.9.1	Předčasná úmrtnost	21
2.9.2	Kardiovaskulární onemocnění.....	22
2.9.3	Respirační onemocnění	22
2.9.4	Neurologická onemocnění.....	23
2.10	Vliv částic na životní prostředí	23
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
3.1	Použité nástroje:	24
3.1.1	OPS 3330.....	24
3.1.2	Airchek.....	24
3.2	Popis měření ovzduší.....	24
3.3	Zpracování výsledků.....	25
3.3.1	Měření č.1.....	26
3.3.2	Měření č.2.....	26

3.3.3	Měření č.3.....	28
3.3.4	Měření č.4.....	30
3.4	Vzorky půdy a rostlinného materiálu	32
3.4.1	Stanovení sušiny.....	32
3.4.2	Mikrovltný rozklad.....	33
3.5	Analýza kovů.....	33
3.5.1	Stanovení na FAAS.....	33
3.5.2	AMA 254.....	37
4	VÝSLEDKY A DISKUSE:	39
4.1	Stanovení kovů	39
4.1.1	Chrom.....	39
4.1.2	Mangan.....	40
4.1.3	Měď	41
4.1.4	Níkl.....	42
4.1.5	Olovo.....	43
4.1.6	Zinek.....	44
4.1.7	Železo.....	45
4.1.8	Rtuť	46
4.1.9	Kadmium.....	47
5	ZÁVĚR.....	50
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	51
7	SEZNAM PŘÍLOH.....	57
8	PŘÍLOHY.....	58

1 ÚVOD

Znečištění se v různých podobách na naší planetě vyskytuje odpradáвна. K výraznému nárůstu podílu člověka na znečištění ovzduší došlo po průmyslové revoluci. Hrozbu znečištění ovzduší lidstvo zpočátku velmi podcenilo, a to později vedlo i ke tragickým událostem. Známou tragédií se stal velký smog v Londýně, v jehož důsledku zemřely stovky až tisíce lidí. Kvůli této události bylo nutné přijmout opatření, která měla za cíl udržovat přijatelnou kvalitu ovzduší. V současnosti se především v Evropě přijímají stále přísnější opatření.

Přijetí opatření ovšem automaticky neznamená jejich dodržování a na spoustě místech naší planety je výskyt znečištění v ovzduší výrazně nadlimitní. Důvodem je i fakt, že lidstvo dlouhodobě podceňuje znečištění, které není viditelné. Mediální pozornost je věnována viditelnému znečištění jako např. zaplavení oceánů plasty a jinými odpady. Znečištění ovzduší si pro svou nebezpečnost ale rozhodně zaslouží větší pozornost.

Velikost částic, které se podílí na znečištění ovzduší je těžko představitelná, běžně může být menší než řádově v jednotkách mikrometrů, a proto je běžným okem nepozorovatelná. Z tohoto důvodu si lidé často ani neuvědomují, že se nacházejí v okolí nebezpečně vysoké koncentrace částic.

Dlouhodobé vystavování zvýšené koncentrace částic má prokazatelně negativní vliv na lidské zdraví. Stanovení toxických účinků částic je důležité v místech, kde se vyskytuje větší množství lidí. Míru rizika ovlivňuje také délka expozice, s vyšší koncentrací částic přicházejí do styku pracovníci rizikových povolání. V současné době není toxicita částic stále dokonale popsána, jedná se o velmi složitou tematiku. Výsledky studií se využívají ke stanovení limitů, které ochraňují kvalitu ovzduší a pro bezpečnost práce.

Přestože má každý člověk právo dýchat čistý vzduch, v realitě toto privilegium zdaleka nemá každý. Na světě roste raketovým tempem lidská populace a s ní i počet lidí žijících ve znečištěných oblastech. Kromě lidí a jiných živých organismů na Zemi má znečištění negativní vliv také na klima. Při snaze omezení emisí narážíme na spoustu problémů. Jedním z nich je ekonomická náročnost, především chudší státy by drastická opatření mohla finančně zlikvidovat, neboť při zavádění přísnějších opatření by došlo i ke ztrátě pracovních míst. Při výrazném znečištění ovzduší, ale také dochází k ekonomickým ztrátám, neboť je více zatíženo zdravotnictví. Výrazným problémem je nedostupnost kvalitní zdravotní péče v zemích rozvojového světa. Obecně se při zavádění emisních limitů důkladně zvažují zdravotní a ekonomické dopady. Lidské zdraví je pouze jedno a jeho ochraně by měla být věnována největší pozornost.

2 TEORETICKÁ ČÁST

Sloučenin zodpovědných za znečištění ovzduší je celá řada. Znečištění se vyskytuje nejčastěji ve formě plynu nebo aerosolu. Aerosolem se označuje směs malých (do 10 μm) pevných či kapalných částic dispergovaných ve vzduchu. Skleníkové plyny jsou zodpovědné především za změnu klimatu. Znečištění ovzduší aerosolem je způsobeno částicemi, které se zkráceně označují jako PM. Tyto částice se kromě změn klimatu podílí také na negativních účincích na zdraví.

2.1 Definice PM

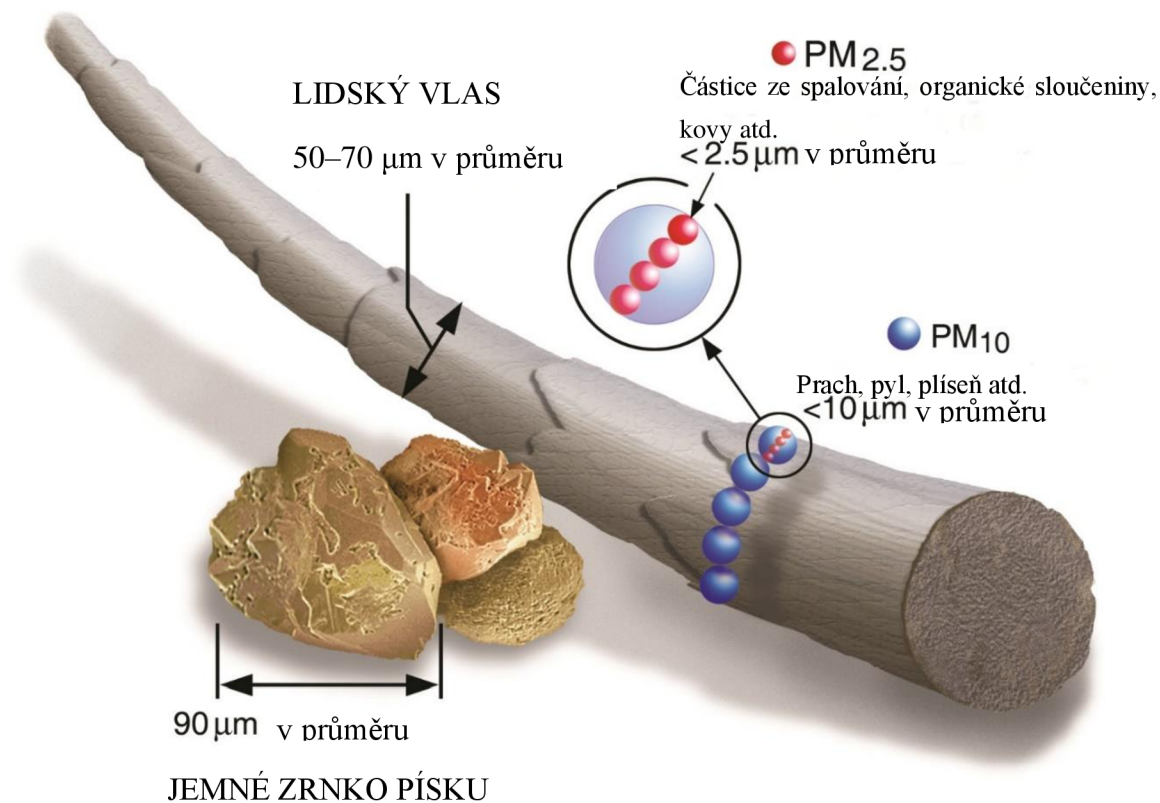
PM je zkratkou výrazu particulate matter neboli částicová hmota, používají se také výrazy suspendované, pevné nebo prachové částice. Prachové částice (PM) jsou směsí pevných a kapalných částic suspendovaných ve vzduchu. Prachové částice jsou charakterizovány svými fyzikálními vlastnostmi, z nichž nejdůležitější vlastností částic, která se dlouhodobě sleduje je jejich velikost. Chemické vlastnosti částic jsou nejednotné, často se liší složením i v jedné velikostní frakci. Podle chemického složení existuje stovky různých PM [1].

Na základě vzniku se částice dělí na primární a sekundární. Primární částice se do ovzduší dostávají přímo, mimo jiné vznikají při spalování fosilních paliv, silniční dopravě a v průmyslové výrobě. Zdrojem primárních částic jsou také přírodní jevy, kdy dochází k přenosu půdních částic větrem. Sekundární částice jsou formovány ve vzduchu chemickými přeměnami primárních částic. Dusičnany takto vzniknou postupnou přeměnou z NO_2 , u siřičitanů je primární zdroj SO_2 [2].

2.2 Rozdělení podle velikosti

Jak už bylo zmíněno, nejdůležitější dělení částic je podle velikosti jejich průměru. V tomto dělení se částice považují za ideální koule, v realitě ovšem zdaleka nemusí mít pravidelný tvar. Zkráceně se částice zapisují jako PM s dolním indexem, který označuje maximální velikost částic (v μm) ve frakci.

Částice o průměru větším než 10 μm , nepředstavují velké zdravotní riziko a nejsou regulovány podle EPA. Rizikové částice se rozdělují na 3 základní frakce: PM_{10} (o průměru menším než 10 μm), $\text{PM}_{2,5}$ s průměrem menším než 2,5 μm a $\text{PM}_{0,1}$ s průměrem pod 0,1 μm . $\text{PM}_{2,5-10}$ se označuje jako hrubá frakce. Částice s průměrem menším než 2,5 μm se nazývají jemné částice, pokud je průměr menší než 0,1 μm jedná se o ultrajemné částice [2].



Obrázek 1: Porovnání velikosti částic [Upraveno dle 3]

Na obrázku 1 je znázorněna velikost frakcí PM_{2.5} a PM₁₀ v porovnání s tloušťkou lidského vlasu. Lidským okem stěží viditelný vlas má více než dvacetinásobný průměr oproti frakci PM_{2.5}. Podobně vyznívá porovnání PM_{2.5} s jemnými zrnky písku. Díky tomuto porovnání si lze lépe představit, jak malé částice této frakce ve skutečnosti jsou. Jejich malá velikost průměru je nebezpečnou vlastností, neboť kvůli ní jsou delší dobu zadržovány v lidském těle.

Rozdělení do frakcí podle velikosti je vhodné z důvodu stanovení možných zdravotních následků. Velikost částice ovlivňuje, jak hluboko do respiračního traktu pronikne. Částice PM₁₀ a menší představují zdravotní riziko, neboť se dostávají do respiračního traktu. Jemné a ultrajemné částice mají nejvyšší riziko průniku až do plic a jsou nebezpečnější než větší částice [1].

2.3 Koncentrace částic v ovzduší

Pro imisi částic v ovzduší byly v ČR stanoveny průměrné roční koncentrace. Imisní limit PM₁₀ má hodnotu 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a za rok může být překročen maximálně 35krát. Imisní limit pro PM_{2.5} je od roku 2020 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [4].

Obecně platí, že koncentrace částic je nejvyšší v chladném období. Kromě vytápění domácností je způsobena také teplotní inverzí. Naopak ke snížení koncentrace částic v ovzduší dochází při vysoké rychlosti větru a srážkách. Rychlost usazování pevných částic závisí také na jejich velikosti a hmotnosti. Částice větší než 10 μm se usadí v rámci několika hodin. Naopak schopnost setrvávat v atmosféře i několik týdnů mají částice menší než 1 μm [5].

2.4 Složení částic

Chemické složení částic je velmi různorodé, částice obsahují organické i anorganické složky. Negativní účinek částic na klima a zdraví lidí se může výrazně lišit v závislosti na složení. Nejdůležitější je určení složky nejvíce se podílející na toxicitě částic. Pro svou důležitost se tomuto tématu věnuje spousta studií. I přes množství získaných informací není tato problematika dodnes zcela objasněna.

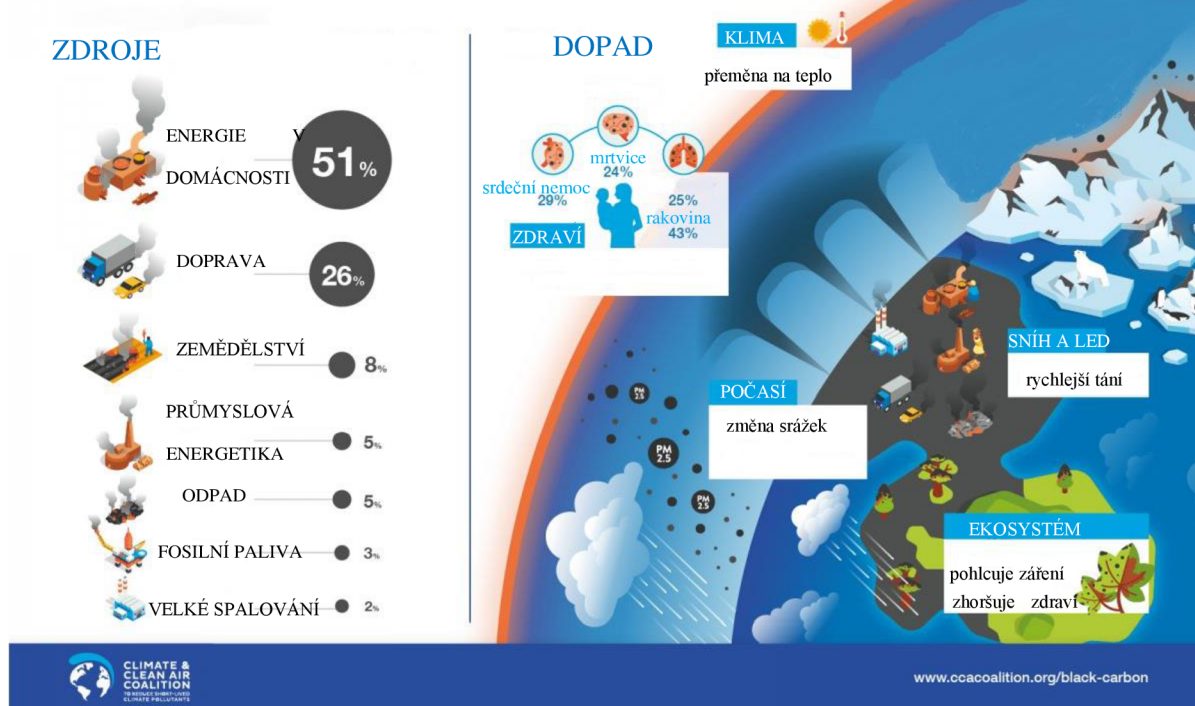
Chemické složení částic je logicky závislé na jejich původu. I přes jednotlivé rozdíly ve složení lze obecně charakterizovat nejčastěji se vyskytující prvky a sloučeniny. Podle americké studie se mezi hlavní, nejčastěji zastoupené složky částic řadí amonium, elementární (černý) uhlík, organický uhlík, dusičnany, křemík, sodík a sírany [6].

Je nutné vzít na vědomí, že obsah jednotlivých složek je závislý také na velikosti frakce částic. U jemných částic dominuje uhlík a amonné ionty společně se sírany a dusičnany. Pro hrubé částice je charakteristický zvýšený obsah železa, dále také sůl (NaCl) a vápník. Chemické složení částic je také výrazně závislé na ročním období i na regionu. Nejvíce se v průběhu celého roku na hmotnosti částic podílí amonium [6].

7 základních komponent částic bylo podrobena výzkumu zabývajícím se jejich vlivem na očekávanou délku života. Negativní vliv na zdraví byl pozorován u síranů, pokles jejich koncentrace prokazatelně zvýšil očekávanou délku života. Podobný vliv mělo také snížení koncentrace amonia a sodných iontů. U dusičnanů, elementárního i organického uhlíku a křemíku nebyl prokázán jejich vliv na očekávanou délku života i přesto tyto složky mohou mít negativní účinky na zdraví [7].

Kromě negativních účinků na zdraví mají některé složky částic vliv na klima. Výraznou složkou jemných částic podílejících se na změně klimatu je černý uhlík. Černý uhlík vzniká při nedokonalém spalování a v atmosféře působí pouze několik dní. I přestože setrvává v atmosféře pouze krátkou dobu, jeho vliv na klimatickou změnu je zásadní, odhaduje se, že je při stejné hmotnosti je až 1 500krát vyšší než u oxidu uhličitého. Černý uhlík má velmi dobrou schopnost absorbovat světelné záření a převádět ho na teplo. Kromě zahřívání svého okolí může při přítomnosti v atmosféře také ovlivnit tvorbu oblaků a déšť, což může mít nepřímé negativní účinky na zemědělskou úrodu. Při usazení na rostlinách může způsobovat výrazný nárůst teploty na povrchu. Černý uhlík je jedním z hlavních původců změn klimatu v důsledku působení člověka a snížení jeho množství v atmosféře patří k zásadním úkolům budoucnosti [8].

ČERNÝ UHLÍK



Obrázek 2: Zdroje černého uhlíku [Upraveno dle 9]

2.4.1 Těžké kovy

I přes menšinové zastoupení v částicích je velká pozornost studií věnována těžkým kovům. Jako těžké kovy se obecně označují kovy, které ohrožují životní prostředí. Působení těžkých kovů v přírodě má pro její zachování devastující účinky. Na zvýšenou koncentraci těžkých kovů v přírodě mají rovněž prokazatelně zásadní vliv lidské činnosti.

Mezi antropogenní zdroje těžkých kovů patří např. zemědělství a některá odvětví průmyslu. V ovzduší jsou těžké kovy udržovány delší dobu pouze v plynné formě, neboť ve formě prachových částic díky své vysoké hustotě snadno padají na zem. Čím menší mají částice průměr tím déle zůstávají v atmosféře. V půdě přetrvávají těžké kovy velmi dlouhou dobu, neboť nejsou mikrobiálně a chemicky degradabilní [8].

Negativní vlastnosti těžkých kovů se dlouhodobě zkoumají, jejich nežádoucí vliv na zdraví člověka byl potvrzen v mnoha studiích. U těžkých kovů byly prokázány cytotoxické účinky, mezi tyto kovy se řadí např. vanad. Vanad má významný vliv na vznik reaktivních forem kyslíku a způsobuje oxidační stres buněk. Významnou cytotoxicitu má také olovo a jeho vliv je dlouhodobě monitorován. Kovy jako např. měď a mangan poškozují DNA, což také může vést až ke smrti buněk. Kromě těžkých kovů mají negativní vliv na životaschopnost buněk také organické látky [10].

2.5 Zdroje prašných polutantů

Jak už bylo zmíněno, polétavé částice mohou pocházet z přírodních i antropogenních zdrojů. S rozvojem průmyslu, dopravy a růstem světové populace mají antropogenní zdroje čím dál větší podíl na celkové koncentraci částic v ovzduší. Pro konkrétní zdroj jsou charakteristické fyzikální i chemické vlastnosti částic. Určení chemických vlastností částic je využíváno v toxikologických studiích.

2.5.1 Antropogenní zdroje

Člověk a jeho činnosti jsou v současnosti stále významnějšími zdroji částic. Přestože se člověk na emisi částic podílel po staletí, v posledních desetiletích došlo k výraznému nárůstu. Jak už bylo zmíněno mezi některé příčiny tohoto nárůstu patří rozvoj průmyslu a výrazný nárůst dopravy. Dále se na znečištění výrazným způsobem podílí také např. zemědělství a domácí spalování. Podíl jednotlivých zdrojů na znečištění se výrazně odlišuje podle regionu, dále má významný vliv také vyspělost země. S vyspělostí zemí souvisí další důležitý faktor, jedná se o populační růst. Pro rozvojové země je charakteristický nekontrolovaný populační růst, který má za následek větší znečištění. Na podílu jednotlivých zdrojů na znečištění mají vliv také imisní limity stanovené pro větší bezpečnost populace. Tyto imisní limity ale mohou splnit svůj účel pouze v případě dodržování.

Jak už bylo řečeno zdroje jemných částic se liší podle regionu. Mezi významné zdroje jemných částic se řadí doprava, průmysl a také spalování biomasy v méně vyspělých zemích. Celosvětově bylo v roce 2015 25 % všech emisí $PM_{2,5}$ způsobeno dopravou, 15 % průmyslem, 20 % domácím spalováním. Doprava byla hlavním zdrojem znečištění $PM_{2,5}$ v Indii (37 %), jihovýchodní Asii (36 %) a jihozápadní Evropě (35 %). Průmysl byl největším zdrojem v Japonsku (34 %), Turecku (30 %) na Blízkém východě a v jihovýchodní Asii (27 %). Domácí spalování bylo hlavním zdrojem v Africe (34 %) a ve střední a východní Evropě (32 %). Přírodní prach měl největší podíl na $PM_{2,5}$ na Blízkém východě [11].

2.5.1.1 Průmysl

Jedním z hlavních zdrojů antropogenního znečištění ovzduší je průmysl. V průmyslových zónách je koncentrace částic výrazně vyšší než v okolí. Do dlouhodobého kontaktu se znečištěním přicházejí především pracovníci v továrnách. Stanovení koncentrace částic je klíčové pro zhodnocení rizika na pracovišti. Na základě rizika se poté přijímají opatření, aby došlo k omezení expozice nebezpečným částicím.

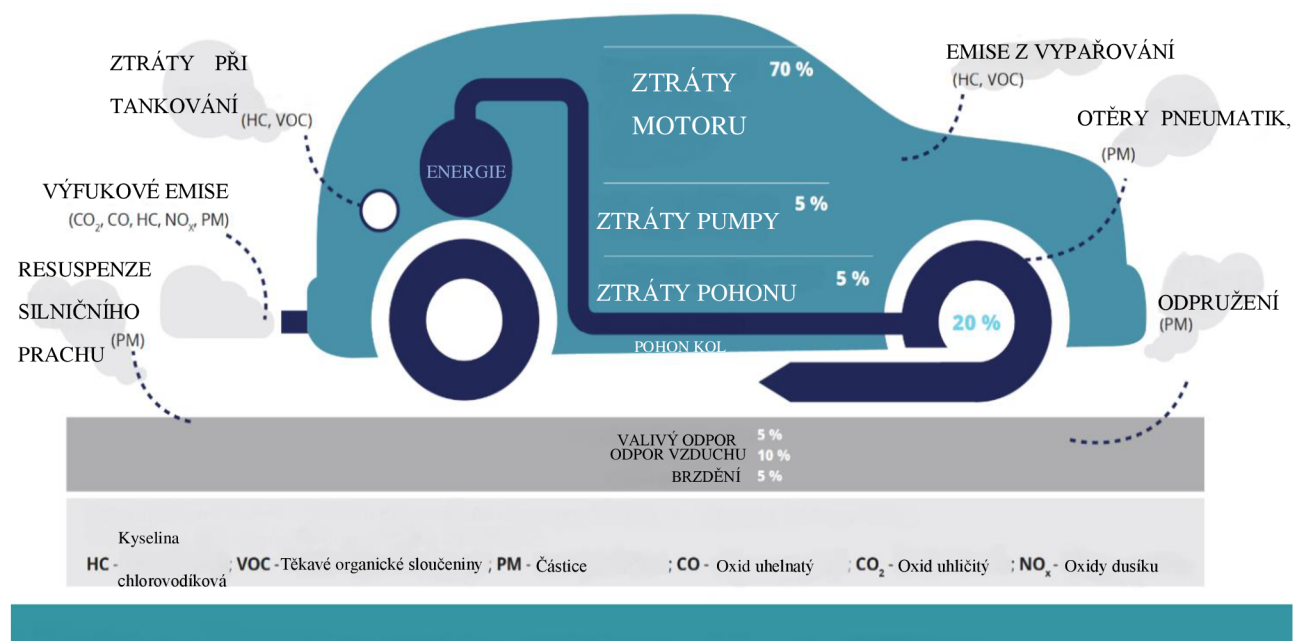
Pro zhodnocení rizik částic je důležité znát používaný materiál ve výrobě a jeho možné toxické účinky. Dále se zhodnocuje míra vystavení částicím přes kůži, inhalaci a požitím. Pro riziko vzniku onemocnění hraje významnou roli věk pracovníka, starší lidé patří k ohroženým skupinám. Při práci v továrně jsou pracovníci vždy vystaveny určitému riziku, pro jeho snížení lze podniknout několik kroků. Pokud je to možné nahradit toxickou látku při výrobě jinou. Tato možnost je ale ve spoustě průmyslových výrobcích neproveditelná. Dále je pro menší kontakt s částicemi nutné pracovní prostor dostatečně ventilovat. Zamezení kontaktu kůže s částicemi lze dosáhnout používáním ochranných obleků, rukavic a brýlí. Celkově je pro bezpečnost práce nejdůležitější především informovanost pracovníků. Při jakékoliv změně pracovních podmínek na ni musejí být pracovníci okamžitě upozorněni [12].

V blízkosti továrny není zvýšená koncentrace částice pouze v ovzduší, také dochází ke kumulaci v půdě. Obecně platí, že v blízkosti továrny je zvýšená koncentrace těžkých kovů. Mezi tyto kovy se řadí např. železo, mangan, chrom, olovo atd. Koncentrace kovů a míra znečištění závisí na druhů průmyslové výroby. V ocelovém průmyslu je vysoká koncentrace částic vápníku, železa, chloru, sodíku [13]. Určit přesné účinky částic na zdraví pracovníků je obtížné. Jednou z možností je měření částic v reálném čase během celého pracovního dne. Zdravotní rizika se následně vyhodnocují na základě koncentrace částic [14].

2.5.1.2 Doprava

Významným antropogenním zdrojem částic je doprava. Zvýšený výskyt částic je poblíž vytížených dopravních tahů. Z tohoto důvodu se měření plánují v okolí křižovatek a frekventovaných silnic. Na celkovém znečištění v dopravě se výrazně podílí osobní auta, nákladní vozidla a autobusy. Koncentrace částic v okolí komunikace kolísá v závislosti na vytíženosti, největší je v čase dopravní špičky, v nočních hodinách obvykle výrazně poklesne.

Částice z dopravy nepocházejí pouze ze spalovacích motorů, také vznikají při tření pneumatik, z brzdných komponent a z vozovky. Velikost částic se výrazně odlišuje podle původu, toho se využívá při určení zdroje znečištění. Mezi charakteristiky ovlivňující vlastnosti částic se řadí typ vozovky, druh motoru vozidla a charakter dopravy. Ke stanovení hmotnosti a koncentrace se využívá různých metod měření. Mezi tyto metody se řadí kontrolované prostředí jako např. silniční tunel nebo porovnání dvou míst jako např. silnice a pozadí města. Dále se používají komplikovanější specifické metody modelování na základě statistik [15].



Obrázek 3: Emise v dopravě [Upraveno dle 16]

2.5.1.3 Zemědělství

Neblahý vliv zemědělství na koncentraci částic v ovzduší byl potvrzen studiemi. Jedním z hlavních zdrojů emisí v zemědělství je používání syntetických hnojiv. Používání hnojiv má zcela zásadní roli, neboť bez nich by ve světě nastal hladomor. Hlavní znečišťující látkou v zemědělství, která se dostává i do ovzduší je amoniak. Mezi hlavní zdroje amoniaku patří

kromě hnojení, chov hospodářských zvířat. V ovzduší se amoniak vyskytuje nejčastěji ve formě síranu amonného a dusičnanu amonného.

Zemědělství se jako zdroj významně podílí na koncentraci jemných částic v Evropě, USA a v Číně. Z antropogenních zdrojů jemných částic v Evropě je 55 % tvořeno zemědělskými emisemi. Podobně je to ve Spojených státech, kde je ve východní a západní části cca polovina antropogenních zdrojů znečištění způsobena zemědělstvím. Oxidy dusíku vznikají spojením mezi zemědělskými emisemi a povrchovým znečištěním vzduchu. Snížení emisí amoniaku a oxidů dusíku má prokazatelně pozitivní vliv na koncentraci jemných částic [17].

Závislost výskytu amoniaku na výskytu jemných částic byla zkoumána na více kontinentech. V Evropě se při snížení koncentrace amoniaku o 50 % snížila koncentrace jemných částic o 11 %. V Severní Americe při stejném poklesu koncentrace amoniaku klesla koncentrace jemných částic o 8 %. Pokles koncentrace jemných částic ve východní Asii byl pouze 5 %. V jižní Asii měl 50% pokles koncentrace amoniaku účinek na pouze 2% poklesu koncentrace jemných částic. Nejvyšší vliv má koncentrace amoniaku na koncentraci jemných částic v zimě. Je to z důvodu nižší teploty, při které se amoniak častěji nachází v částicové než plynné formě [18].

Pro svůj vliv na koncentraci jemných částic mají emise ze zemědělství významné ekonomické a zdravotní dopady. Snížení emisí amoniaku snižuje riziko předčasného úmrtí lidí a má pozitivní vliv na ekonomiku. Některé státy by při snížení zemědělských emisí o 50 % ušetřily na ekonomické dopadech v řádech desítek miliard dolarů. Při snížení emisí o 100 % by se částka v některých zemích vyšplhala až na stovky miliard dolarů [19].

2.5.1.4 Domácí spalování

Domácí spalování se významně podílí na emisi částic. Na rozdíl od ostatních antropogenních zdrojů emise výrazně závisí na ročním období. Domácí spalování se nejvíce podílí na koncentraci jemných částic v zimním období, kdy je venku nejnižší teplota. V letním období ve většině oblastech není potřeba topit a koncentrace částic klesá.

Fosilní paliva jako např. uhlí uvolňují při spalování velké množství částic a podílejí se významnou měrou na antropogenním znečištění. Vlastnosti částic emitovaných při spalování závisí na konkrétním druhu uhlí, neboť jednotlivé druhy mají rozdílné složení. Emitované částice způsobují změnu klimatu, neboť absorbují a rozptylují viditelné světlo. Nejvíce absorbují světlo částice vzniklé při spalování plynné fáze. Ke spalování plynné fáze dochází při uvolňování těkavých složek z uhlí, kterých černé uhlí obsahuje velké množství. Částice vzniklé dokonalým spalováním černého uhlí pohlcují světlo velmi dobře, při nedokonalém spalování je schopnost pohlcovat světlo výrazně omezena. Špatně absorbují světlo částice vzniklé spalováním hnědého uhlí a uhelných briket. Velikost emitovaných částic se u všech druhů uhlí odlišuje mírně, vždy jde o průměr menší než 100 nm [20].

V současné době se od spalování uhlí upouští. Důraz je kladen na využívání obnovitelných zdrojů energie. V Evropě se stále více podporuje biomasa jako zdroj energie. Spalování biomasy se však také výrazně podílí na znečištění ovzduší. Proto je třeba mít na paměti, že i spalování obnovitelných zdrojů energie produkuje velké množství částic negativně působících

na lidské zdraví. Studie potvrdila vliv částic produkovaných spalováním biomasy na zvýšený výskyt infarktu myokardu. Bylo zjištěno, že nejvyšší riziko infarktu nastává, když se na celkové koncentraci jemných částic nejvíce podílí částice vzniklé spalováním biomasy. Největší asociace mezi koncentrací jemných částic a výskytem infarktu nastala v zimním období [21].

2.5.1.5 Vnitřní zdroje

Stanovení částic v domovech lidí má velký význam, neboť v nich lidé tráví podstatnou část svého života. Při stanovování zdrojů znečištění ve vnitřních prostorech si je potřeba uvědomit, že na celkovém znečištění se podílejí i vnější zdroje. Podíl vnějších zdrojů na koncentraci částic uvnitř závisí na výměně vzduchu. Při časté výměně vzduchu se postupně koncentrace částic uvnitř i vně vyrovnávají. Naopak při minimální výměně vzduchu dochází k hromadění částic vzniklých při domácích činnostech.

Domácí zdroje znečištění byly pozorovány a popsány ve spoustě studiích. Hlavními činnostmi zodpovědnými za zvýšenou koncentraci částic v domech je vaření (a další tepelné úpravy jídla) a čištění. Pohyb lidí má také vliv na koncentraci částic, neboť při něm se usazený prach dostává do ovzduší. Co se týče velikosti částic, zdrojem hrubé frakce je např. čištění a pohyb osob. Na koncentraci jemných částic se nejvíce podílí procesy tepelné úpravy jídla jako např. pečení a grilování. Celkově lze shrnout, že mechanické procesy generují spíše hrubé částice a spalovací procesy jemné částice [22].

2.5.2 Přírodní zdroje

Přírodními zdroji částic jsou pouze přirozené procesy na Zemi, nejsou produktem lidských činností. Zdrojem přírodních prachových částic bývají často pouště, kde se písek působením větru snadno dostává do ovzduší. Dalšími možnými zdroji jsou např. lesní požáry a sopky. Podíl přírodních zdrojů na celkové koncentraci částic se liší podle regionu, nejvyšší bývá v nejméně zalidněných oblastech. K určení podílu přírodních částic na celkové hmotnosti frakce částic se používají modely. Většina studií se zabývá antropogenní složkou, jako přírodní množství se považuje rozdíl mezi celkovou hmotností a stanovenou antropogenní. Na základě této metody bylo stanoveno, že v Evropě se přírodní prach podílí na 30–50 % celkové hmotnosti hrubých částic. Jako příčiny se uvádí přenos prachu ze Sahary, dále také eroze a resuspenze na evropském kontinentu [23].

2.6 Měření částic ovzduší

2.6.1 Vzorkování

Před samotným vzorkováním ovzduší je třeba stanovit podrobný plán měření, určit vhodné místo a čas. Při výběru vhodného nástroje ke sběru vzorků je důležité znát jeho specifické vlastnosti, které ho zvýhodňují pro určité prostředí, naměřená koncentrace se může lišit v závislosti na použitém přístroji.

Možné dělení vzorkovačů je podle dosaženého objemového průtoku. Ke vzorkování jemných částic se používají 3 základní typy vzorkovačů. Mezi ně se řadí velkoobjemové vzorkovače, nízkoobjemové vzorkovače a kaskádové impaktory. Velkoobjemové vzorkovače obsahují pouze jeden impaktor, který odpovídá požadované frakci částic. U nízkoobjemových vzorkovačů jsou 2 impaktory na PM_{10} a $PM_{2,5}$. Kaskádové impaktory jsou schopny pojmout různorodé velikosti částic [24].

Kaskádové impaktory se skládají z několika částí. Podle jednotlivých stupňů impaktorů dochází k rozdělení jednotlivých částí frakce. Například u osobního kaskádového impaktoru (PCIS) dochází k rozdělení do čtyř fází, po kterých následuje filtr. Tyto předěly jsou 0,25; 0,5; 1 a 2,5 μm , dochází tedy k rozdělení do 5 frakcí [25].

Objemový průtok u vzorkovačů má zásadní vliv na délka sběru. Pro konkrétní měření je nutné srovnat kritéria jako např. hluk vzorkovače a množství získaných částic a určit, která metoda bude pro dané měření nejvhodnější. Velkoobjemové vzorkovače jsou nevhodné pro použití ve vnitřních prostorech kvůli hluku, nízkoobjemové jsou méně efektivní z důvodu nižší koncentrace získaného vzorku. Pro použití ve vnitřních prostorech i venku jsou vhodné vzorkovače s vysokým průtokem, které jsou jednoduše operovatelné a manipulovatelné a dokážou sesbírat jemné a ultrajemné částice. Mezi tyto vzorkovače se řadí např. Harvardské impaktory [24].

Nejběžnější vzorkovače fungují na bázi filtru. Nástroje s filtrem jsou robustní a přesné při stanovení vlastností částic. Ovšem jejich zásadní nevýhodou je, že při měření jemných částic nejsou schopny poskytovat informace v reálném čase. Často trvá i několik týdnů, než jsou potřebná data zanalyzována. Další nevýhodou filtrových technik je nutnost dlouhé vzorkovací doby (několik hodin až dny). Dochází při tom ke zprůměrování hodnot a je těžké později určit přesný čas nejvyšší koncentrace částic [26]. Instrumenty měřící koncentraci v reálném čase mají výhodu, neboť zaznamenají nárůst koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ a umožňují ji přiřadit ke konkrétnímu času. Díky tomu lze určit, kdy přesně došlo k nárůstu koncentrace. [27].

Při sběru je nutné dávat pozor, aby nedošlo ke kontaminaci vzorku. Dále také aby u těkavých látek nedošlo ke změně koncentrace při vzorkování, přenosu a následné analýze. Koncentrace částic je také závislá na atmosférických podmínkách. Jak už bylo zmíněno různé vzorkovače pořídí odlišné vzorky, vliv má vstupní charakteristika, druh filtru. Standardizace metod je potřebná ke kvantifikaci účinnosti vzorkování. Ze získaných hodnot se poté určuje správnost a přesnost měření. Nejčastěji stanoveným atributem sbíraných částic je jejich hmotnost. Tato metoda je nejpraktičtější a cenově nejméně nákladná. Pro zdravotní studie je důležité také kvalitativní stanovení [26].

2.7 Metody stanovení koncentrace částic

2.7.1 Gravimetrie

Gravimetrie je hojně využívána při stanovování množství částic v ovzduší. Velká výhoda této metody spočívá v její jednoduchosti. Principem této metody je stanovení hmotnosti částic zachycených na filtru. Při měření je do vzorkovače nasáván vzduch, po průchodu filtrem by měl být přítomen pouze plyn bez přítomnosti částic. Nejdříve je zvážen čistý filtr (hmotnost filtru bývá často uváděna výrobcem), po proběhlém měření je stanovena hmotnost filtru i se zachycenými částicemi. Rozdíl mezi hmotností filtru s částicemi a samotným filtrem je poté stanoven jako hmotnost měřené frakce částic. Pro převedení na koncentraci je nutné znát objem vzorkovaného vzduchu. Při konstantním nastaveném průtoku lze snadno určit celkový objem z doby trvání měření [28].

K filtrům nejčastěji používaným při gravimetrických metodách patří teflonový membránový. Mezi pozitivní vlastnosti, díky nimž jsou tyto filtry hojně používány se řadí vysoká stabilita a

odolnost. Nevýhodou membránových filtrů je nižší kapacita zachycených částic, neboť většina se zachytává na povrchu. Vláknové filtry jsou složeny nejčastěji ze skla, celulózy, křemene. Na rozdíl od membránových filtrů mají částice schopnost pronikat hlouběji do vláknového filtru. Výhodou průniku částic hlouběji do filtru je jeho vyšší kapacita, naopak nevýhodou tohoto typu filtru je znemožnění některých následných analýz [28].

Pro přesné gravimetrické stanovení je potřeba udržovat v místnosti čisté prostředí, dále by nemělo docházet k výkyvům teploty a vlhkosti. Gravimetrické stanovení částic ztěžují nežádoucí adsorpce jiných látek na filtr, vzorek může být kontaminován např. adsorpcí plynů, vody. Nesprávné snížení hmotnosti filtru může způsobit vypaření nestabilních látek. Při gravimetrii hraje roli také lidský faktor, neboť je se vzorky neustále manuálně manipulováno. Při dodržování správných postupů dochází k minimální chybě při gravimetrickém stanovení. Používání robotů místo manuálního stanovení nemá zásadní vliv na přesnost, ale výrazně zrychluje proces [28].

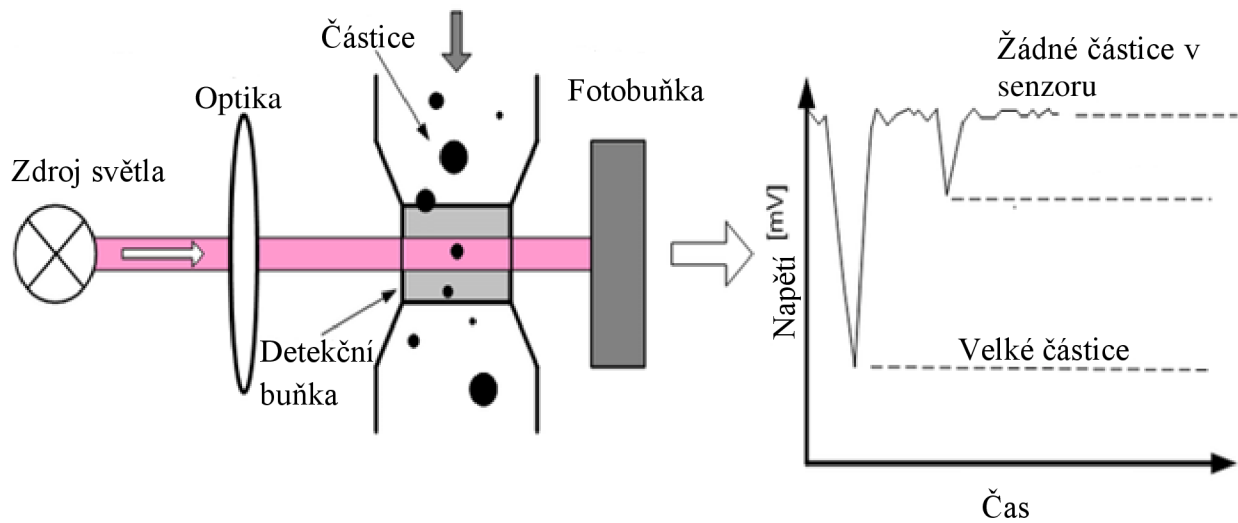
2.7.2 Optické metody

Pro stanovení koncentrace částic v reálném čase se používají optické metody. Základem těchto metod je interakce částic s dopadajícím světlem. Částice vysílané světlo rozptylují a současně je část přeměna na jinou formu energie (adsorpce). Součet energie záření při rozptylu a adsorpci se označuje jako extinkce světla. Na rozptylu, adsorpci a extinkci světla jsou založeny nástroje, které se využívají pro měření [28].

2.7.2.1 Rozptyl světla

Rozptyl světla silně závisí na poměru velikosti částic ku dopadajícímu světlu, pro velmi malé částice tato závislost neplatí. Přístroje, které měří intenzitu rozptylu světla se nazývají fotometry. Rozptylové fotometry měří intenzitu rozptýleného světla na fotometrických detektorech. Většina těchto přístrojů používá viditelné světlo (600 nm) a měření probíhá obvykle pod více úhly [28].

Optický čítač částic (OPC) funguje na podobném principu jako fotometr. Jeho výhodou na rozdíl od fotometru, je zaměření světelného paprsku na pouze jednu částici. Na fotodetektoru je detekován elektrický impuls, z jehož výšky při porovnání s kalibrační křivkou je stanovena velikost částic. Výška pulzu je závislá kromě velikosti také na jiných vlastnostech částic např. indexu lomu [28].



Obrázek 4: Princip funkce optického čítače částic [29]

Kondenzační čítače částic (CPC) se používají pro měření koncentrace malých částic. Tyto částice nejsou dostatečně velké, aby rozptýlovaly světlo pro detekci optickým čítačem. Na zvětšení částic má vliv kondenzace produkované páry z kapaliny. Po dostatečném zvětšení částic už má CPC podobnou funkci jako optický čítač [28].



Obrázek 5: Kondenzační čítač částic [30]

2.7.2.2 Absorpce světla

Metody založené na absorpci světla jsou často využívány pro stanovení obsahu černého uhlíku. Mezi přístroje fungující na principu absorpce světla se řadí Spotmeter, který stanovuje koncentraci částic porovnáním odraženého světla na exponovaném a čistém filtru. Podobným příkladem je Aethalometer, který stanovuje koncentraci na základě absorpce světla při různých vlnových délkách na křemenném filtru [28].

Na principu fotoakustického jevu fungují fotoakustické senzory (PASS). Absorpcí amplitudově modulovaného světla dochází ke vzniku tepla na absorbujících částicích. Vedením tepla do okolního plynu vznikají akustické tlakové vlny, které jsou detekovány na mikrofonu. Velikost detekovaného signálu je závislá na koncentraci absorbujících částic, pro větší částice (obvykle nad 300 nm) je úměrná povrchu [28].

U metody LII (Laser-induced incandescence) jsou částice zahřívány krátkým laserovým pulzem. Při laserovém pulzu je docíleno teploty těsně pod sublimací uhlíku. Po dosažení této teploty se částice rozžhaví a rozpadnou se. Rozklad částic se následně měří pomocí fotonásobiče [28].

2.8 Metody stanovení velikosti částic

2.8.1 Mikroskop

Pro stanovení velikosti a morfologie částic se využívá elektronový mikroskop. Často se používá pro stanovení emisí v dopravě např. pro porovnání tvarů částic v závislosti na složení paliva. Přes množství informací, které umožňuje získat má elektronový mikroskop i své nevýhody. Pro dosažení reprezentativního vzorku je nutné analyzovat dostatečně velké množství částic, nevýhodou je tedy dlouhý čas analýzy. Vzorky, které obsahují těkavou složku nelze stanovit, neboť ve vakuu a zahříváním elektronovým paprskem se vypařují [28].



Obrázek 6: Elektronový mikroskop [31]

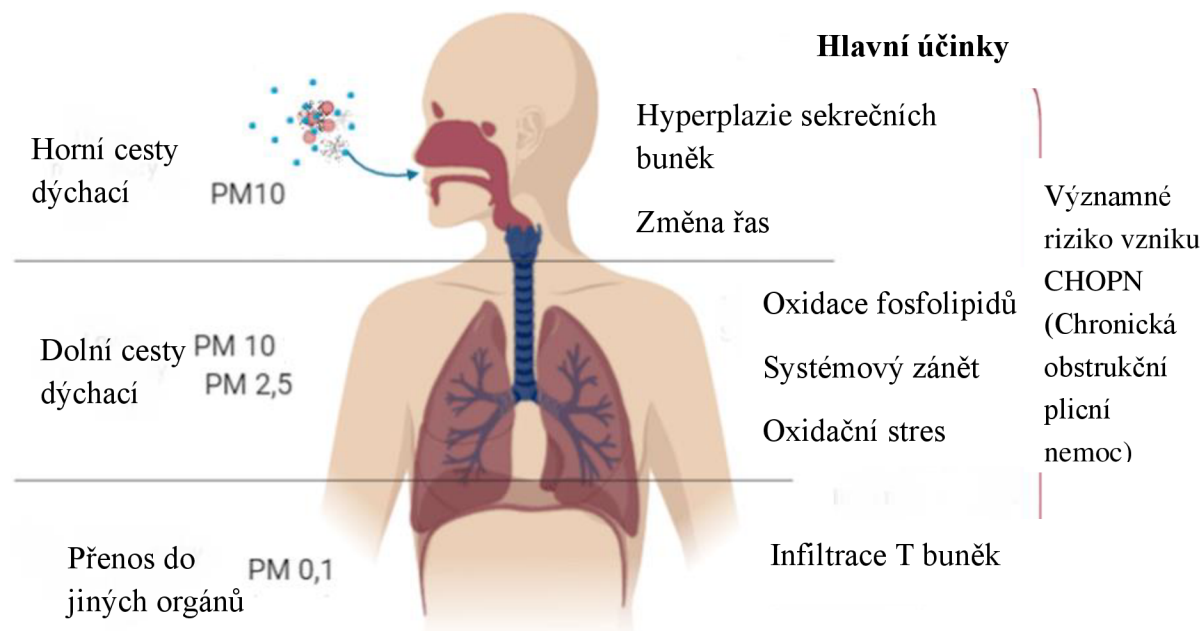
2.8.2 Analyzátor mobility

Prvním analyzátozem mobility částic byl elektrický analyzátor aerosolu (EAA). Tento model byl nahrazen analyzátozem diferenciální mobility (DMA). DMA používá bipolární difúzní nabíjení k poskytnutí dobře definovaného rozložení náboje v aerosolu. Po naložení částice vstupují do klasifikátoru, přes který projdou jenom částice s úzkým rozsahem elektrické mobility. Tyto částice jsou poté měřeny elektroměrem nebo CPC [28].

2.9 Vliv částic na zdraví člověka

U prachových částic byla zjištěna celá řada negativních účinků na zdraví člověka. Zdravotní riziko se odlišuje podle zdroje původu. Částice přírodního původu jsou obecně méně nebezpečné než částice antropogenního původu z důvodu adaptace člověka na okolní prostředí. Kontrola kvality ovzduší má velký význam u rizikových povolání, ve kterých přicházejí pracovníci do kontaktu s vysokou koncentrací částic. Mezi ohrožené skupiny patří i lidé žijící poblíž průmyslového podniku nebo jiného zdroje znečištění. Určení konkrétních zdravotních rizik je velmi důležité pro bezpečnost práce. Zdravotní následky jsou v současnosti předmětem nespočet epidemiologických studií.

Konkrétní zdravotní následky závisí na době expozice, složení, a především velikosti částic. Menší částice pronikají hlouběji do lidského těla než větší. Částice, které proniknou hlouběji se v těle udržují delší dobu. Hrubá frakce se ukládá v horních cestách dýchacích. Jemné částice pronikají do alveol v plicích [32]. Ultrajemné částice pronikají ještě hlouběji do plic, jsou schopny uniknout alveolárním makrofágům a ukládají se v plicním intersticiu. Vstupují také do krevního řečiště a jsou transportovány do jiných orgánů. [33].



Obrázek 7: Průnik částic do lidského těla [Upraveno dle 34]

Nebezpečnou vlastností ultrajemných částic je velký povrch vůči objemu. Díky této vlastnosti jsou vysoce biologicky aktivní [35]. V napadených buňkách způsobují zánětlivou reakci. Kvůli většímu povrchu je stejná hmotnost ultrajemných částic zodpovědná za prokazatelně vyšší zánětlivé účinky než u jemných částic [32]. Toto potvrdila např. studie která testovala toxicitu ultrajemných částic TiO_2 na myších. Ultrajemné částice v porovnání s jemnými způsobily vyšší myokardiální, nefrologické i jaterní poškození [36]. Velikost průměru částice velmi ovlivňuje rozsáhlost poškození buňky. Dánská studie stanovila, že největší poškození DNA vyvolané volnými radikály působí částice o průměru 57 nm. U lidí po fyzické zátěži dochází k mírně většímu poškození než u lidí, kteří jsou v klidu. [37].

WHO nerozlišuje toxicitu jemných částic na základě složení. Ovšem studie potvrdily jistou závislost na složení, jak už bylo zmíněno např. sírany se významně podílejí na toxicitě [38]. Dále bylo prokázáno, že existují rizikové skupiny náchylnější k častějšímu výskytu zdravotních problémů. Mezi ohrožené věkové kategorie se řadí děti a starší lidé. Dále jsou v ohrožení lidé s kardiovaskulárními a respiračními nemocemi a souvislost s čtenějšími zdravotními problémy byla zjištěna také u lidí s cukrovkou, chronickou obstrukční plicní nemocí (CHOPN) a zvýšeným BMI [39].

2.9.1 Předčasná úmrtnost

Jednou z prvních studií zabývajících se vlivem částic na předčasnou úmrtnost byla Harvardská studie, která proběhla v 6 amerických městech v 80. letech 20. století. Analýzou bylo zjištěno, že zvýšení koncentrace jemných částic ve 2 dnech o $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zvýšilo denní úmrtnost o 1,5 %. Naopak vliv hrubých částic na denní úmrtnost byl mnohem slabší a statisticky méně signifikantní. Celkově se závislost jemné a hrubé frakce na úmrtnosti lišila v každém městě. Podle WHO (2003) jsou jemné částice prokazatelně rizikovější pro zdraví než hrubé, ale ani u hrubých částic nelze zcela vyloučit negativní následky [38].

Počet úmrtí v důsledku znečištění se výrazně odlišuje podle regionu. Nejhuře jsou postiženy chudé země, až 92 % všech úmrtí je v zemích s nízkým a středním HDP. V těchto zemích jsou nejvíce zasaženy nejnižší ekonomické a sociální vrstvy obyvatelstva [40]. Nejvíce zasaženou oblastí znečištěním ovzduší na celém světě je východní Asie. Východní Asie je velmi hustě zalidněná a znečištění způsobuje nadprůměrně vysokou úmrtnost na počet obyvatel. Z toho vyplývá, že celkový počet předčasných úmrtí v této oblasti je vyšší než kdekoli jinde na světě. Dlouhodobě je nejhorší situace v Číně, kde se znečištění ovzduší řadí mezi hlavní příčiny úmrtí. Odhaduje se, že v roce 2010 zemřelo v Číně předčasně 1,36 milionu lidí následkem znečištění ovzduší. Druhá nejhorší situace byla v jihovýchodní Asii (především v Indii) s 0,65 miliony předčasnými úmrtími za rok. K příčinám předčasné úmrtnosti patřila především cerebrovaskulární nemoc – CEV (1,31 milionu) a ischemická choroba srdeční – IHD (1,08 milionu). Mezi další méně čtené příčiny se řadila chronická obstrukční plicní nemoc (COPD), akutní infekce dolních cest dýchacích (ALRI) a leptomeningeální rakovina (LC) [41].

Celosvětově znečištění ovzduší způsobuje miliony předčasných úmrtí. Znečištění ovzduší je nejčastější příčinou předčasného úmrtí způsobenou okolním životním prostředím. Počet lidí umírajících následkem znečištění ovzduší navíc každým rokem výrazně vzrůstá. V roce 2015 celkově předčasně zemřelo cca 9 milionů lidí v důsledku znečištění ovzduší [40]. V roce 2010 to bylo cca 3,3 milionu lidí [41]. I to je samozřejmě vysoký počet úmrtí, při velikosti populace 6,8 miliardy se jednalo o 5 lidí na 10 000. Navíc se předpokládá v budoucnu další prudký nárůst, neboť znečištění ovzduší se bude v budoucnosti nadále zhoršovat.

Pro kvantifikaci předčasných úmrtí v následku znečištění ovzduší v budoucnosti byl vyvinut model pro rok 2050. Nárůst úmrtí je předvídan především v důsledku rychlého růstu počtu obyvatel. Předpokládá se že, v roce 2050 bude žít v městech 5,2 miliardy lidí. Při takto vysokém počtu lidí je modelováno 4,3 milionu předčasných úmrtí lidí ve městech za rok. Pro porovnání v roce 2010 se jednalo pouze o 2 miliony předčasných úmrtí, jedná se tedy o více než 100% navýšení za 40 let. Vzroste úmrtnost ve městech v porovnání s venkovem, očekává se, že ve

městech bude o 90 % vyšší úmrtnost na počet obyvatel než na venkově. Počet předčasných úmrtí se zvýší ve všech částech světa, ale rozdělení nebude rovnoměrné. Nejvyšší nárůst bude v regionech nejvíce zasažených v současnosti (východní a jihovýchodní Asie). V Evropě a v Americe nedojde k tak výraznému nárůstu. Na celém světě v roce 2050 model předpokládá 6,6 milionu předčasných úmrtí, navýšení za 40 let o 100 %. [41].

2.9.2 Kardiovaskulární onemocnění

Vliv jemných částic na výskyt kardiovaskulárního onemocnění a úmrtnost je významný. Kardiovaskulární onemocnění je nejčastější příčinou předčasné úmrtnosti z důvodu působení jemných částic. Analýzou studií bylo stanoveno, že zvýšení koncentrace jemných částic o $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zvýší riziko úmrtí v důsledku kardiovaskulárních onemocnění o 11 %, u všech ostatních příčin to bylo pouze 6 %. U respiračních onemocnění bylo zvýšení mnohem nižší než u kardiovaskulárních (pouze 3 %) [42].

Podle studie z amerických měst se kardiovaskulární onemocnění podílelo celkově na cca 45 % předčasných úmrtí vlivem jemných částic. Téměř čtvrtinu z celkového počtu tvořila ischemická choroba srdeční. Dále došlo ke zvýšenému výskytu srdeční arytmie, srdeční zástavě a srdečnímu selhání [43].

Mnoho lidí si neuvědomuje riziko spočívající v dlouhodobé expozici částicím. Jejich vliv na kardiovaskulárního onemocnění je ale významný. Zvýšený výskyt kardiovaskulárních onemocnění u lidí se špatnou životosprávou (obézní lidé, kuřáci) má jasnou příčinu, znečištění ovzduší může být vysvětlením vzniku kardiovaskulárních onemocnění i u lidí se zdravým životním stylem.

2.9.3 Respirační onemocnění

Částice v ovzduší prokazatelně způsobují více i méně vážné respirační choroby. Respirační problémy mohou být vyvolány oxidačním stresem. V ovzduší se vyskytuje velké množství volných radikálů, které mohou způsobit oxidační stres v plicích. Oxidační stres vyvolává nežádoucí chorobné účinky u ohrožených lidí. Mezi ně patří především vznik zánětlivých buněk v plicích. Zánětlivé buňky šíří volné radikály a oxidační stres se zvyšuje. Volné radikály útočí na tkáň a zabíjejí buňky. U částic je rizikem především její organická část. Bylo zjištěno, že oxidační stres mohou nepřímo vyvolat polycyklické aromatické uhlovodíky [44].

Jemné částice jsou zodpovědné za celou řadu respiračních onemocnění. Respirační příznaky mají u některých lidí velmi lehký průběh. Popisem jednotlivých příznaků se věnovalo spoustu studií. Čínská studie se zabývala vlivem dlouhodobě zvýšené koncentrace částic v ovzduší na zdraví dětí. Ve znečištěných oblastech se častěji vyskytoval kašel, sípání, hleny a astma. Výsledky této studie se mírně lišily pro chlapce a pro dívky. U dívek se častěji vyskytoval noční kašel a hleny, u chlapců bylo mírně častější sípání a astma. Na všech těchto onemocněních byl vliv částic výrazný [45]. Mezi další časté příznaky se řadí horečka, bolest v krku, rýma a dušnost. Některé vážnější případy respiračních onemocnění vyžadují hospitalizaci, např. bronchitida [46].

K výrazně nebezpečnějším možným následkům dlouhodobého vdechování nebezpečných částic patří rakovina plic. Analýza 18 studií z roku 2014 propojila získané informace o vlivu

částic na rakovinu plic. K analýze byly podrobeny jemné a hrubé částice. Předpokladem bylo, že jemné částice jsou nepříznivější pro zdraví, neboť pronikají hlouběji do plic. Analyzovalo se zvýšení rizika úmrtnosti se zvýšením koncentrace částic o $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Studie potvrdila zvýšené riziko vzniku rakoviny plic u jemných částic, u hrubých částic bylo riziko významně menší. [47].

2.9.4 Neurologická onemocnění

Vliv jemných částic na kardiovaskulární a respirační onemocnění je známý, v současné době se zkoumá možný vliv na neurologická onemocnění. Nejnovější studie potvrdili silnou závislost mezi expozicí jemným částicím a vznikem některých neurologických onemocnění. Největší riziko vzniku bylo přiřazeno Alzheimerově chorobě. Dále byla prokázána souvislost s vývojem demence a Parkinsonovy choroby. Vliv expozice jemným částicím na mrtvici dříve nebyl jednoznačně stanoven, nové studie se přiklánějí k názoru, že jemné částice způsobují mrtvici. Délka expozice ovlivňuje četnost výskytu a také úmrtnost na mrtvici, byl pozorován výskyt ischemické a hemoragické mrtvice. Výskyt neurologických nemocí je znepokojivý a jednotlivé státy by měli přijmout opatření ochraňující ohrožené skupiny obyvatelstva (seniory a děti). [48].

2.10 Vliv částic na životní prostředí

Znečištění ovzduší v podobě částic výrazným způsobem přispívá ke změnám klimatu. Částice obsahují složky (černý uhlík), které pohlcují dopadající světelné záření. V důsledku absorpce záření dochází k ohřívání zemského povrchu, následkem jsou nepříznivé podmínky pro život organismů na zemi. Jemné částice mohou disperzí v atmosféře způsobovat mlhu a snižovat viditelnost. Částice se také mohou podílet na kyselém dešti. Kyselá dešť, skládající se z kyseliny sírové a dusičné po dopadu na zem okyselují půdu, vodu a ničí vegetaci a úrodu na polích. Toxické polutanty ve vodě, vzduchu a půdě mohou způsobovat lesní požáry [49].

Znečištění ovzduší výrazným způsobem ovlivňuje klima a negativní účinky má také na životní prostředí. Částice jakožto forma znečištění ovzduší se výrazně podílí na devastaci životního prostředí a tím přímo ovlivňují životy všech organismů na této planetě.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité nástroje:

Při měření částic byl použit přístroj Optical Partical Seizer 3330 a čerpadla Airchek. OPS 3330 a Airchek zastávali při měření každý jinou funkci. OPS 3330 byl využit k zaznamenání koncentrace částic v reálném čase, dále umožnil rozdělení částic do jednotlivých frakcí podle velikosti. Čerpadla Airchek měla jinou funkci, sloužila pouze ke sběru požadovaných částic na kazetu s polykarbonátovým filtrem o průměru 37 mm a porozitě 0,4 μm . Částice zachycené na filtru byly následně podrobeny prvkové analýze.

3.1.1 OPS 3330

OPS je zkratka anglického výrazu Optical Particle Seizer (v překladu optický čítač částic). OPS 3330 je nástroj fungující na principu optické spektrometrie. Částice vstupují do optické komory, kde dochází ke kontaktu s laserovým paprskem a vzniku světelného pulzu. Na základě intenzity záblesku je stanoven počet a velikost částic. Tento přístroj je na základě výběru laseru a detektoru schopen měřit částice v rozmezí velikosti 0,3-10 μm . Výhodnou funkcí, kterou tento přístroj umožňuje je rozdělení částic podle velikosti až do 16 nastavitelných kanálů. Rozsah detekce částic je od 0-3 000 částic na cm^3 . OPS 3330 umožňuje měření koncentrace v reálném čase i sběr částic k analýze. Částice mohou být sbírány na vnitřně vybudovaný filtr. V průběhu měření je zaznamenávána okolní teplota i tlak. Baterie má vydrž při výkonu až 20 hodin, před měřením je vždy nutné zkontrolovat její stav. Mezi výrazné výhody OPS 3330 patří snadná přenosnost a jednoduchá ovladatelnost díky své dotykové obrazovce. Díky tichému provozu je přístroj vhodný pro použití venku i ve vnitřních prostorech [50].

3.1.2 Airchek

Airchek je čerpadlo vzduchu, které se lehce ovládá dotykem. Čerpadlo umožňuje nastavení velkého rozsahu průtoku, konkrétně od 0,005–5 l/min. Při měření je Airchek velmi tichý a má silnou baterii s dlouhou výdrží. Jeho nevýhodou je, že neumožňuje měřit koncentraci v reálném čase. K čerpadlu se připojuje kazeta, ve které je umístěn kruhový filtr umístěný na podložce. Odebrané částice putují na kazetu s filtrem a zachytávají se na něm. Charakter zachytávaných částic lze ovlivnit výběrem materiálu filtru. Velikost zachytávaných částic lze ovlivnit na základě zvolené hrubosti filtru. Po odběru reprezentativního vzorku jsou poté zachycené částice podrobeny analytickým metodám. [51].

3.2 Popis měření ovzduší

Všechna měření probíhala v blízkosti nejmenovaného průmyslového podniku. Továrna se nachází ve městě poblíž významné komunikace a obytných domů. Stanovení částic je důležité k určení bezpečnosti práce v továrně a k vlivu na obyvatele, kteří bydlí poblíž. Společnost, která zde sídlí se zabývá výrobou odlitků z hliníkových slitin typu Al-Si, maximálně takto ročně vyrobí 900 tun odlitků. Sléváním se zde vyrábí také kokily a jádra. Odběrateli těchto výrobků jsou elektrotechnický, textilní, stavební a strojírenský průmysl. V procesu výroby je obrobna a technická příprava, v jejímž důsledku vzniká vysoká koncentrace nebezpečných částic. Mezi mechanické procesy v podniku patří frézování, soustružení, broušení, vrtání, omílání, lakování, vyvažování a výroba mechanických součástek ze všech druhů materiálů.

Měření probíhala venku v místech nejvyššího očekávaného množství částic. Všechna měření proběhla na podzim (v listopadu) v chladnějších podmínkách, kdy se mimo jiné z důvodu teplotní inverze předpokládá horší znečištění vzduchu než v teplejším období. Cílem měření bylo stanovení koncentrace částic a rozdělení podle velikosti. Přiřadit zvýšenou koncentraci částic ke konkrétnímu mechanickému procesu v továrně nebylo možné, neboť při měření venku se lze pouze domnívat jaká činnost byla právě prováděna. Druh vykonávané činnosti výrazně ovlivňuje výskyt částic v ovzduší.

V továrně byla pracovní doba každý všední den od 6 do 14 h, obvykle byla prodloužena i krátce po 14. hodině. Pro zachycení nejvyšší koncentrace částic bylo nutné měřit v pracovní době, měření probíhala v různých hodinách, aby byl pokryt, co nejširší časový interval. Kromě právě vykonávané mechanické činnosti ovlivňovalo koncentraci částic počasí. Na koncentraci částic v ovzduší mají kromě teploty významný vliv rozptylové podmínky (rychlost větru, tepelné vrstvy v atmosféře) a tlak.

OPS 3330 byl nastaven na průtok 1 l/min, u tohoto přístroje bylo využito všech 16 nastavitelných kanálků v rozmezí od 0,3–10 μm. Dále byla u OPS 3330 nastavena doba intervalu vzorkování, která byla 1 minuta. U OPS 3330 bylo měření rozděleno na 2 části po jedné hodině. To znamená že v jednom měření bylo získáno 60 hodnot koncentrací částic. Čerpadlo Airchek bylo nastaveno na průtok 1,5 l/min. Každé měření trvalo 2 hodiny, Airchek pracoval nepřetržitě po dobu 2 hodin. Během jednoho měření se za 2 hodiny se při průtoku 1,5 l/min přečerpalo 180 litrů vzduchu. Ve všech měřeních byl využit 1 přístroj OPS 3330 a 2 čerpadla Airchek.

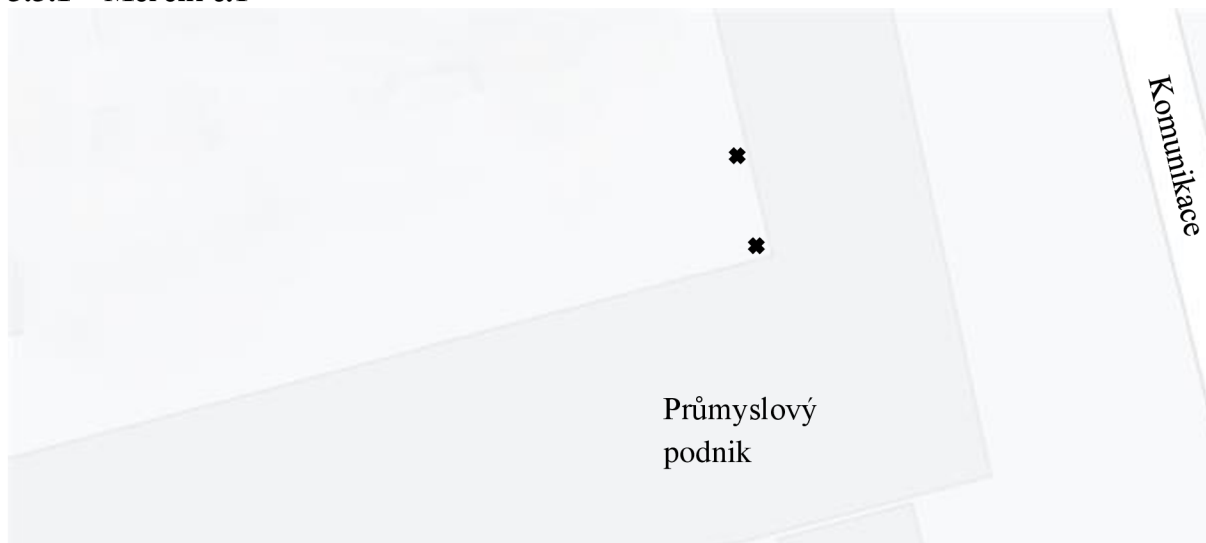
3.3 Zpracování výsledků

Jak už bylo zmíněno data o koncentraci a velikosti částic byla získána z OPS 3330. Z přístroje byly získány hodnoty naměřeného počtu částic rozdělené do zvolených velikostních intervalů. Data byla vyexportována, finální úprava a vytvoření grafické závislosti bylo provedeno v MS Excel. Data byly zaznamenána po minutě, v grafickém vyhodnocení byl zvolen časový interval po 5 minutách. Všechny částice stanovené přístrojem tvořily frakci PM₁₀. Frakce PM₅ byla pro grafické znázornění zvolena do velikosti 5,182 μm, pro PM_{2,5} byly využity velikosti částic do 2,685 μm. PM₁ byla zpracována do velikosti 1,117 μm. Hmotnostní koncentrace částic bylo nutné vypočítat. Výpočet byl zjednodušen předpokládaným kulovým tvarem částic a uvažována byla stejná hustota všech částic. Pro získání hmotnostní koncentrace částic byl použit tento vztah [53]:

$$C = \frac{N_i \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D_i^3 \cdot \rho}{Q \cdot (t_s - DTC \cdot t_d)} \quad (1)$$

kde N_i je počet impulzů ve velikostní třídě v jednom intervalu [-], D_i je velikostní frakce částic [m], ρ označuje hustotu částic (uvažována hodnota 7 850 kg/m³), Q je vstupní objemový průtok měřeného aerosolu (16,67·10⁻⁵ m³·s⁻¹), t_s označuje délku jednoho intervalu [s⁻¹], DTC faktor korekce mrtvého času, t_d je mrtvý čas [s⁻¹]

3.3.1 Měření č.1



Obrázek 8: Umístění přístrojů Airchek při měření 9. 11. 2022

Úvodní měření proběhlo 9. 11. 2022 od 12:02 do 14:02 h. Podmínky byly následující: teplota vzduchu 9 °C, tlak 1018 hPa a rychlost větru 4 m/s. V tomto úvodním měření byly sbírány částice na filtr, nebyla měřena koncentrace částic v reálném čase. Jak už bylo zmíněno ke sběru částic na filtr byly využity 2 přístroje Airchek. Umístění přístrojů je znázorněno na obrázku 8, přístroj umístěný v rohu byl poblíž ventilace, druhý byl umístěn v blízkosti otevřených oken.

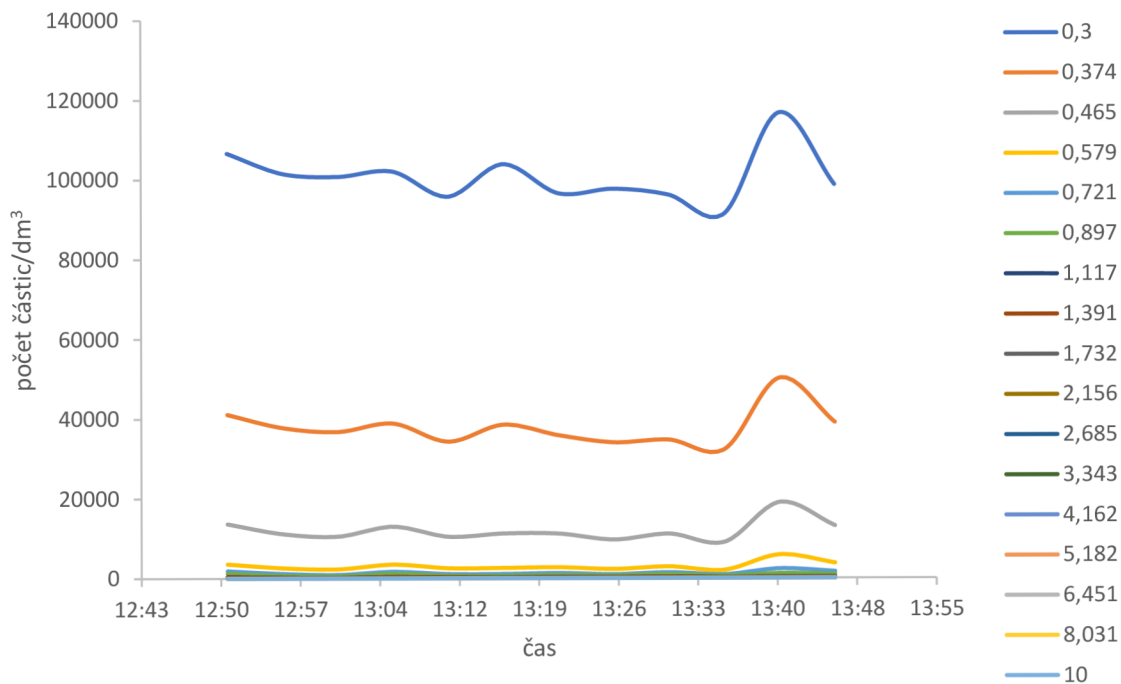
3.3.2 Měření č.2



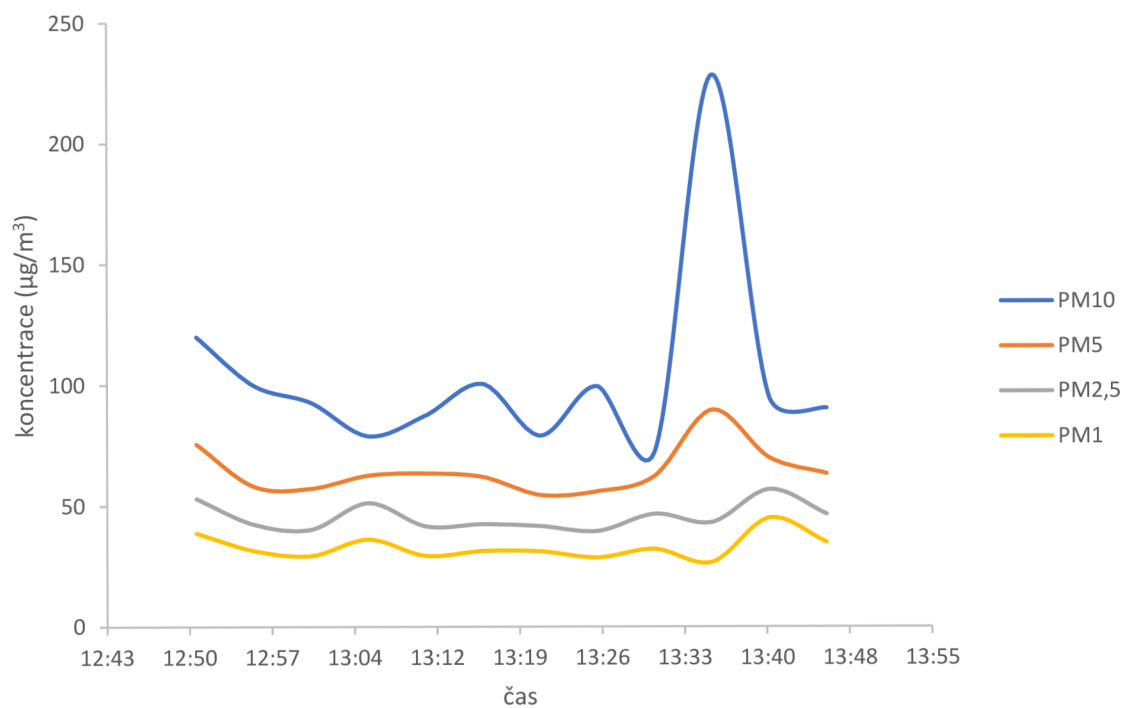
Obrázek 9: Umístění přístrojů Airchek a OPS 3330 při měření 14. 11. 2022

Druhé měření proběhlo 14. 11. 2022 v časovém rozmezí od 12:47 do 14:47. Měřilo se za podmínek teploty vzduchu 9 °C, tlaku 1023 hPa a rychlosti větru 5 m/s. V tomto měření už se stanovovala aktuální koncentrace částic pomocí přístroje OPS 3330. Umístění přístrojů je znázorněno na obrázku 9. Přístroj OPS 3330 byl umístěn první hodinu poblíž budovy, druhou hodinu cca 12 metrů od budovy. Po většinu první hodiny měření se koncentrace PM₁₀ pohybovala okolo 100 µg/m³ (viz obrázek 11), celkový počet částic byl zpočátku blízký

hodnotě 170 000/dm³ (viz obrázek 10). Ve 13:41 došlo ke zvýšení koncentrace částic na 196 000/dm³, proto vzrostla hmotnostní koncentrace PM₁₀ na 228 µg/m³. U PM_{2,5} byla koncentrace velmi stabilní (cca 50 µg/m³), k žádnému významnému nárůstu v první hodinu měření nedošlo.

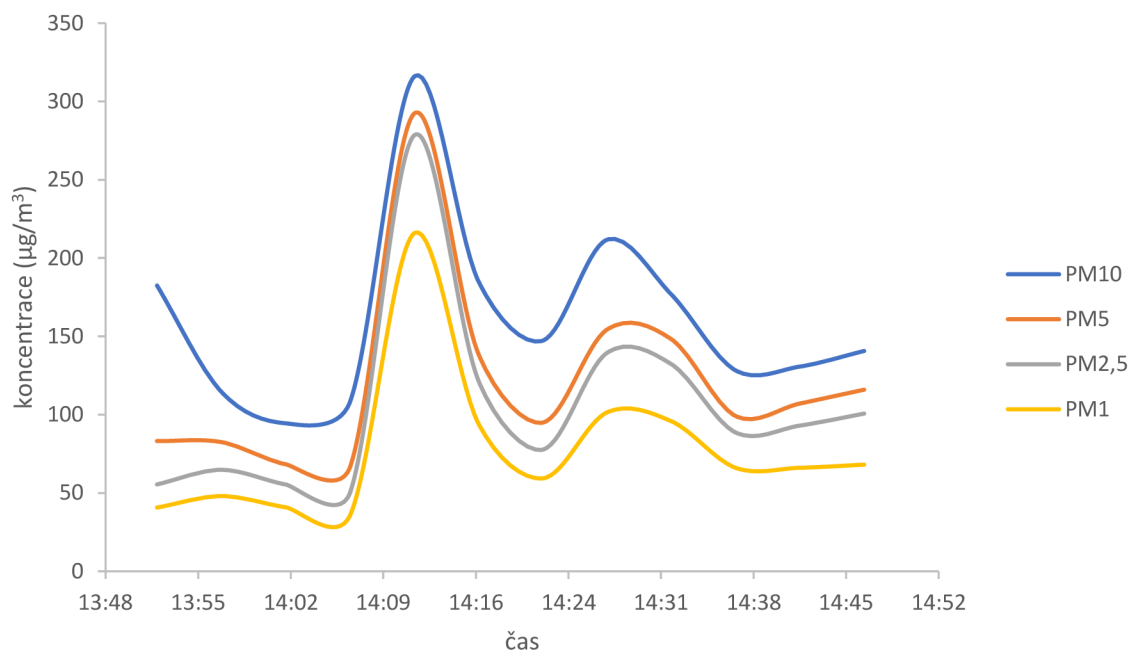


Obrázek 10: Příklad rozdělení částic podle velikosti z OPS (µm) 14. 11. 2022



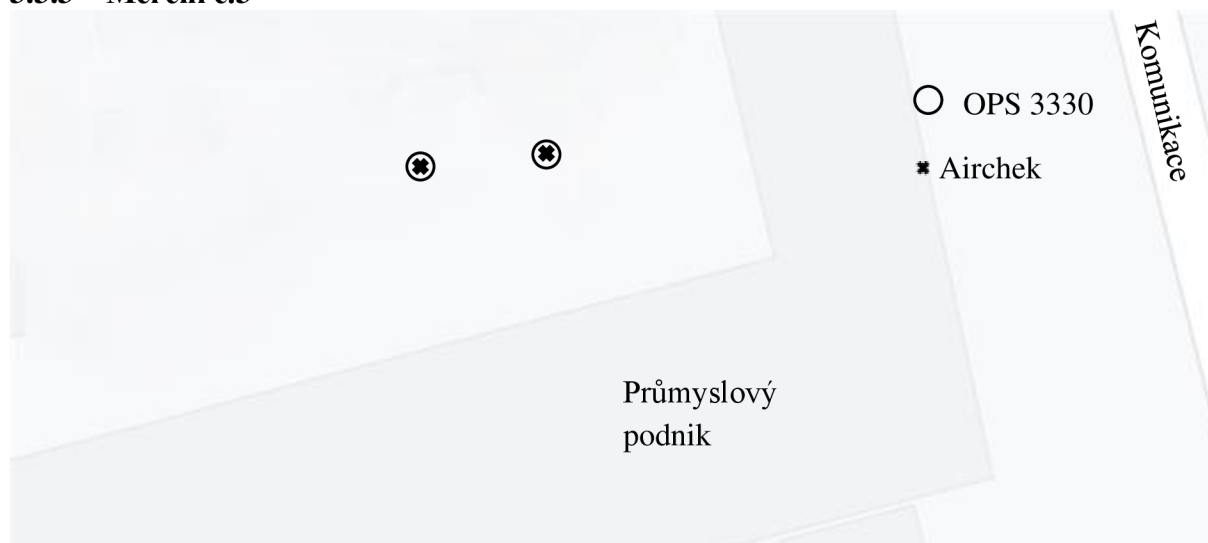
Obrázek 11: Hmotnostní koncentrace frakcí 14. 11. 2022

Ve druhé části došlo k výraznému nárůstu koncentrace PM_{10} i $PM_{2,5}$. Ve 14:12 byla zaznamenána největší koncentrace částic během tohoto dne ($586\ 000/dm^3$). Prudký nárůst počtu částic se na hmotnostní koncentraci projevil výrazně, konkrétně došlo ke zvýšení koncentrace u PM_{10} více než trojnásobně, z $94\ \mu g/m^3$ na $316\ \mu g/m^3$ (viz obrázek 12). U $PM_{2,5}$ byl nárůst ještě vyšší z $50\ \mu g/m^3$ na $278\ \mu g/m^3$. Nárůst koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ byl velmi krátkodobý a během 5 minut došlo k poklesu na původní koncentraci. K menšímu výkyvu došlo ve 14:27, kdy narostl počet částic na $322\ 000/dm^3$, čemuž se rovnala hmotnostní koncentrace PM_{10} $212\ \mu g/m^3$ a $PM_{2,5}$ $139\ \mu g/m^3$. Do ukončení měření ve 14:47 už koncentrace částic pouze klesala až na hodnotu cca $228\ 000/dm^3$.



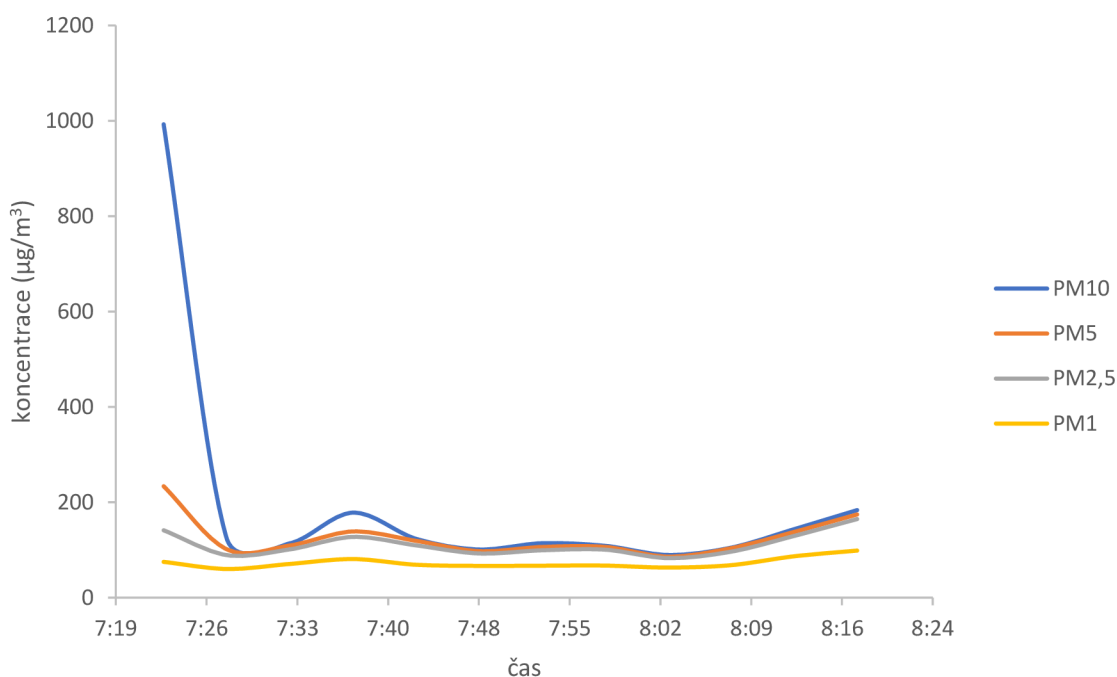
Obrázek 12: Hmotnostní koncentrace frakcí 14. 11. 2022

3.3.3 Měření č.3



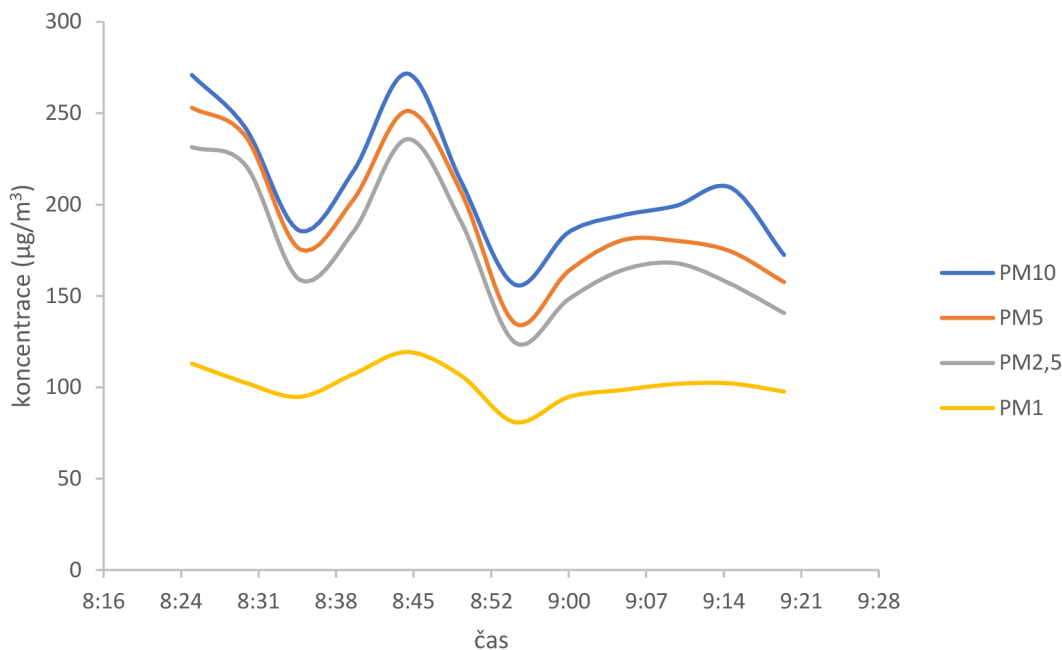
Obrázek 13: Umístění přístrojů Airchek a OPS 3330 při měření 15. 11. 2022

Třetí měření proběhlo 15. 11. 2022 od 7:19 do 9:20. Teplota vzduchu byla 5 °C, tlak 1018 hPa, rychlost větru 3 m/s. Znázorněné umístění přístrojů je na obrázku 13. V první hodině byl přístroj OPS 3330 umístěn cca 12 metrů od budovy, druhou hodinu měření byl umístěn cca 18 metrů od budovy. Přístroje Airchek byly umístěny na stejných místech jako OPS 3330. V úvodu byla naměřena výrazně zvýšená koncentrace PM₁₀, v 7:23 dosáhla 993 µg/m³ (viz obrázek 14). Na této vysoké hmotnostní koncentraci se výrazně podílely částice o větším průměru, celkový počet částic byl 259 000/dm³. Posléze se koncentrace PM₁₀ ustálila okolo hodnoty 110 µg/m³. V závěru první hodiny měření došlo k nárůstu koncentrace PM₁₀ na 184 µg/m³, v tomto čase přístroj naměřil 345 000 částic/dm³. Koncentrace PM_{2,5} byla od počátku stabilnější, pohybovala se s mírnými výkyvy na hodnotě 110 µg/m³. Při ukončení první části měření v 8:18 došlo k nárůstu koncentrace PM_{2,5} na 165 µg/m³.



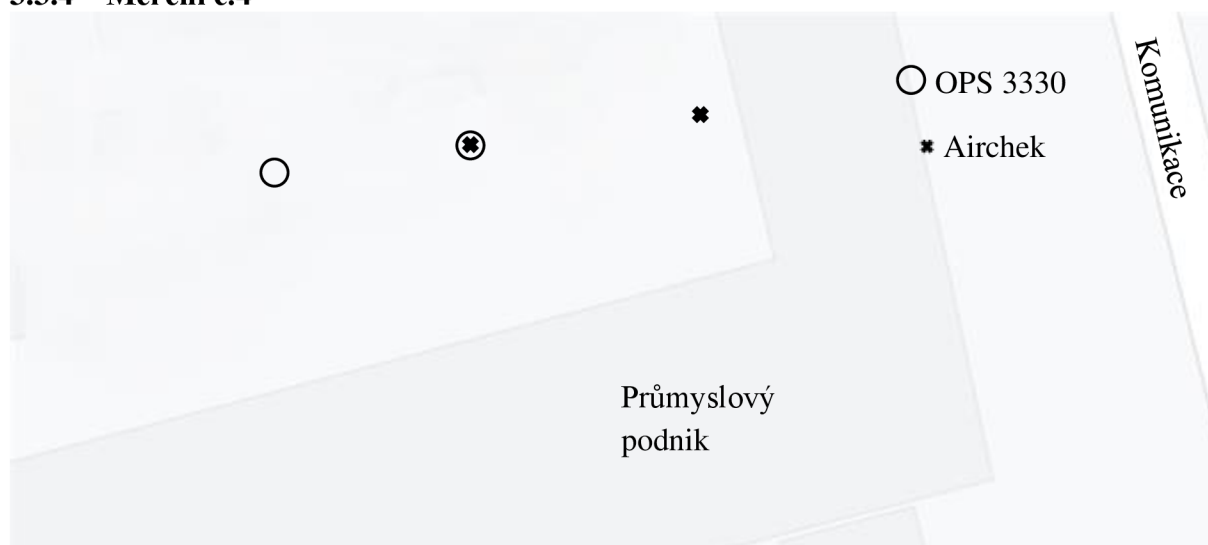
Obrázek 14: Hmotnostní koncentrace frakcí 15. 11. 2022

Při druhé hodině měření se koncentrace PM₁₀ a PM_{2,5} pohybovaly v rozmezí 125–272 µg/m³ (viz obrázek 15). Koncentrace PM₁₀ a PM_{2,5} nebyly výrazně odlišné, na koncentraci částic se podílely téměř výhradně částice do velikosti 2,5 µm. U počtu částic také nebyly zaznamenány výrazné výkyvy, výskyt byl 305 000–378 000/dm³. K maximu koncentrací v této části měření došlo v časech 8:25 a 8:45. Nejnižší hodnoty hmotnostní koncentrace byly naměřeny v 8:55 a posléze také v 9:20, kdy bylo měření ukončeno.



Obrázek 15: Hmotnostní koncentrace frakcí 15. 11. 2022

3.3.4 Měření č.4

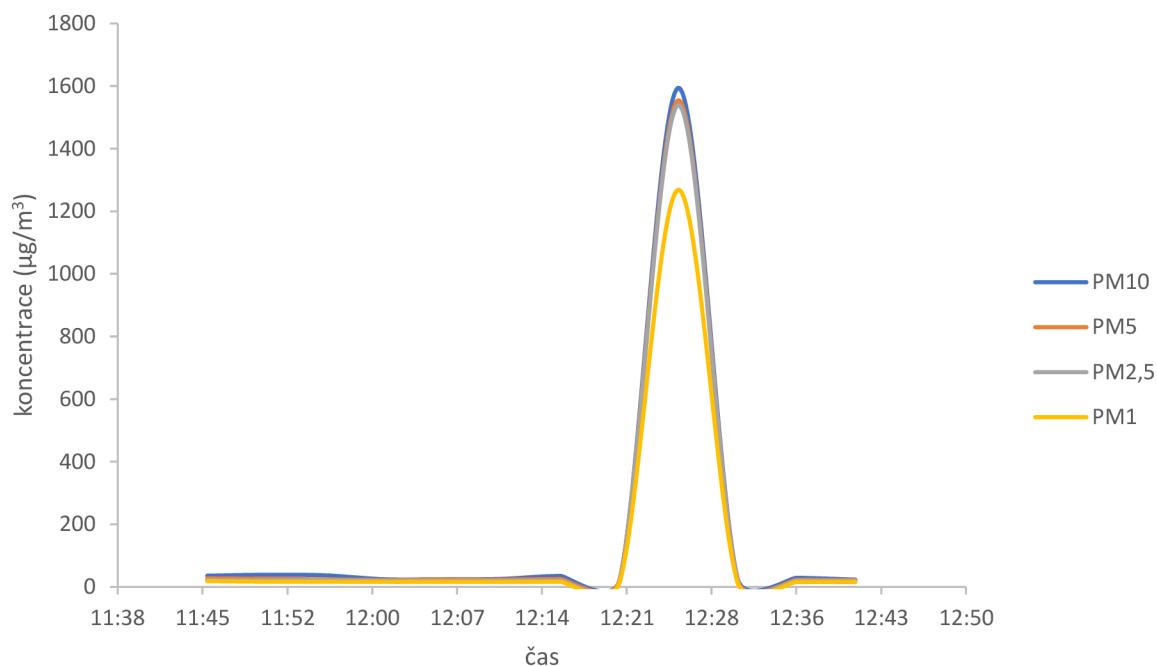


Obrázek 16: Umístění přístrojů Airchek a OPS 3330 v měření 24. 11. 2022

Čtvrté měření se konalo 24. 11. 2022 od 11:42 do 13:43, při teplotě 5 °C, tlaku 1012 hPa a rychlosti větru 4 m/s. Přístroj OPS 3330 byl první hodinu měření umístěn blíže u budovy, druhou hodinu byl ve větší vzdálenosti od budovy. Z důvodu zavření oken byla v tento den naměřena nižší koncentrace částic. V tomto měření byly použity 2 přístroje OPS 3330, jeden sloužil jako srovnávací. Pro přístroje byla vyhrazena stanoviště dle obrázku 16.

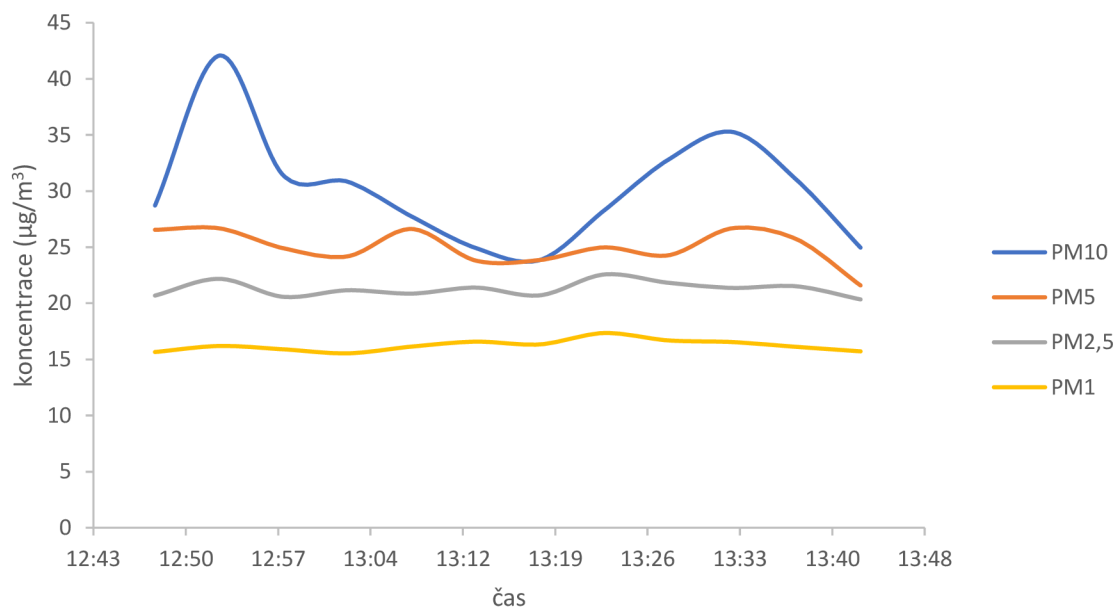
Po většinu první hodiny měření se koncentrace částic PM_{10} pohybovala okolo $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (viz obrázek 17), počet částic byl v této části měření pouze cca $85\,000/\text{dm}^3$. Ve 12:26 došlo ke skokovému nárůstu počtu částic na $852\,000/\text{dm}^3$, hmotnostní koncentrace PM_{10} vzrostla na

1 594 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ byla opět téměř totožná jako PM_{10} . Tento nárůst byl velmi krátkodobý, do 5 minut došlo k poklesu až na původní hodnotu.



Obrázek 17: Hmotnostní koncentrace frakcí 24. 11. 2022

Na stanovišti ve větší vzdálenosti od budovy byla koncentrace částic nízká po celou dobu měření, počet částic byl cca 82 000/dm³. Hmotnostní koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ byla konstantní na hodnotě 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (viz obrázek 18). Koncentrace PM_{10} mírně kolísala, maxima 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dosáhla ve 12:53. Po zbývajícím čase měření se koncentrace PM_{10} pohybovala okolo 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. PM_{10} dosáhla minima ve 13:18 při koncentraci 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Měření bylo ukončeno ve 13:43.



Obrázek 18: Hmotnostní koncentrace frakcí 24. 11. 2022

Naměřené hodnoty byly porovnány se srovnávacím přístrojem OPS 3330. Hodnoty na srovnávacím přístroji měli stejný průběh jako na používaném přístroji. Výrazný nárůst koncentrace částic zaznamenaly oba přístroje ve 12:26, stejně tak byl zaznamenán následný pokles a ustálení na nízké koncentraci.

3.4 Vzorky půdy a rostlinného materiálu

Kromě měření ovzduší na filtru bylo v okolí továrny odebráno na různých místech 6 vzorků půdy a 4 vzorky rostlinného materiálu. Místa odebrání vzorku půdy jsou znázorněna na obrázku 19.



Obrázek 19: Odebrané vzorky půdy na mapě

3.4.1 Stanovení sušiny

Po odebrání byly vzorky půdy nejprve částečně vysušeny na filtračním papíru při laboratorní teplotě. Následně bylo provedeno rozmělnění půdy přeseťm vzorku přes síto o hrubosti 0,507 mm. Jemné vzorky půdy byly vysypány do misky a zváženy na analytických vahách. Pro stanovení sušiny půdy bylo vybráno množství vzorku o hmotnosti vždy v rozmezí 3–5 gramů. Po zvážení byly vzorky přeneseny do sušárny, kde byly následně zcela zbaveny vody při teplotě 105 °C po dobu 4 hodin. Po vytáhnutí z pece byly vzorky jeden den uchovávány v exsíkátoru, aby nedošlo k pohlcení vzdušné vlhkosti. Úbytek hmotnosti vzorku půdy po vysušení byl uvažován jako množství celkové zadržované vody. Procentuální zastoupení sušiny ve vzorku je dáno podílem původní hmotnosti vzorku a hmotnosti výsledné sušiny. U všech stanovovaných vzorků půd byl vysoký podíl sušiny, ve všech případech se jednalo o hodnotu nad 90 %. Nejvyšší podíl sušiny u vzorku byl zaznamenán na hodnotě téměř 99 %.

Tabulka 1: Stanovení sušiny ve vzorcích půdy

Označené vzorky půdy	Sušina (%)
1	96,92
2	97,61
3	94,98
4	98,79
5	98,36
6	97,98

3.4.2 Mikrovlnný rozklad

Aby byla možnost provádět prvkovou analýzu, bylo nejdříve nutné převést jednotlivé vzorky půd, rostlinného materiálu a částic z filtru do roztoku. K rozložení vzorků byla využita metoda mikrovlnného rozkladu. Rozklad pomocí mikrovlnného záření je velmi rychlý a nevyžaduje použití většího množství činidel. Zahříváním v uzavřené nádobce je dosaženo teploty cca 200–260 °C. Při rozkladu vzniká rychlým zahříváním také vysoký tlak [52].

Při rozkladu vzorků půdy bylo do patrony na analytických vahách naváženo cca 0,25 g vzorku a přidalo se 3 ml HNO₃ a 9 ml HCl (lučavka královská). Na každý vzorek půdy byly použity dvě patrony, celkově tedy na cca 0,5 g půdy bylo využito 24 ml kyselin. Získaný roztok byl doplněn v 50 ml odměrné baňce po rýsku deionizovanou vodou. Následně bylo provedeno ředění, kdy se smíchalo 25 ml roztoku s 25 ml deionizované vody. Posléze byl proveden rozklad vzorku částic z filtru a vzorku rostlinného materiálu. Rozklad opět probíhal v jednotlivých patronách. Na každou patronu připadal jeden filtr. Rostlinného materiálu bylo pro rozklad naváženo cca 0,25 g na analytických vahách. Ke každému vzorku bylo přidáno 9 ml HNO₃ a 1 ml H₂O₂. Tyto roztoky poté byly doplněny v odměrné baňce do 50 ml deionizovanou vodou a stejně jako v případě vzorků půdy byly uchovány v plastových lahvičkách. Po provedení mikrovlnného rozkladu až do samotného měření byly všechny získané vzorky uchovávány v lednici. Celkem bylo získáno 6 půdních vzorků, 4 vzorky rostlinného materiálu a 4 vzorky částic z ovzduší (1 vzorek na 1 den měření).

3.5 Analýza kovů

3.5.1 Stanovení na FAAS

Pro stanovení koncentrace vybraných kovů ve vzorcích byla využita plamenová atomová absorpční spektrometrie (FAAS). V této metodě jsou analyzovány kapalné vzorky, které jsou odsávány do přístroje. V přístroji je kapalný roztok nejprve zmlžen na aerosol a vstříkován do plamene, kde dochází k atomizaci analytu. Plamenem následně prochází světelný paprsek, jehož zdrojem je dutá katodová výbojka. Světelné záření procházející vzorkem, způsobuje excitaci atomů, a přitom dochází k částečnému pohlcení záření. Ztlumený světelný signál dopadá na fotonásobič a je přeměněn na elektrický signál. Pomocí získaného signálu je poté vyhodnocena koncentrace prvku v analyzovaném vzorku. FAAS měří signál v podobě absorbance, jejíž hodnota roste v závislosti na koncentraci analyzovaného prvku [54].

Před samotným měřením jednotlivých vzorků bylo nutné stanovit kalibrační křivku daného prvku. Pro vytvoření kalibrační řady byl využit kalibrační standard roztoku prvku. Pipetované množství standardního roztoku bylo doplněno na potřebný objem 2% kyselinou dusitou. Pro analýzu každého prvku byly v kalibrační křivce alespoň 3 body.

Před začátkem měření na FAAS bylo nutné zapnout počítač a v programu zkontrolovat jednotlivé parametry plamene. Jako palivo byla využívána kombinace acetylen–vzduch nebo acetylen–oxid dusný. Dalším důležitým nastavovaným parametrem byl průtok plynu a vlnová délka vysílaného záření, která byla odlišná pro jednotlivé prvky. Záření bylo vysíláno výbojkou, v tomto měření byla využita deuteriová a dutá katoda. Po ukončení analýzy bylo nutné uzavřít ventily pro přívod plynů a vzduchu a vypnout počítač.

Některé vzorky půdy bylo před stanovením koncentrace nutné naředit více, aby stanovená koncentrace nepřekročila maximální hodnotu kalibrační křivky. Roztoky vzorků ovzduší a rostlinného materiálu obsahovali nízkou koncentraci stanovovaných prvků a na rozdíl od vzorků půdy je nebylo nutné ředit. Po stanovení kalibrační křivky a koncentraci jednotlivých vzorků byl vypočítán limit detekce a limit stanovitelnosti. Kalibrační křivka byla zpracována do grafu, ve kterém byli znázorněni vypočítané horní a dolní limity detekce. Z kalibračních křivek byli získány rovnice regrese a korelační koeficienty (R^2).

Tabulka 2: Kalibrační závislosti prvků

prvek	kalibrační křivka	korelační koeficient	limit detekce (mg/l)	limit stanovitelnosti (mg/l)
chrom	$y = 0,0176 (\pm 0,0003) x + 0,0005 (\pm 0,0002)$	0,9987	0,0618	0,2059
mangan	$y = 0,164 (\pm 0,007) x + 0,03 (\pm 0,02)$	0,9948	0,0648	0,2160
měď	$y = 0,102 (\pm 0,002) x + 0,003 (\pm 0,001)$	0,9991	0,0181	0,0604
nikl	$y = 0,0893 (\pm 0,0007) x - 0,0005 (\pm 0,0003)$	0,9998	0,0732	0,2441
olovo	$y = 0,0450 (\pm 0,0005) x - 0,0005 (\pm 0,0004)$	0,9994	0,0253	0,0843
zinek	$y = 0,55 (\pm 0,08) x - 0,02 (\pm 0,04)$	0,9988	0,0312	0,1040
železo	$y = 0,077 (\pm 0,002) x + 0,012 (\pm 0,009)$	0,9972	0,7301	2,4336
kadmium	$y = 139 (\pm 3) \cdot 10^{-3} x + 0,014 (\pm 0,009)$	0,9989	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$4,44 \cdot 10^{-5}$

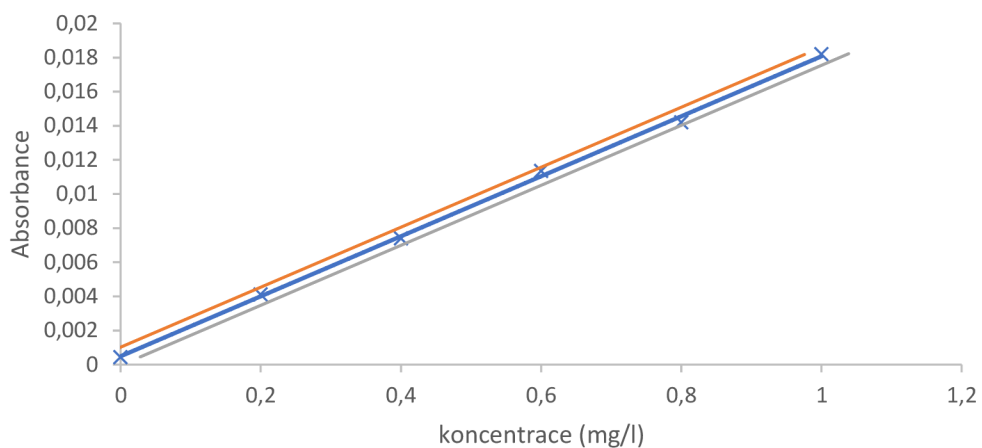
Pomocí kalibračních závislostí byly vypočítány limity detekce a stanovitelnosti. Pro limit detekce byl využit vztah:

$$LOD = \frac{3 \cdot s_D}{m} \quad (2)$$

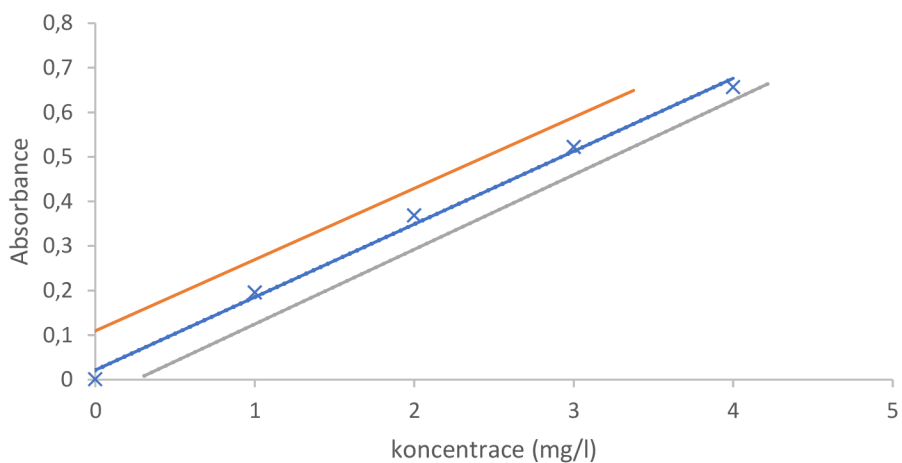
Limit stanovitelnosti byl vypočítán obdobně:

$$LOQ = \frac{10 \cdot s_D}{m} \quad (3)$$

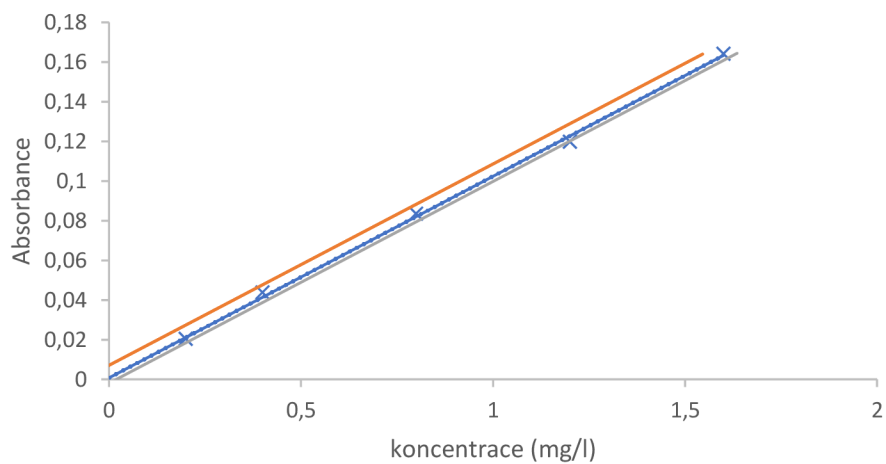
kde s_D je směrodatná odchylka blanku a m značí směrnici přímky.



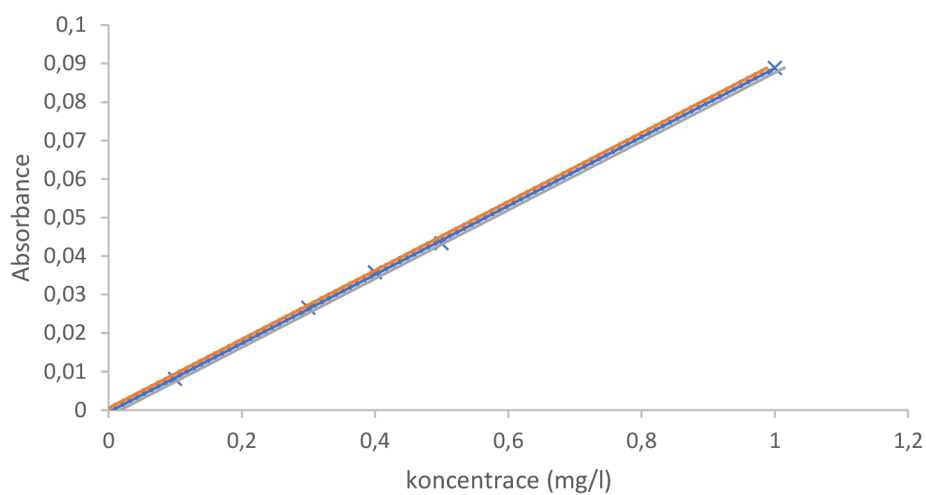
Obrázek 20: Kalibrační křivka chromu



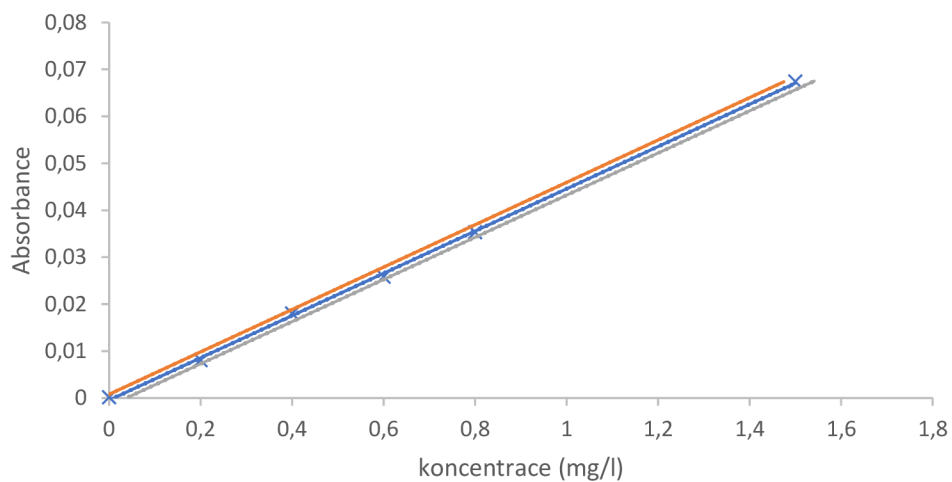
Obrázek 21: Kalibrační křivka manganu



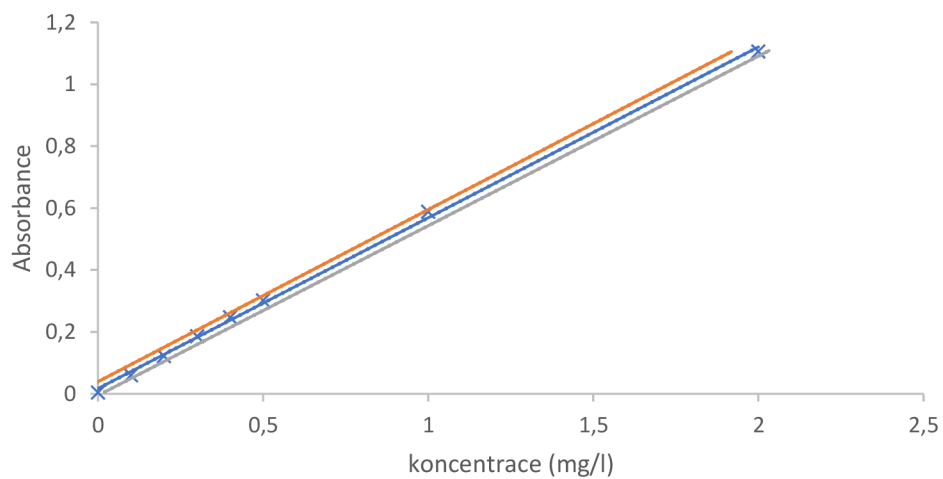
Obrázek 22: Kalibrační křivka mědi



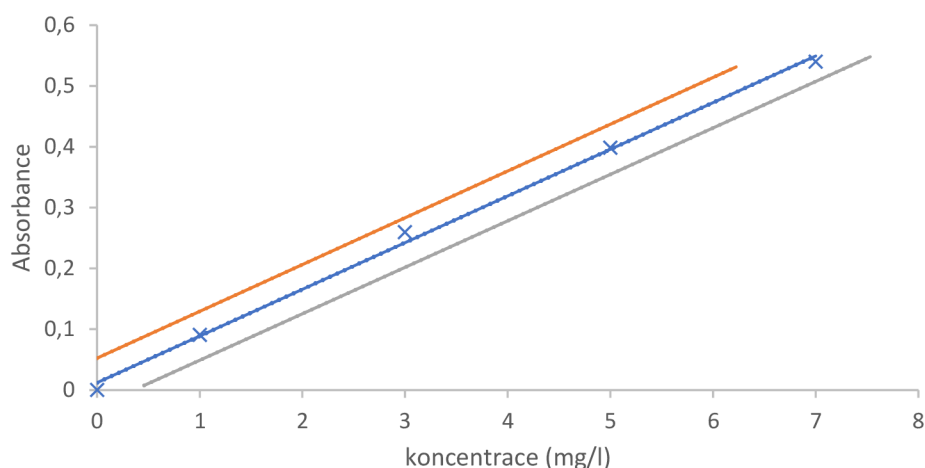
Obrázek 23: Kalibrační křivka niklu



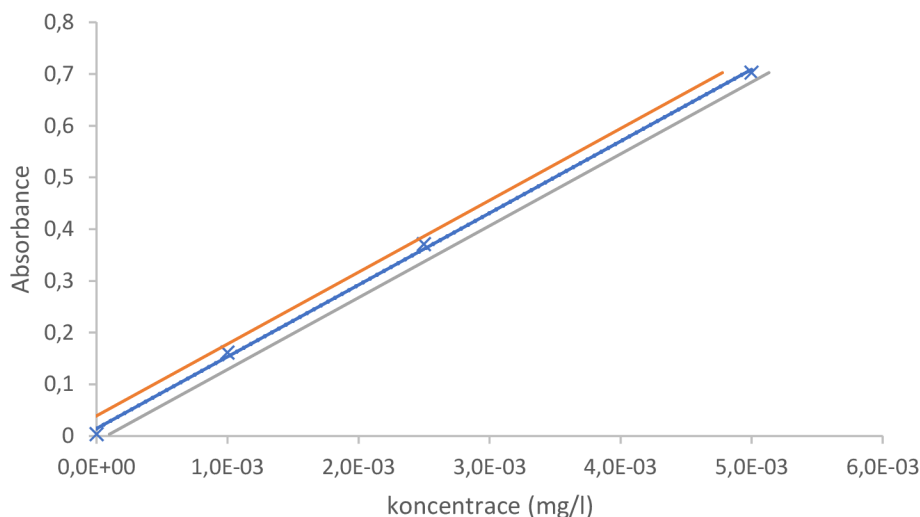
Obrázek 24: Kalibrační křivka olova



Obrázek 25: Kalibrační křivka zinku



Obrázek 26: Kalibrační křivka železa



Obrázek 27: Kalibrační křivka kadmia

3.5.2 AMA 254

AMA (Advanced mercury analyser) je atomový absorpční spektrofotometr, jež stanovuje pouze rtuť. Výhodou přístroje AMA je možnost přímého stanovení z pevného vzorku. Kromě měření vzorků půdy v pevném stavu, byly měřeny také vzorky rostlinného materiálu a zachycených částic z filtru v kapalné formě.

Pro správnou funkci přístroje AMA bylo nutné zajistit průtok kyslíku. Po spuštění počítače a programu bylo nutné nejdříve zajistit dostatečné zahřátí přístroje. Následně byl v programu nastaven čas rozkladu, v tomto případě se jednalo o 150 sekund pro každý vzorek. Před analýzou vzorků bylo nutné nejprve ověřit správnost měření přístroje pomocí kalibrovaného roztoku rtuti pro hlinitou půdu. Hmotnost vzorků pro analýzu byla vždy cca 50 mg a její přesná hodnota se zadávala do programu, aby došlo k automatickému vypočítání koncentrace (v mg/kg). Vzorky byly umístěny do kovové lodičky a následně vkládány do přístroje. V přístroji byly vzorky zapáleny v proudu kyslíku, následně došlo zachycení rtuti amalgamátorem a

měření absorpance rtuťových výparů. Každý vzorek bylo nutné stanovit třikrát pro kontrolu správnosti. Po každém pátém vzorku bylo nutné provést kontrolní měření pomocí vody (cleaning) [55].

Tabulka 3: Parametry měření na přístroji AMA

	Doba sušení (s)	Doba rozkladu (s)	Doba čekání (s)
Měření vzorku	60	150	45
Cleaning	60	60	45

Po ukončení měření byl naposledy proveden cleaning a nastaveno chlazení přístroje, které trvalo cca 30 minut. Následně byl vypnut program, počítač a zastaven přívod kyslíku.

4 VÝSLEDKY A DISKUSE:

4.1 Stanovení kovů

Získaná koncentrace prvku v roztoku (mg/l) a byla přepočítána na hmotnost pevného vzorku (mg/kg). U koncentrace rtuti nebylo třeba převodu, neboť byla stanovována přímo z pevného vzorku. Pro převedení z mg/l na mg/kg byl využit vztah:

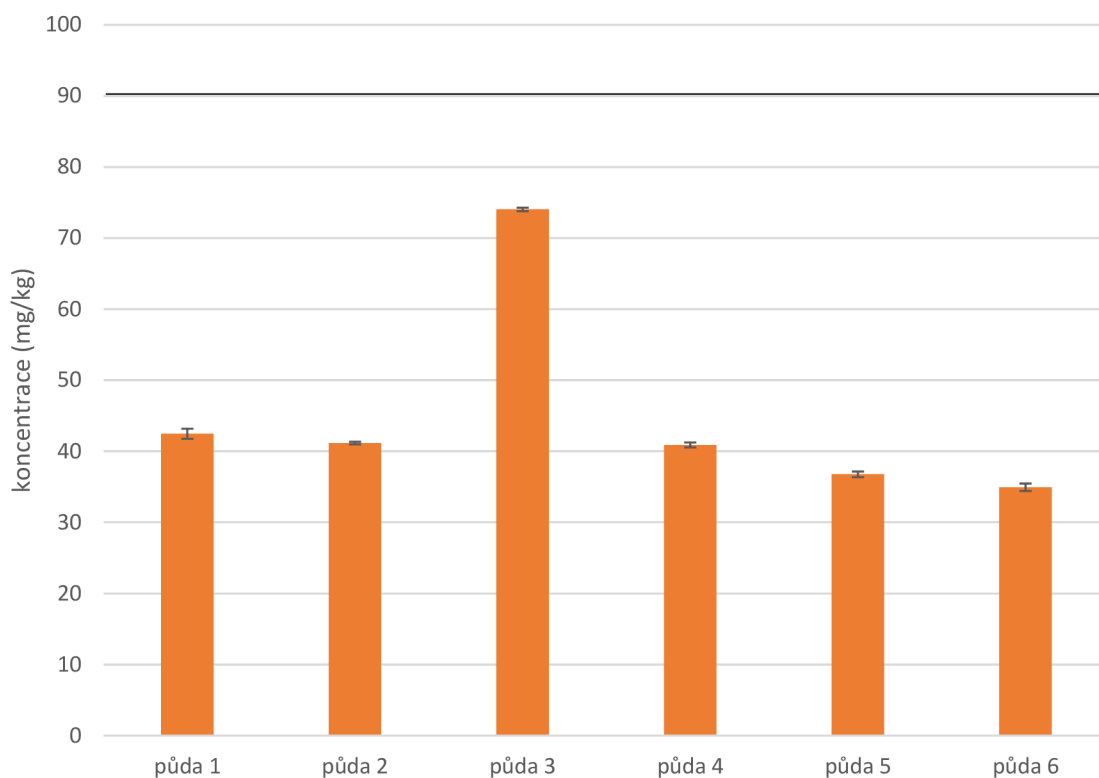
$$C_{\text{hmot.}} = \frac{f \cdot V \cdot c_{\text{obj.}}}{m} \quad (4)$$

kde f je faktor zředění, V je objem kapalného vzorku (l), $c_{\text{obj.}}$ označuje stanovenou koncentraci (mg/l) a m je hmotnost pevného vzorku před mikrovlákným rozkladem (kg).

Koncentrace těžkých kovů v půdě byla výrazně vyšší než ve vzorcích částic z ovzduší a rostlinného materiálu. Mnohem vyšší koncentrace těžkých kovů v půdě, než v ovzduší je způsobena rychlým usazováním částic z důvodu vysoké hustoty. Dalším důvodem nízké koncentrace analyzovaných prvků na filtru je odběr příliš malého vzorku. V rostlinném materiálu byla nalezena vyšší koncentrace analyzovaných prvků než v ovzduší, ale nižší než v půdě. Působení kontaminované půdy na rostlinu má za následek zvýšenou koncentraci některých prvků.

4.1.1 Chrom

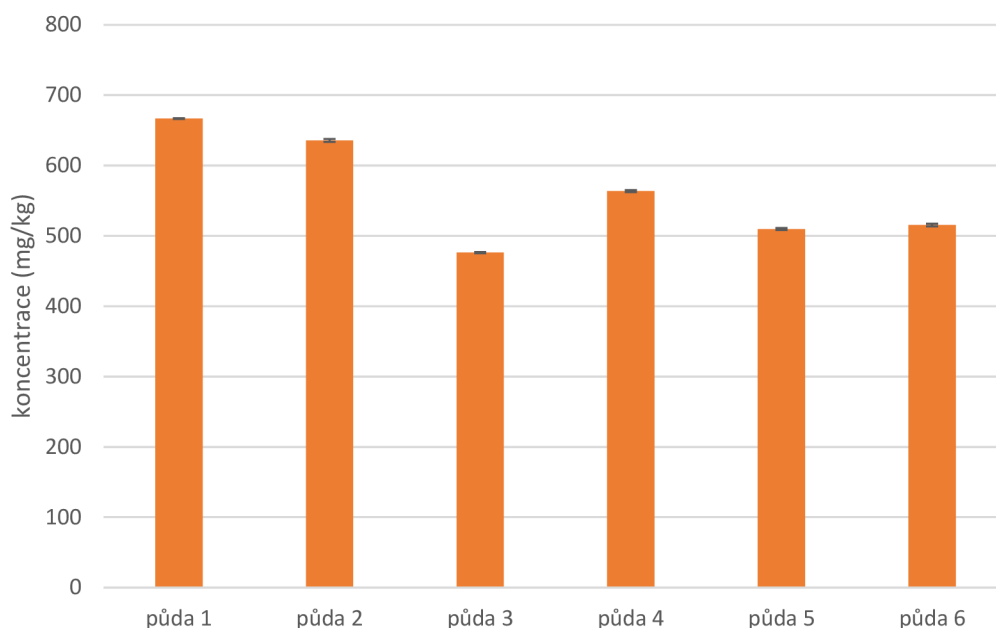
Nejvyšší koncentrace chromu byla nalezena v půdním vzorku č.3 (74,0 mg/kg). Preventivní koncentrace chromu 90 mg/kg v běžných půdách podle vyhlášky č. 153/2016 Sb. nebyla překonána. Důvodem zvýšené koncentrace ve vzorku č.3 je pravděpodobně umístění poblíž ventilace průmyslového podniku. U ostatních půdních vzorků byla koncentrace výrazně nižší pohybovala se v rozmezí 34,9–42,5 mg/kg. U vzorků částic z ovzduší a rostlinného materiálu byla stanovená koncentrace pod limitem detekce.



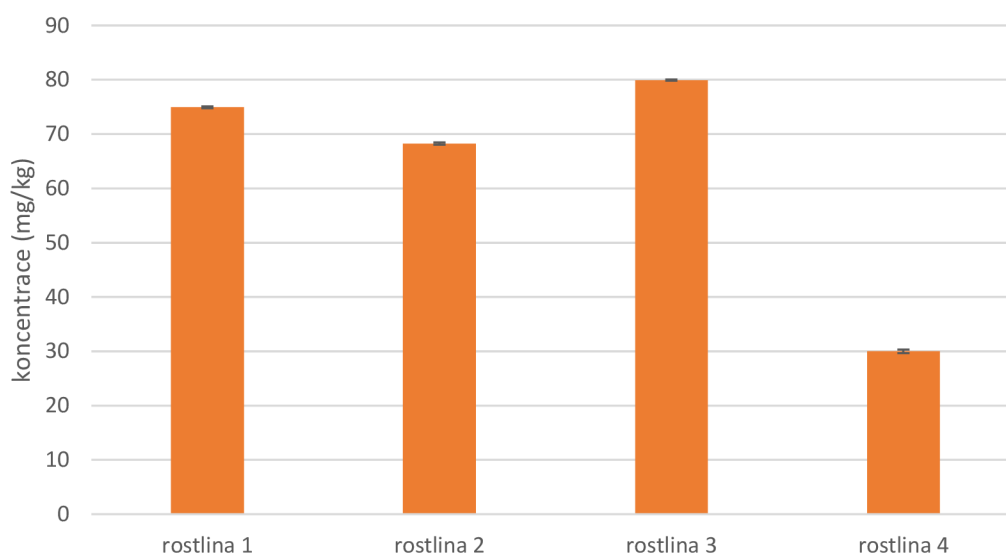
Obrázek 28: Koncentrace chromu ve vzorcích

4.1.2 Mangan

Výskyt manganu v půdě není rizikový, a proto nebyla stanovena vyhláškou č. 153/2016 Sb. preventivní hodnota. Koncentrace manganu v půdních vzorcích byla nejvyšší ve vzorku č.1 (666,7 mg/kg). Naopak nejnižší hodnota v půdě (476,2 mg/kg) byla stanovena ve vzorku č.3. V rostlinném materiálu byla nalezena nejvyšší koncentrace ve vzorku č.3 (79,9 mg/kg) a nejméně ve vzorku č.4 (30,0 mg/kg). Ve vzorcích částic z ovzduší byla koncentrace pod limitem detekce.



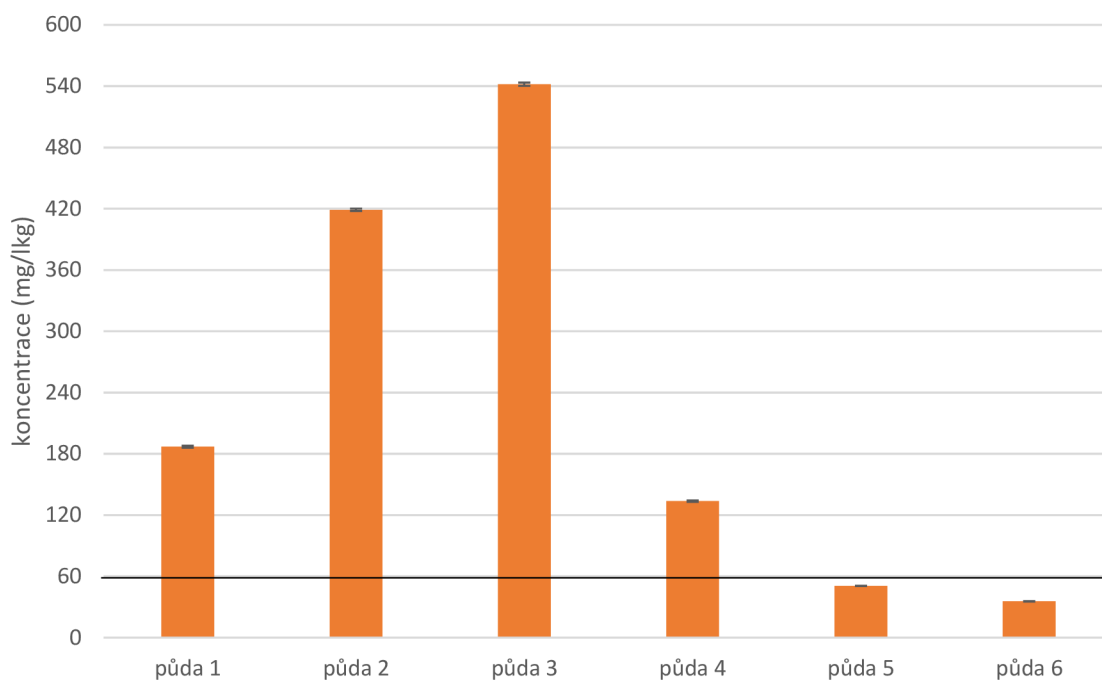
Obrázek 29: Koncentrace manganu ve vzorcích



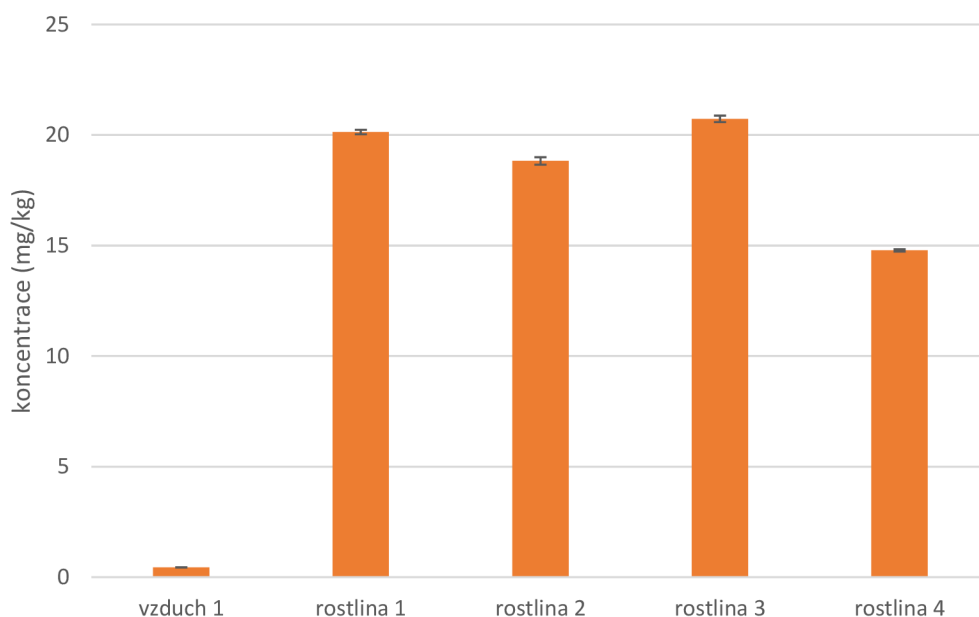
Obrázek 30: Koncentrace manganu ve vzorcích

4.1.3 Měď

Preventivní koncentrace mědi v běžných půdách podle vyhlášky č. 153/2016 Sb. je pouze 60 mg/kg. Tuto hodnotu významně převyšují 4 vzorky půdy. Vysoké koncentrace mědi jsou způsobeny výrobou měděných slitin v průmyslovém podniku. Největší zastoupení mědi bylo v půdním vzorku č.3, koncentrace měla hodnotu 541,8 mg/kg. Nejnižší koncentrace v půdě byla zaznamenána ve vzorku č.6 (35,5 mg/kg). Koncentrace mědi v rostlinném materiálu se pohybovala v rozmezí 14,8–20,7 mg/kg. Ve vzorcích ovzduší byla koncentrace pod limitem detekce s výjimkou vzorku č.1 (0,4 mg/kg).



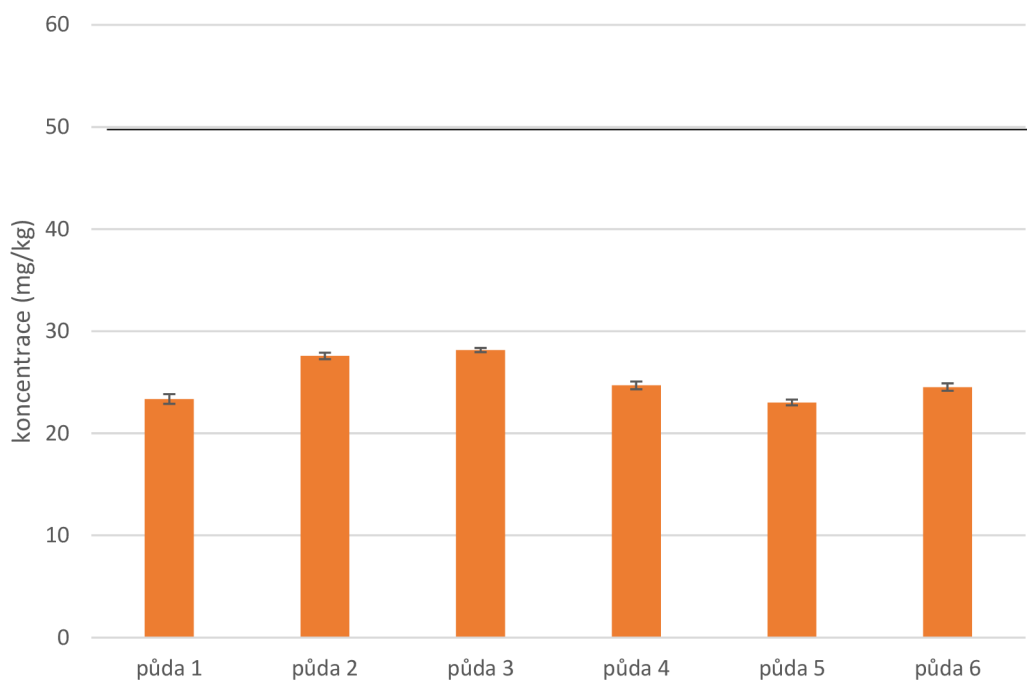
Obrázek 31: Koncentrace mědi ve vzorcích



Obrázek 32: Koncentrace mědi ve vzorcích

4.1.4 Nikl

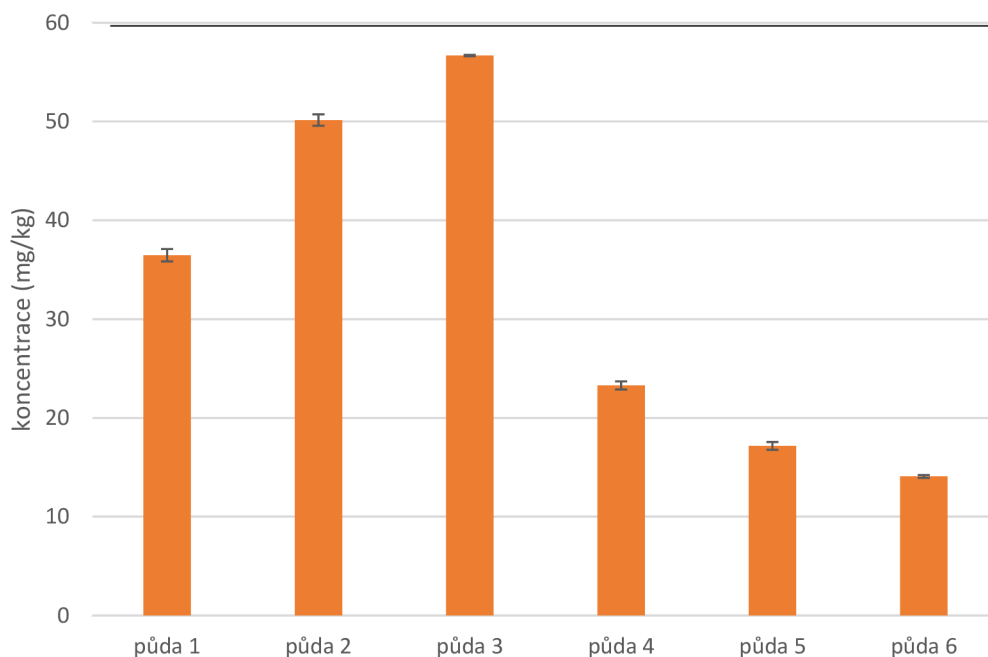
Preventivní koncentrace niklu podle vyhlášky č. 153/2016 Sb. (50 mg/kg) nebyla ve vzorcích překonána. Stanovená koncentrace niklu v půdních vzorcích nedosahovala významných výkyvů, ve všech vzorcích byla menší než 30 mg/kg. Nejvyšší byla ve vzorku č.3 (28,2 mg/kg), nejnižší ve vzorku č.5 (23,0 mg/kg). Ve vzorcích ovzduší a rostlinného materiálu byla koncentrace pod limitem detekce.



Obrázek 33: Koncentrace niklu ve vzorcích

4.1.5 Olovo

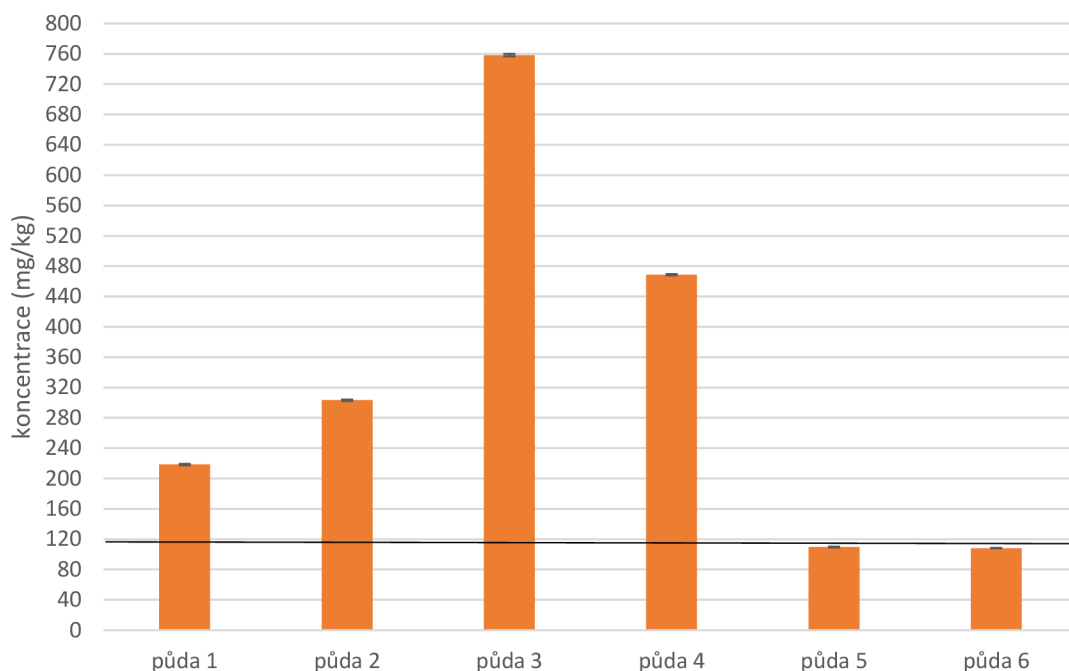
Stejně jako téměř u všech stanovovaných prvků byla nejvyšší koncentrace olova v půdním vzorku č.3– 56,7 mg/kg, tato hodnota je těsně pod preventivní koncentrací (60 mg/kg) podle vyhlášky č. 153/2016 Sb. Ve vzorku půdy č.6 byla koncentrace výrazně nižší, měla hodnotu pouze 14,1 mg/kg. U vzorků ovzduší a rostlinného materiálu nebyla koncentrace stanovena, neboť byla pod limitem detekce.



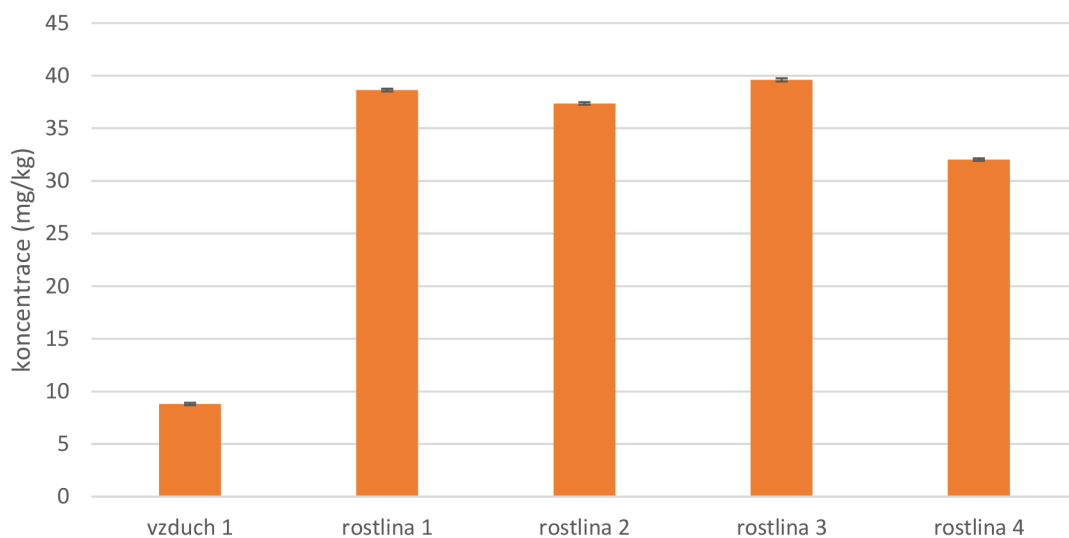
Obrázek 34: Koncentrace olova ve vzorcích

4.1.6 Zinek

Stejně jako u mědi byla u zinku překonána preventivní koncentrace (120 mg/kg) podle vyhlášky č. 153/2016 Sb. u 4 vzorků půdy. Zvýšené koncentrace jsou způsobené zpracováním (odlíváním) zinku v továrně. Nejvyšší koncentrace zinku byla zaznamenána opět v půdním vzorku č.3, konkrétně měla hodnotu 785,1 mg/kg. Nejnižší hodnota ve vzorku půdy byla pouze 111,9 mg/kg ve vzorku č.6. Koncentrace zinku ve 4 vzorcích rostlinného materiálu byla 32,0–39,6 mg/kg. Ze vzorků ovzduší byl pouze č.1 vyšší než limit detekce a hodnota byla nízká (8,8 mg/kg).



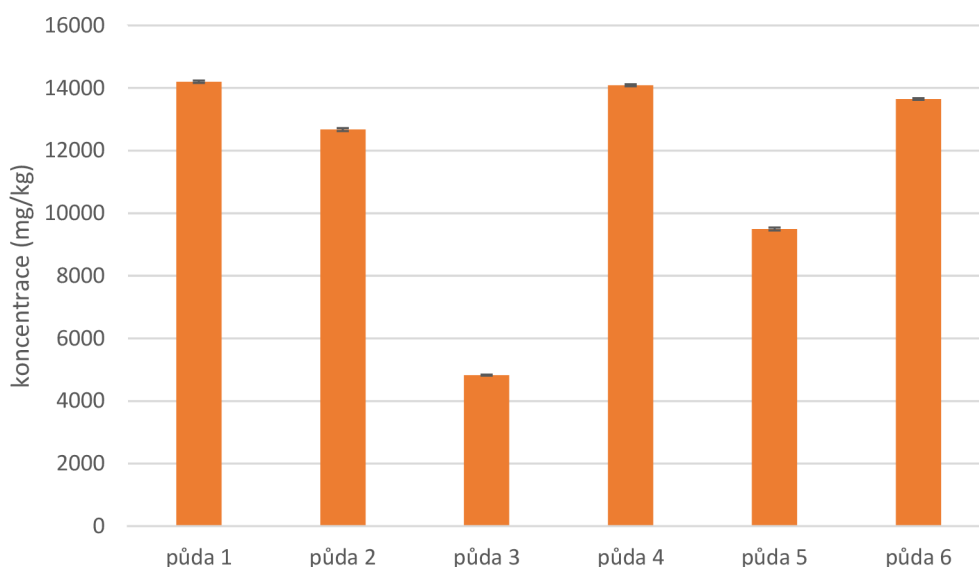
Obrázek 35: Koncentrace zinku ve vzorcích



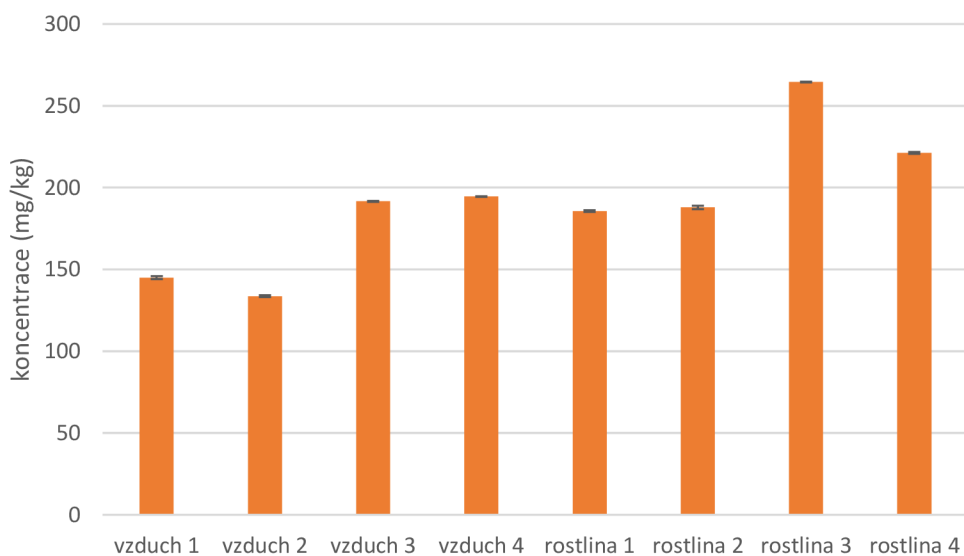
Obrázek 36: Koncentrace zinku ve vzorcích

4.1.7 Železo

Železo se ze všech stanovovaných kovů vyskytovalo v nejhojnější míře v půdě, ovzduší i rostlinném materiálu. Koncentrace železa v půdě není dlouhodobě kontrolována, preventivní koncentrace podle vyhlášky č. 153/2016 Sb. nebyla stanovena. Výskyt železa ve vyšší koncentraci v půdě, než u ostatních kovů je přirozený, procesy v továrně se na něm primárně nepodílely, neboť tento podnik zpracovává neželezné kovy. Nejvyšší koncentrace v půdě byla ve vzorku č. 1 a přesáhla hodnotu 14,2 g/kg, nejnižší byla ve vzorku č. 3 (4,8 g/kg). V rostlinném materiálu byly koncentrace vyrovnanější, ve 4 vzorcích byla 185,7–264,6 mg/kg. Na rozdíl od ostatních kovů byla ve všech vzorcích ovzduší stanovena nezanedbatelná koncentrace. Ve vzorcích ovzduší byla maximální koncentrace v č. 3 (191,6 mg/kg), nejnižší naopak ve vzorku č. 2 (133,6 mg/kg).



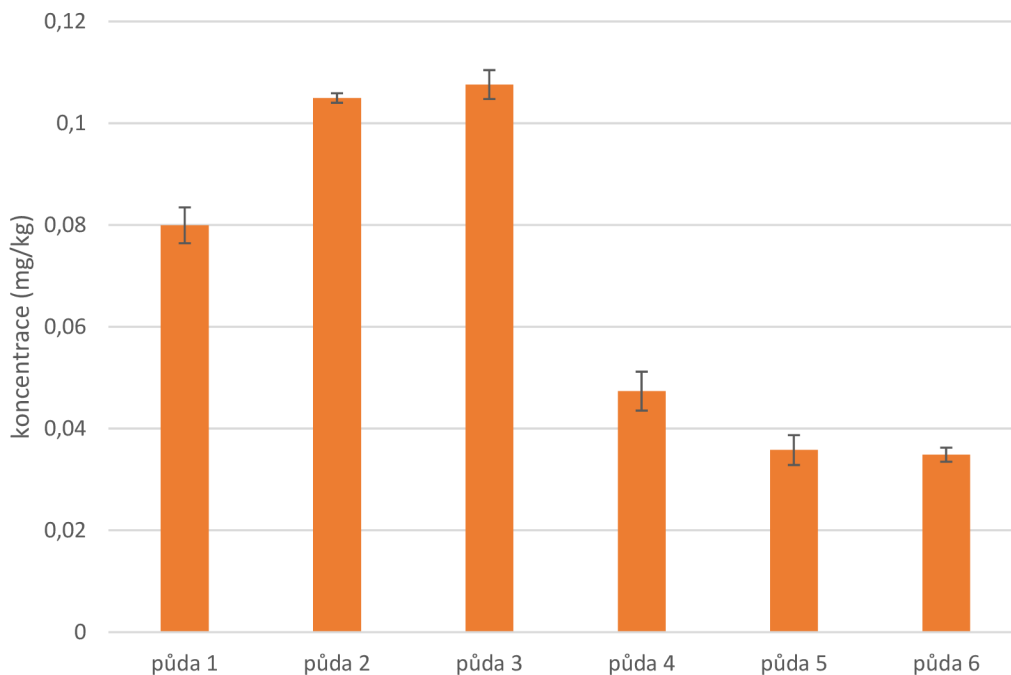
Obrázek 37: Koncentrace železa ve vzorcích



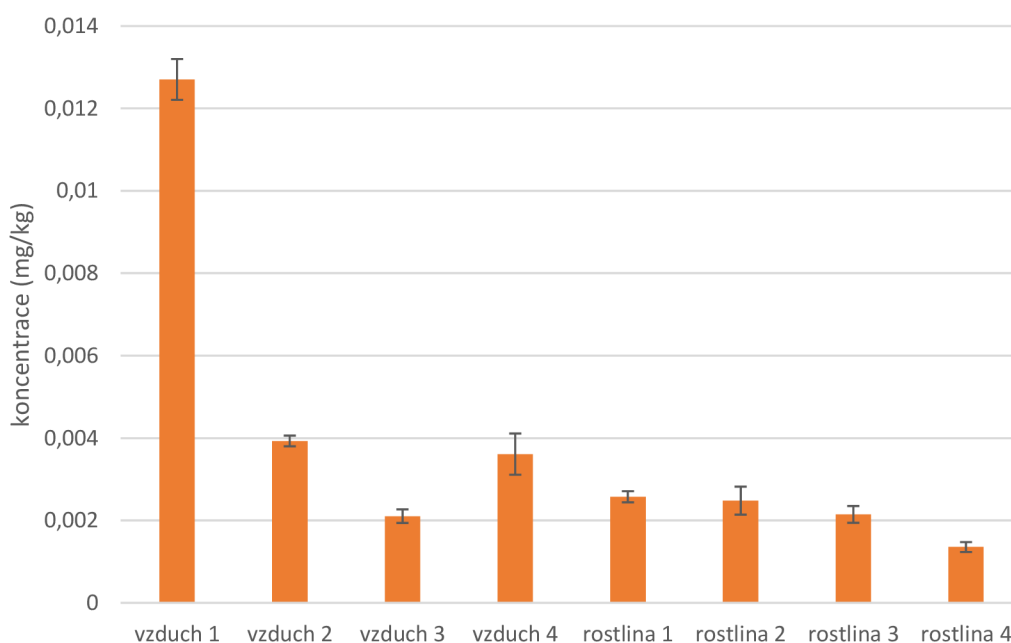
Obrázek 38: Koncentrace železa ve vzorcích

4.1.8 Rtuť

Koncentrace rtuťi ve všech vzorcích byla velmi nízká, preventivní koncentrace (0,3 mg/kg) podle vyhlášky č. 153/2016 Sb. nebyla překonána. V půdě byla nejvyšší koncentrace ve vzorku č.3 (0,108 mg/kg), nejnižší ve vzorku č.6 (0,035 mg/kg). Hodnoty koncentrací vzorků ovzduší a rostlinného materiálu se pohybovali v jednotkách $\mu\text{g}/\text{kg}$.



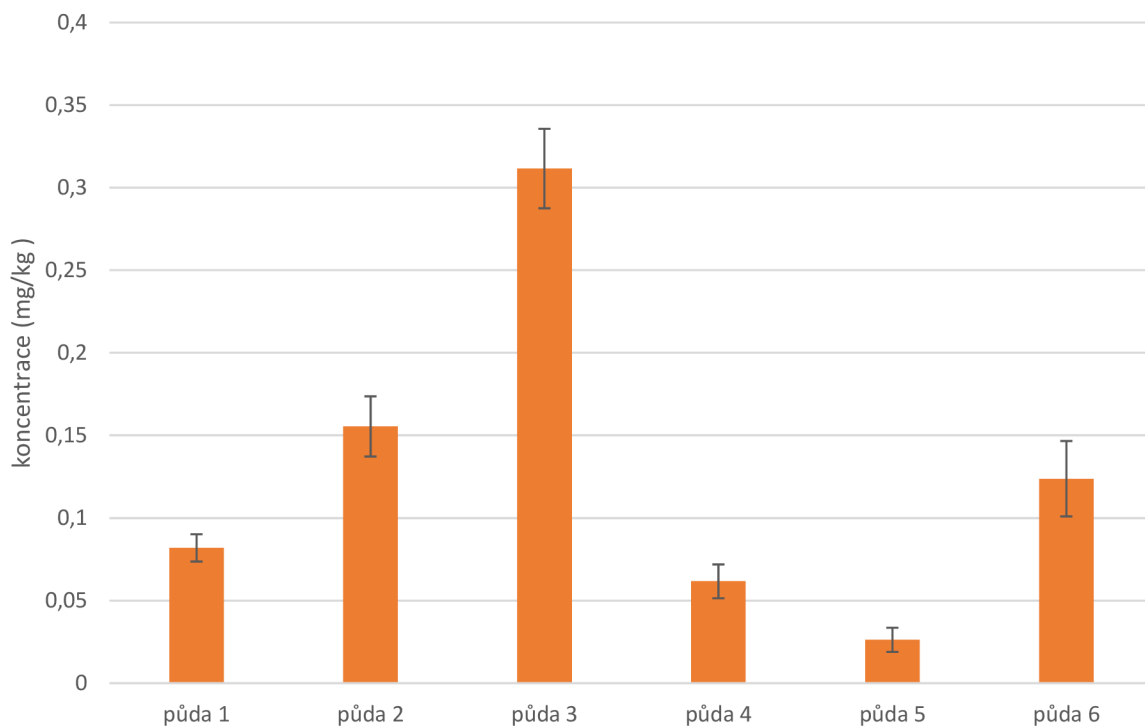
Obrázek 39: Koncentrace rtuťi ve vzorcích



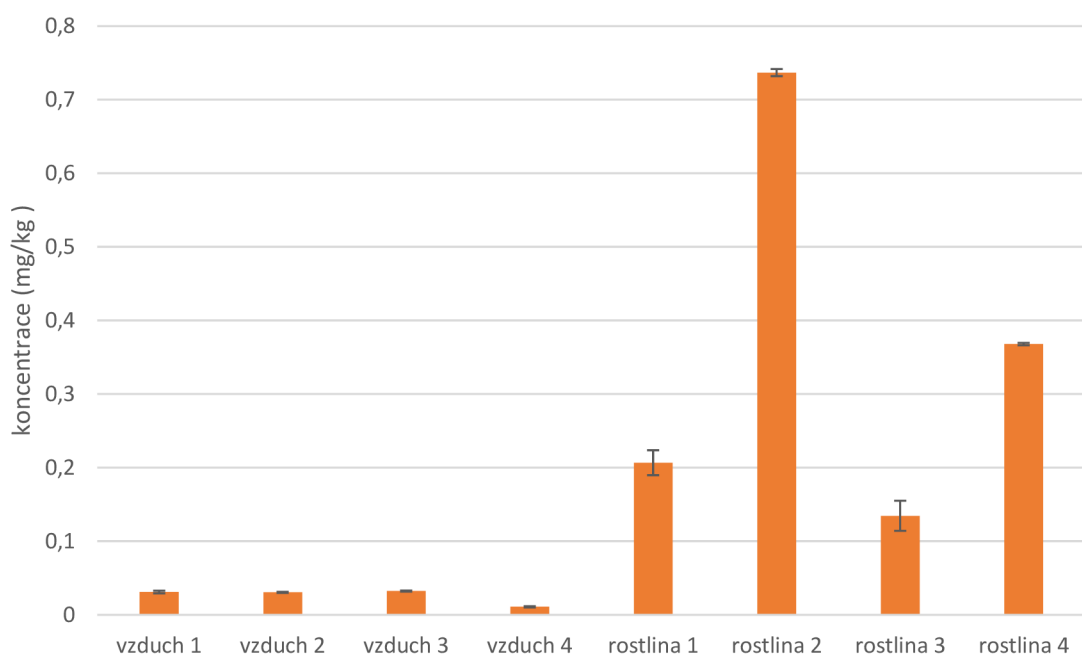
Obrázek 40: Koncentrace rtuťi ve vzorcích

4.1.9 Kadmium

Množství kadmia ve vzorcích bylo velmi nízké, pohybovalo se v setinách až desetínách $\mu\text{g}/\text{kg}$. Hodnota preventivní koncentrace podle vyhlášky č. 153/2016 Sb. ($0,5 \text{ mg}/\text{kg}$) nebyla překonána. Nejvyšší koncentrace kadmia byla nalezena v rostlinném vzorku č.2 ($0,74 \text{ mg}/\text{kg}$). Naopak nejnižší byla ve vzorku ovzduší č.4 ($0,01 \text{ mg}/\text{kg}$).



Obrázek 41: Koncentrace kadmia ve vzorcích



Obrázek 42: Koncentrace kadmia ve vzorcích

Tabulka 4: Shrnutí výsledků

	chrom		mangan		měď	
	c (mg/kg)	sm. odch.	c (mg/kg)	sm. odch.	c (mg/kg)	sm. odch.
Půda 1	42,47	0,71	666,7	0,4	187,0	1,0
Půda 2	41,15	0,18	635,7	2,0	418,9	1,2
Půda 3	74,04	0,25	476,2	0,8	541,8	1,6
Půda 4	40,89	0,35	563,6	1,5	133,6	0,6
Půda 5	36,75	0,40	509,7	1,4	50,6	0,1
Půda 6	34,93	0,52	515,5	1,9	35,5	0,2
Vzduch 1	<LOD	-	<LOD	-	0,4408	0,0065
Vzduch 2	<LOD	-	<LOD	-	<LOD	-
Vzduch 3	<LOD	-	<LOD	-	<LOD	-
Vzduch 4	<LOD	-	<LOD	-	<LOD	-
Rostlina 1	<LOD	-	74,94	0,17	20,14	0,10
Rostlina 2	<LOD	-	68,25	0,21	18,83	0,17
Rostlina 3	<LOD	-	79,93	0,12	20,73	0,15
Rostlina 4	<LOD	-	29,99	0,34	14,78	0,05

Tabulka 5: Shrnutí výsledků

	nikl		olovo		rtuť	
	c (mg/kg)	sm. odch.	c (mg/kg)	sm. odch.	c (mg/kg)	sm. odch.
Půda 1	23,36	0,48	36,47	0,63	8,19E-02	8,27E-03
Půda 2	27,58	0,32	50,15	0,58	1,55E-01	1,82E-02
Půda 3	28,16	0,2	56,68	0,08	3,12E-01	2,40E-02
Půda 4	24,7	0,38	23,29	0,41	6,17E-02	1,02E-02
Půda 5	23,02	0,28	17,17	0,4	2,63E-02	7,32E-03
Půda 6	24,53	0,36	14,08	0,14	1,24E-01	2,28E-02
Vzduch 1	<LOD	-	<LOD	-	3,10E-02	1,81E-03
Vzduch 2	<LOD	-	<LOD	-	3,05E-02	7,00E-04
Vzduch 3	<LOD	-	<LOD	-	3,22E-02	7,70E-04
Vzduch 4	<LOD	-	<LOD	-	1,08E-02	7,90E-04
Rostlina 1	<LOD	-	<LOD	-	2,07E-01	1,69E-02
Rostlina 2	<LOD	-	<LOD	-	7,37E-01	4,80E-03
Rostlina 3	<LOD	-	<LOD	-	1,35E-01	2,04E-02
Rostlina 4	<LOD	-	<LOD	-	3,68E-01	1,60E-03

Tabulka 6: Shmutí výsledků

	zinek		železo		kadmium	
	c (mg/kg)	sm. odch.	c (mg/kg)	sm. odch.	c (mg/kg)	sm. odch.
Půda 1	226,2	0,8	14 200	40	8,19E-02	8,27E-03
Půda 2	308	0,9	12 670	50	1,55E-01	1,82E-02
Půda 3	785,1	1,6	4826	15	3,12E-01	2,40E-02
Půda 4	481,7	0,8	14 090	30	6,17E-02	1,02E-02
Půda 5	113,3	0,5	9 496	47	2,63E-02	7,32E-03
Půda 6	111,9	0,2	13 650	30	1,24E-01	2,28E-02
Vzduch 1	8,804	0,114	145,0	0,9	3,10E-02	1,81E-03
Vzduch 2	-	<LOD	133,6	0,6	3,05E-02	7,00E-04
Vzduch 3	-	<LOD	191,6	0,3	3,22E-02	7,70E-04
Vzduch 4	-	<LOD	194,5	0,2	1,08E-02	7,90E-04
Rostlina 1	38,63	0,12	185,7	0,5	2,07E-01	1,69E-02
Rostlina 2	37,36	0,12	187,9	1,0	7,37E-01	4,80E-03
Rostlina 3	39,60	0,15	264,6	0,2	1,35E-01	2,04E-02
Rostlina 4	32,02	0,12	221,3	0,6	3,68E-01	1,60E-03

Dle tabulek 5, 6 a 7 je zřejmé, že nejnižší koncentraci ve vzorcích půdy měla rtuť, s výskytem maximálně cca 0,1 mg/kg. Velmi nízkou koncentraci ve vzorcích mělo také kadmium, vždy nižší než 1 mg/kg. Dále následoval nikl a chrom, jejichž výskyt v poměrně malé koncentraci lze vysvětlit tím, že nejsou zpracovávány v daném podniku. Následovalo toxické olovo, které mělo koncentraci těsně pod preventivní hodnotou 60 mg/kg dle vyhlášky č. 153/2016 Sb. Koncentrace mědi a zinku byla významně nadprůměrná díky zpracování těchto kovů v podniku. Druhým nejzastoupenějším ze stanovovaných kovů byl mangan, jehož vysoký výskyt v půdách je běžný. Nejvyšší koncentrace železa ze stanovovaných kovů byla přirozená a není způsobena procesy v podniku.

Ve vzorcích částic z ovzduší byla koncentrace většiny kovů pod limitem detekce. Koncentrace kovů v rostlinném materiálu byla řádově nižší než v půdě. Ve vzorcích rostlinného materiálu bylo opět nejvíce zastoupené železo, neboť je pro růst rostlin klíčové. Po železu opět následoval mangan a dále zinek a měď. Koncentrace ostatních stanovovaných kovů byly zanedbatelné.

5 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá výskytem jemných a ultrajemných částic v průmyslové zóně a jejich možným vlivem na zdraví. Koncentrace částic v ovzduší byla měřena v reálném čase a byl proveden sběr částic na filtr pro prvkovou analýzu. Dále byla zhodnocena koncentrace vybraných kovů v půdě a rostlinném materiálu v blízkosti průmyslového podniku. V úvodní části rešerše jsou popsány polévaté částice a jejich rozdělení podle velikosti průměru. Velikost částice má vliv především na hloubku proniknutí do těla a délku setrvání v něm. Jemné a ultrajemné částice pronikají až do dolních cest dýchacích a způsobují výrazné zdravotní komplikace. Ultrajemné částice jsou schopny vniknout až do krevního řečiště a pro svou biologickou aktivitu jsou považovány za nejnebezpečnější frakci. Následně byly v teoretické části popsány nejvýznamnější zdroje částic a jejich podíl na celkové koncentraci v ovzduší, možnosti analýzy částic a možné zdravotní dopady.

V experimentální části jsou popsána měření koncentrace částic v ovzduší poblíž průmyslového podniku. Měření probíhala po dobu 2 hodin v různých denních intervalech a byl pozorován výskyt částic v jednotlivých frakcích. Pro vyhodnocení dat byly částice rozděleny do frakcí PM₁, PM_{2,5}, PM₅ a PM₁₀. Kvůli venkovnímu měření nebylo možné ke zvýšené koncentraci částic přiřadit konkrétní proces v továrně, nejčastějšími procesy v továrně byly slévání, obrábění, kování a lisování. Z výsledků měření OPS 3330 je patrné, že nejvyšší počet vyprodukovaných částic je ve frakci PM₁, dominují částice s velikostí 0,3 μm a menší. Toto zjištění je znepokojivé, neboť právě nejmenší částice mají potenciálně nejvyšší zdravotní rizika.

Hmotnostní koncentrace PM_{2,5} a PM₁₀ měla po většinu měření velmi podobnou hodnotu, z čehož vyplývá že, hrubá frakce byla zastoupena pouze minimálně. Výrazně vyšší podíl hrubé frakce byl zaznamenán ve dvou případech. Nejprve při měření 14. 11. 2022 ve 13:36 byla koncentrace PM_{2,5} 43 μg/m³ a PM₁₀ 228 μg/m³. Druhý případ byl při měření 15. 11. 2022 v 7:23, kdy koncentrace PM_{2,5} byla pouze 141 μg /m³ a hrubá frakce tvořila výraznou většinu hmotnostní koncentrace PM₁₀ (993 μg/m³). Nejvyšší hmotnostní koncentrace v rámci všech měření byla naměřena 24. listopadu ve 12:26 a podílely se na ní především částice do 1 μm. Koncentrace měla hodnotu 1 594 μg /m³ pro PM₁₀, 1 554 μg/m³ pro PM_{2,5} a 1 540 μg/m³ pro PM₁. Tato hmotnostní koncentrace byla nejvyšší z důvodu výjimečně vyšší četnosti částic o velikosti cca 0,9 μm než o velikosti 0,3 μm.

Ve vzorcích částic z ovzduší, půdy a rostlinného materiálu byla stanovována koncentrace kovů. Ve vzorcích půdy bylo nalezena nadprůměrná koncentrace zinku a mědi, což bylo očekáváno, neboť tyto kovy jsou v továrně zpracovávány. Koncentrace kovů v jednotlivých vzorcích půdy se odlišovala podle místa odběru. Nejvyšší koncentrace u většiny kovů byla ve vzorku č.3, což lze vysvětlit umístěním v těsné blízkosti ventilace. Naopak nejnižší koncentrace kovů v půdě byly ve vzorcích č. 5 a 6, které byly nejvzdálenější od budovy továrny a ventilace vzduchu. V rostlinném materiálu byla nalezena několikanásobně nižší koncentrace kovů než v půdě, nedošlo tedy k výrazné akumulaci. Ve vzorcích ovzduší byla koncentrace většiny kovů pod limitem detekce z důvodu příliš krátké doby sběru (2 hodiny), pro stanovení prvků v ovzduší by bylo vhodnější celodenní měření.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Particulate Matter (PM) Pollution* [online]. epa.gov, 2022 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [2] KELLY, Frank J. a Julia C. FUSSELL. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmospheric environment (1994)*. Kidlington: Elsevier, 2012, **60**, 504-526. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2012.06.039
- [3] Particulate Matter (PM) Basics: What is PM, and how does it get into the air?. In: *Particulate Matter (PM) Pollution* [online]. [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [4] Imisní limity. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/info/limity_CZ.html
- [5] BRZEZINA, Jáchym. Suspendované částice (PM) – otázky a odpovědi. *Blog o meteorologii, hydrologii a kvalitě ovzduší* [online]. [cit. 2023-11-27]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/12/01/suspendovane-castice-pm-otazky-a-odpovedi/>
- [6] HARRISON, Roy M, Alan M JONES a Royston G LAWRENCE. Major component composition of PM10 and PM2.5 from roadside and urban background sites. *Atmospheric environment (1994)*. Oxford: Elsevier Science, 2004, **38**(27), 4531-4538. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2004.05.022
- [7] Dominici F, Wang Y, Correia AW, Ezzati M, Pope CA 3rd, Dockery DW. Chemical Composition of Fine Particulate Matter and Life Expectancy: In 95 US Counties Between 2002 and 2007. *Epidemiology*. 2015 Jul;26(4):556-64. doi: 10.1097/EDE.0000000000000297. PMID: 25906366; PMCID: PMC4742572.
- [8] Black carbon. *Ccacoalition* [online]. [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.ccacoalition.org/en/slcp/black-carbon>
- [9] Black carbon. In: *SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS* [online]. [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://www.ccacoalition.org/en/slcp/black-carbon>
- [10] BRIFFA, Jessica, Emmanuel SINAGRA a Renald BLUNDELL. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*. Elsevier, 2020, **6**(9), e04691-e04691. ISSN 2405-8440. Dostupné z: doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04691
- [11] KARAGULIAN, Federico, Claudio A. BELIS, Carlos Francisco C. DORA, Annette M. PRÜSS-USTÜN, Sophie BONJOUR, Heather ADAIR-ROHANI a Markus AMANN. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric environment (1994)*. Elsevier, 2015, **120**, 475-483. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2015.08.087
- [12] What are manufactured nanomaterials?. *OSHWIKI* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/manufactured-nanomaterials-workplace-risks-and-how-manage-them>

- [13] ALMEIDA, S M, J LAGE, B FERNÁNDEZ, S GARCIA, M A REIS a P C CHAVES. Chemical characterization of atmospheric particles and source apportionment in the vicinity of a steelmaking industry. *The Science of the total environment* [online]. Netherlands: Elsevier B.V, 2015, **521-522**, 411-420 [cit. 2022-11-26]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2015.03.112
- [14] KHAMRAEV, Khusniddin, Daniel CHERIYAN a Jae-ho CHOI. A review on health risk assessment of PM in the construction industry – Current situation and future directions. *The Science of the total environment*. Netherlands: Elsevier B.V, 2021, **758**, 143716. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143716
- [15] PANT, Pallavi a Roy M. HARRISON. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric environment (1994)*. Kidlington: Elsevier, 2013, **77**, 78-97. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2013.04.028
- [16] Vehicle emissions and efficiency. In: *European Environment Agency* [online]. [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/media/infographics/vehicle-emissions-and-efficiency-1/view>
- [17] BAUER, Susanne E., Kostas TSIGARIDIS a Ron MILLER. Significant atmospheric aerosol pollution caused by world food cultivation. *Geophysical research letters*. Washington: Blackwell Publishing, 2016, **43**(10), 5394-5400. ISSN 0094-8276. Dostupné z: doi:10.1002/2016GL068354
- [18] POZZER, Andrea, Alexandra P TSIMPIDI, Vlassis A KARYDIS, Alexander DE MEIJ a Jos LELIEVELD. Impact of agricultural emission reductions on fine-particulate matter and public health. *Atmospheric chemistry and physics*. Katlenburg-Lindau: Copernicus, 2017, **17**(20), 12813-12826. ISSN 1680-7324. Dostupné z: doi:10.5194/acp-17-12813-2017
- [19] GIANNADAKI, Despina, Elias GIANNAKIS, Andrea POZZER a Jos LELIEVELD. Estimating health and economic benefits of reductions in air pollution from agriculture. *The Science of the total environment*. Netherlands: Elsevier B.V, 2018, **622-623**, 1304-1316. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.064
- [20] BOND, Tami C., David S. COVERT, John C. KRAMLICH, Timothy V. LARSON a Robert J. CHARLSON. Primary particle emissions from residential coal burning: Optical properties and size distributions. *Journal of Geophysical Research*. ICC 9-1-ICC 9-14. Dostupné z: doi:10.1029/2001JD000571
- [21] WEICHENTHAL, Scott, Ryan KULKA, Eric LAVIGNE, et al. Biomass Burning as a Source of Ambient Fine Particulate Air Pollution and Acute Myocardial Infarction. *EPIDEMIOLOGY* [online]. 2017, **28**(3), 329–337 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: doi:10.1097/EDE.0000000000000636
- [22] ABT, Eileen, Helen H. SUH, George ALLEN a Petros KOUTRAKIS. Characterization of Indoor Particle Sources: A Study Conducted in the Metropolitan Boston Area. *Environmental health perspectives*. United States: National Institute of Environmental

Health Sciences. National Institutes of Health. Department of Health, Education and Welfare, 2000, **108**(1), 35-44. ISSN 0091-6765. Dostupné z: doi:10.1289/ehp.0010835

[23] VAUTARD, Robert, Bertrand BESSAGNET, Mian CHIN a Laurent MENUT. On the contribution of natural Aeolian sources to particulate matter concentrations in Europe: Testing hypotheses with a modelling approach. *Atmospheric environment (1994)*. Oxford: Elsevier, 2005, **39**(18), 3291-3303. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2005.01.051

[24] KUMAR, Prashant, Gopinath KALAIARASAN, Alexandra E. PORTER, et al. An overview of methods of fine and ultrafine particle collection for physicochemical characterisation and toxicity assessments. *The Science of the total environment*. Netherlands: Elsevier B.V, 2021, **756**, 143553. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143553

[25] MISRA, Chandan, Manisha SINGH, Si SHEN, Constantinos SIOUTAS a Peter M HALL. Development and evaluation of a personal cascade impactor sampler (PCIS). *Journal of aerosol science*. Oxford: Elsevier, 2002, **33**(7), 1027-1047. ISSN 0021-8502. Dostupné z: doi:10.1016/S0021-8502(02)00055-1

[26] CHOW, Judith C. Measurement Methods to Determine Compliance with Ambient Air Quality Standards for Suspended Particles. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*. United States: Taylor & Francis Group, 1995, **45**(5), 320-382. ISSN 1096-2247. Dostupné z: doi:10.1080/10473289.1995.10467369

[27] CHUNG, Albert, Daniel P.Y. CHANG, Michael J. KLEEMAN, Kevin D. PERRY, Thomas A. CAHILL, Dabrina DUTCHER, Eric M. MCDOUGALL a Kenneth STROUD. Comparison of Real-Time Instruments Used To Monitor Airborne Particulate Matter. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)* [online]. Pittsburgh, PA: Taylor & Francis Group, 2001, **51**(1), 109-120 [cit. 2022-11-26]. ISSN 1096-2247. Dostupné z: doi:10.1080/10473289.2001.10464254

[28] GIECHASKIEL, Barouch, Matti MARICQ, Leonidas NTZIACHRISTOS, Christos DARDIOTIS, Xiaoliang WANG, Harald AXMANN, Alexander BERGMANN a Wolfgang SCHINDLER. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number. *Journal of aerosol science*. Oxford: Elsevier, 2014, **67**, 48-86. ISSN 0021-8502. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaerosci.2013.09.003

[29] Operating principle of an optical particle counter. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Operating-principle-of-an-optical-particle-counter-21_fig38_341152720

[30] Condensation Particle Counter 3007. In: *TSI* [online]. [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://tsi.com/products/particle-counters-and-detectors/condensation-particle-counters/condensation-particle-counter-3007/>

[31] Nový skenovací transmisní elektronový mikroskop Centra nanotechnologií VŠB-TUO. In: *VŠB-TUO* [online]. [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://www.vsb.cz/cs/detail-novinky?reportId=38767>

- [32] CORMIER, Stephania A, Slawo LOMNICKI, Wayne BACKES a Barry DELLINGER. Origin and Health Impacts of Emissions of Toxic By-Products and Fine Particles from Combustion and Thermal Treatment of Hazardous Wastes and Materials. *Environmental health perspectives*. United States: National Institute of Environmental Health Sciences. National Institutes of Health. Department of Health, Education and Welfare, 2006, **114**(6), 810-817. ISSN 0091-6765. Dostupné z: doi:10.1289/ehp.8629
- [33] OBERDÖRSTER, Günter. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *International archives of occupational and environmental health*. Berlin: Springer, 2001, **74**(1), 1-8. ISSN 0340-0131
- [34] Viral respiratory infections and air pollutants. In: *SpringerLink* [online]. [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11869-021-01088-6/figures/1>
- [35] WANG, Jiangxue, Ying LIU, Fang JIAO, et al. Time-dependent translocation and potential impairment on central nervous system by intranasally instilled TiO₂ nanoparticles. *Toxicology (Amsterdam)*. Kidlington: Elsevier, 2008, **254**(1), 82-90. ISSN 0300-483X. Dostupné z: doi:10.1016/j.tox.2008.09.014
- [36] WANG, Jiangxue, Guoqiang ZHOU, Chunying CHEN, et al. Acute toxicity and biodistribution of different sized titanium dioxide particles in mice after oral administration. *Toxicology letters*. Shannon: Elsevier Ireland, 2007, **168**(2), 176-185. ISSN 0378-4274. Dostupné z: doi:10.1016/j.toxlet.2006.12.001
- [37] WAHLIN, Peter, Steffen LOFT, Lykke FORCHHAMMER, Marianne GLASIUS, Ole RAASCHOU-NIELSEN, Jacob SIMONSEN, Elvira Vaclavik BRAUNER a Peter MOLLER. Exposure to Ultrafine Particles from Ambient Air and Oxidative Stress-Induced DNA Damage. *Environmental health perspectives*. United States: National Institute of Environmental Health Sciences. National Institutes of Health. Department of Health, Education and Welfare, 2007, **115**(8), 1177-1182. ISSN 0091-6765. Dostupné z: doi:10.1289/ehp.9984
- [38] SCHWARTZ, Joel, Douglas W. DOCKERY a Lucas M. NEAS. Is Daily Mortality Associated Specifically with Fine Particles?. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*. Pittsburgh, PA: Taylor & Francis Group, 1996, **46**(10), 927-939. ISSN
- [39] SACKS, Jason D, Lindsay WICHERS STANEK, Thomas J LUBEN, Douglas O JOHNS, Barbara J BUCKLEY, James S BROWN a Mary ROSS. Particulate Matter-Induced Health Effects: Who Is Susceptible?. *Environmental health perspectives*. Research Triangle Park, NC: National Institute of Environmental Health Sciences, 2011, **119**(4), 446-454. ISSN 0091-6765. Dostupné z: doi:10.1289/ehp.1002255
- [40] LANDRIGAN, Philip J, Richard FULLER, Nereus J R ACOSTA, et al. The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet (British edition)*. England: Elsevier, 2018, **391**(10119), 462-512. ISSN 0140-6736. Dostupné z: doi:10.1016/S0140-6736(17)32345-0

- [41] LELIEVELD, J, J S EVANS, M FNAIS, D GIANNADAKI a A POZZER. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature (London)*. England: Nature Publishing Group, 2015, **525**(7569), 367-371. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/nature15371
- [42] HOEK, Gerard, Ranjini M KRISHNAN, Rob BEELEN, Annette PETERS, Bart OSTRO, Bert BRUNEKREEF a Joel D KAUFMAN. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environmental health*. England: BioMed Central, 2013, **12**(1), 43-43. ISSN 1476-069X. Dostupné z: doi:10.1186/1476-069X-12-43
- [43] POPE, C Arden, Richard T. BURNETT, George D THURSTON, Michael J THUN, Eugenia E CALLE, Daniel KREWSKI a John J GODLESKI. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*. 2004, **109**(1), 71–77. Dostupné z: doi:10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F
- [44] KELLY, Frank J. Oxidative stress: its role in air pollution and adverse health effects. *Occupational and environmental medicine (London, England)*. England: BMJ Publishing Group, 2003, **60**(8), 612-616. ISSN 1351-0711. Dostupné z: doi:10.1136/oem.60.8.612
- [45] GAO, Yang, Emily Yy CHAN, Liping LI, Patrick Wc LAU a Tze Wai WONG. Chronic effects of ambient air pollution on respiratory morbidities among Chinese children: a cross-sectional study in Hong Kong. *BMC public health*. England: BioMed Central, 2014, **14**(1), 105-105. ISSN 1471-2458. Dostupné z: doi:10.1186/1471-2458-14-105
- [46] HOWARD, Vyvyan. Particulate Emissions and Health. In: *Nottinghamshire County Council* [online]. 2009 [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.nottinghamshire.gov.uk/media/110338/kc3-particulate-emissions-and-health-statement-of-evidence-to-ringaskiddy-inquiry.pdf>
- [47] HAMRA, Ghassan B, Neela GUHA, Aaron COHEN, et al. Outdoor Particulate Matter Exposure and Lung Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental health perspectives*. NLM-Export, 2014, **122**(9), 906-911. ISSN 0091-6765. Dostupné z: doi:10.1289/ehp/1408092
- [48] FU, Pengfei, Xinbiao GUO, Felix Man Ho CHEUNG a Ken Kin Lam YUNG. The association between PM_{2.5} exposure and neurological disorders: A systematic review and meta-analysis. *The Science of the total environment*. Elsevier B.V, 2019, **655**, 1240-1248. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.218
- [49] MANISALIDIS, Ioannis, Elisavet STAVROPOULOU, Agathangelos STAVROPOULOS a Eugenia BEZIRTZOGLOU. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in public health*. Switzerland: Frontiers Research Foundation, 2020, **8**, 14. ISSN 2296-2565. Dostupné z: doi:10.3389/fpubh.2020.00014

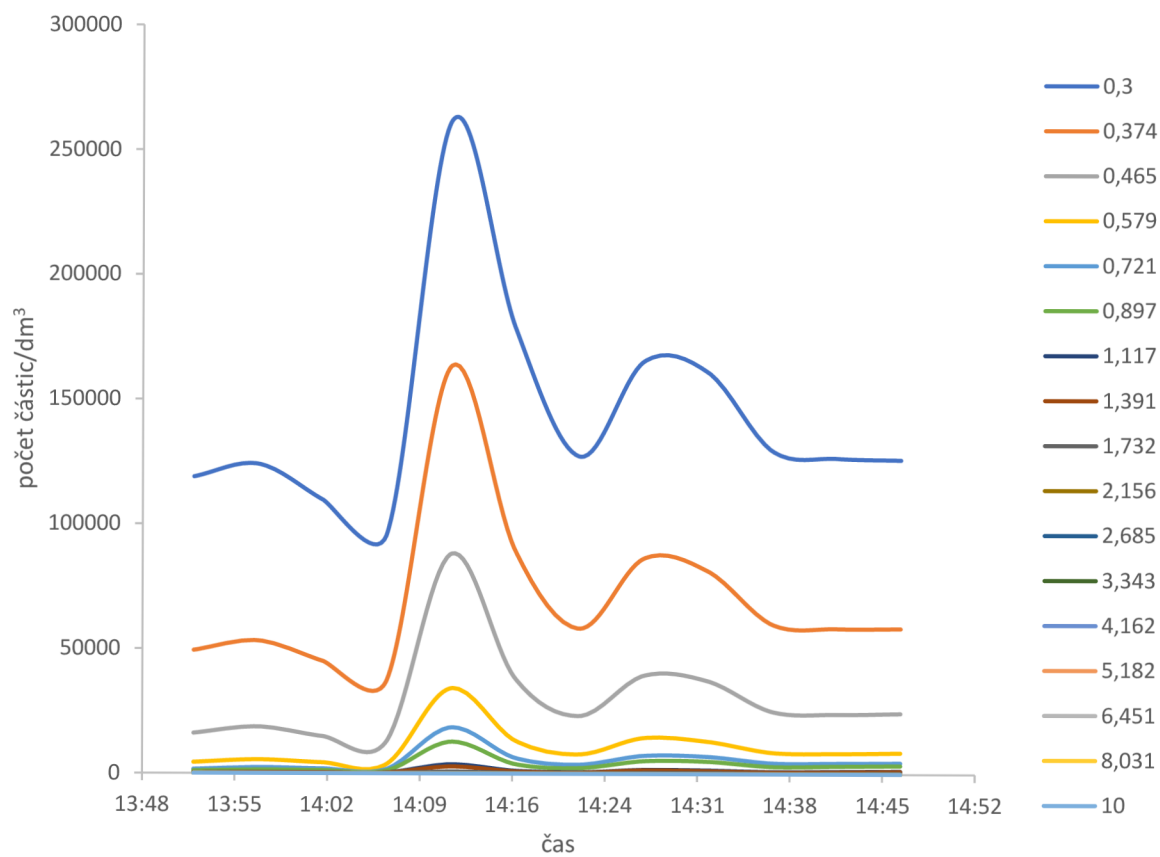
- [50] Optical Particle Sizer (OPS) 3330. *TSI* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: [https://tsi.com/products/particle-sizers/supermicron-capable-particle-sizer-spectrometers/optical-particle-sizer-\(ops\)-3330/](https://tsi.com/products/particle-sizers/supermicron-capable-particle-sizer-spectrometers/optical-particle-sizer-(ops)-3330/)
- [51] AirChek TOUCH Pumps. *SKC* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.skcinc.com/products/airchek-touch-pumps>
- [52] Basic Principles of Microwave Digestion. *Lambda-at* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: https://www.lambda-at.com/basic_principles_of_microwave_digestion.html
- [53] OPTICAL PARTICLE SIZER SPECTROMETER MODEL 3330: OPERATION AND SERVICE MANUAL. In: Kenelec scientific: measuring up [online]. 10. 2013, s. 73-77 [cit. 202-05-10]. Dostupné z: https://www.kenelec.com.au/wpcontent/uploads/2016/06/TSI_3330_Opticle_Particle_Sizer_Manual.pdf
- [54] VAN LOON, John C. In: *Analytical Atomic Absorption Spectroscopy: Selected Methods*. ACADEMIC PRESS 1980. Toronto: A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, 1980, s. 10–12. ISBN 0–12–714050–6.
- [55] SYNEK, V, P SUBRT a J MARECEK. Uncertainties of mercury determinations in biological materials using an atomic absorption spectrometer: AMA 254. *Accreditation and quality assurance*. Heidelberg: Springer, 2000, 5(2), 58-66. ISSN 0949-1775. Dostupné z: doi:10.1007/s007690050012

7 SEZNAM PŘÍLOH

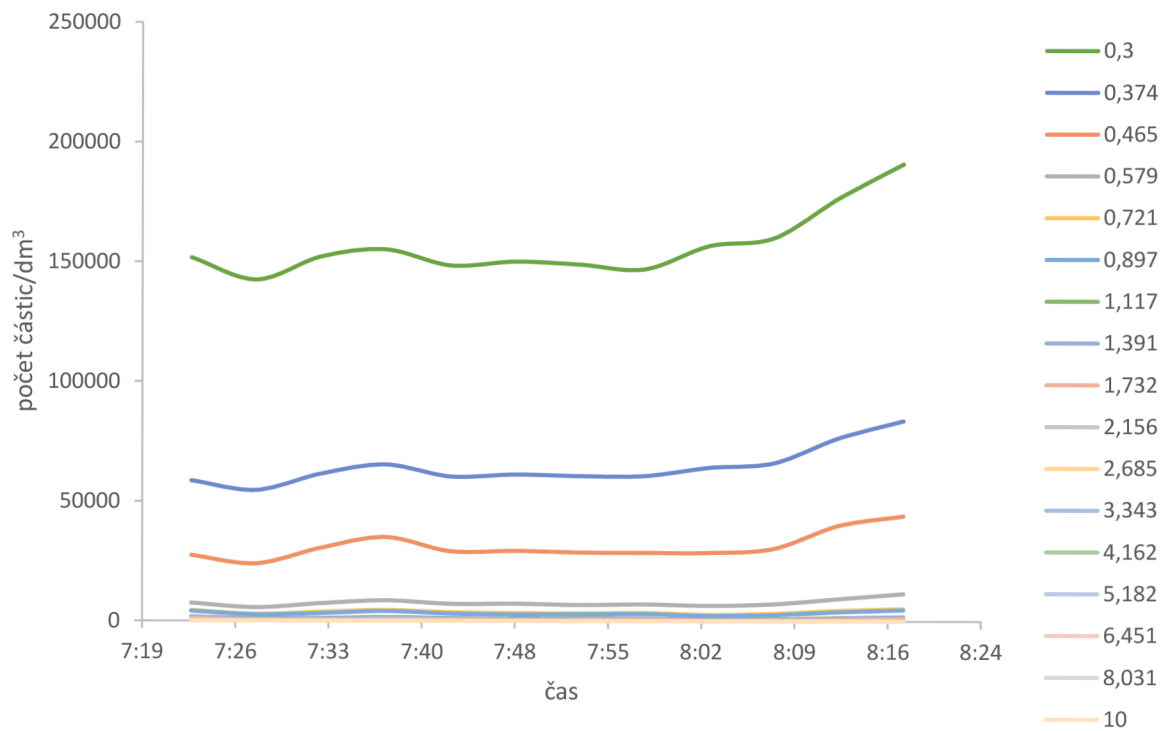
Příloha 1: Záznam měření OPS 14. 11. 2022.....	58
Příloha 2: Záznam měření OPS 15. 11. 2022.....	59
Příloha 3: Záznam měření OPS 15. 11. 2022.....	60
Příloha 4: Záznam měření OPS 24. 11. 2022.....	61
Příloha 5: Záznam měření OPS 24. 11. 2022.....	62

8 PŘÍLOHY

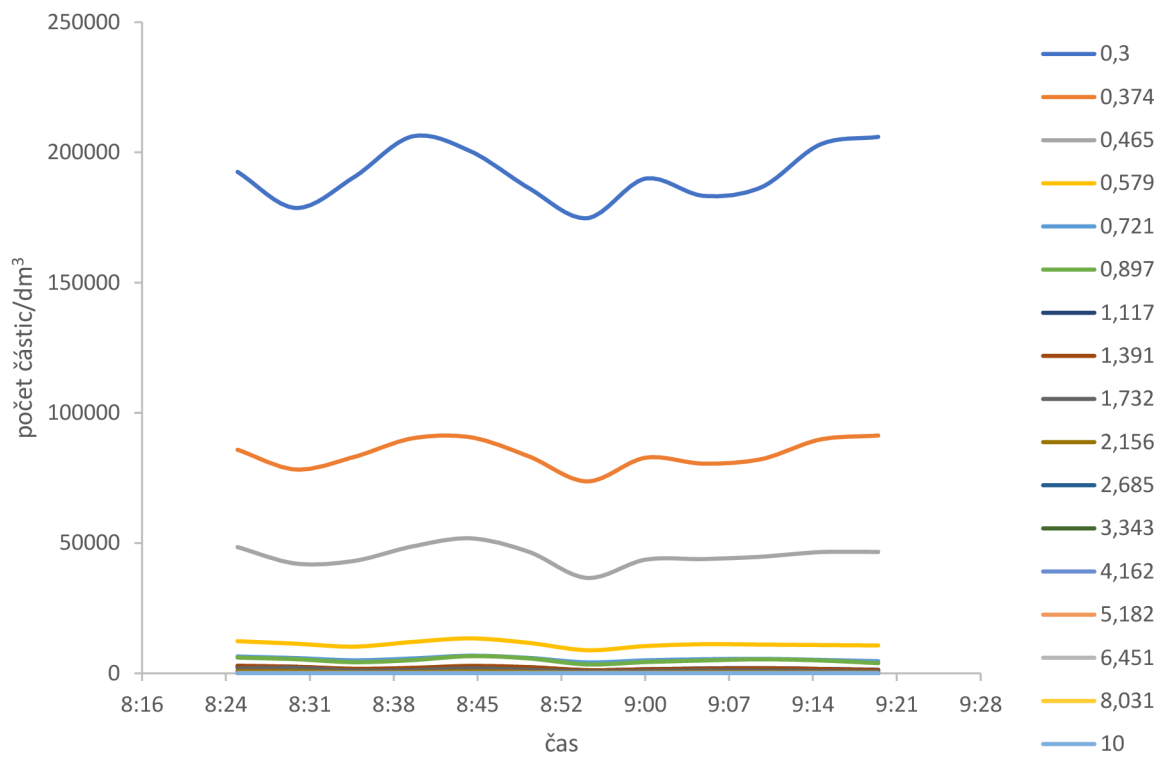
Příloha 1: Záznam měření OPS 14. 11. 2022



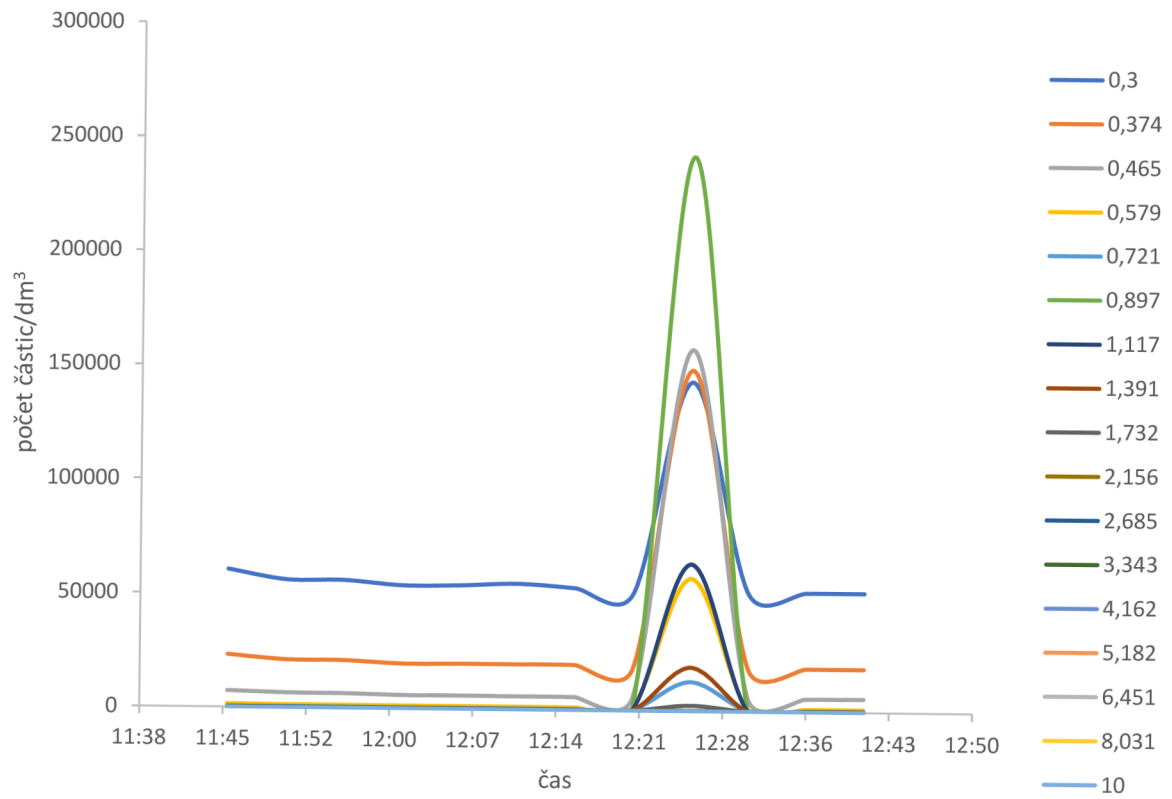
Příloha 2: Záznam měření OPS 15. 11. 2022



Příloha 3: Záznam měření OPS 15. 11. 2022



Příloha 4: Záznam měření OPS 24. 11. 2022



Příloha 5: Záznam měření OPS 24. 11. 2022

