

Zdravotní rizika suspendovaných částic ze silniční dopravy

Bc. Pavla Krátká

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta logistiky a krizového řízení

Ústav krizového řízení

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Pavla Krátká
Osobní číslo:	L23064
Studijní program:	N1032A020002 Bezpečnost společnosti
Specializace:	Rizikové inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Zdravotní rizika suspendovaných částic ze silniční dopravy

Zásady pro vypracování

- Zpracujte přehled současných poznatků ohledně zdravotních rizik suspendovaných částic ze silniční dopravy.
- Popište dopravní situaci na vymezeném prostoru.
- Posuďte zdravotní rizika suspendovaných částic ze silniční dopravy ve vymezeném prostoru.
- Navrhněte opatření pro snížení identifikovaných zdravotních rizik.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. SICARD, Pierre; AGATHOKLEOUS, Evgenios; DE MARCO, Alessandra; PAOLETTI, Elena a CALATAYUD, Vincent. Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades. Online. *Environmental Sciences Europe*. 2021, vol. 33, no. 28, s. 1-12. ISSN 2190-4707. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00450-2>.
2. SKÁCEL, František a TEKÁČ, Viktor. *Analýza ovzduší*. Vydání: první. Praha: Vysoká škola chemicko-technická v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-038-6.
3. THUNBERG, Greta. *Kniha o klimatu*. Unversum. Praha: Euromedia Group, 2022. ISBN 978-80-242-8226-8.
4. WORLD HEALTH ORGANIZATION. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Online. Geneva, 2021. ISBN 9789240034228. Dostupné z: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
5. ZAPLETAL, Miloš; KAŠPAR, VÍT; SUMEC, Pavel; BÍLEK, Jiří; DOLEŽAL, Karel et al. *Zelená infrastruktura a její vliv na kvalitu ovzduší: metodika výsadby zeleně v urbanním prostředí s ohledem na záchyt polutantů*. Ostrava: Statutární město Ostrava, Odbor strategického rozvoje, 2021. ISBN 978-80-88399-03-2.

Další odborná literatura dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Mgr. Tomáš Zeman, Ph.D. et Ph.D.**
Ústav krizového řízení

Datum zadání diplomové práce: **2. prosince 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **25. dubna 2025**

L.S.

prof. Ing. Zuzana Tučková, Ph.D.
děkanka

Ing. et Ing. Jiří Konečný, Ph.D.
ředitel ústavu

V Uherském Hradišti dne 2. prosince 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

V Uherském Hradišti, dne 25.04.2025

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na hodnocení zdravotních rizik suspendovaných částic (PM) pocházejících ze silniční dopravy. V teoretické části jsou popsány zdroje, vlastnosti a zdravotní dopady částic PM₁₀, PM_{2,5} a PM₁, včetně výfukových a nevýfukových emisí, jako jsou otěry brzd a pneumatik či resuspenze prachu. Praktická část analyzuje závislost koncentrací PM na dopravě a meteorologických podmínkách na příkladu lokality Brno – Svatoplukova. Pomocí metody Human Health Risk Assessment jsou vyhodnoceny zdravotní dopady inhalační expozice na tři modelové subjekty. Práce přispívá k porozumění vztahu mezi dopravou, znečištěním ovzduší a ochranou veřejného zdraví.

Klíčová slova: suspendované částice, silniční doprava, zdravotní rizika, stanice imisního monitoringu, HHRA

ABSTRACT

The thesis focuses on the health risk assessment of suspended particulate matter (PM) from road transport. The theoretical part describes the sources, properties and health effects of PM₁₀, PM_{2,5} and PM₁, including exhaust and non-exhaust emissions such as brake and tyre abrasion and dust resuspension. The practical part analyses the dependence of PM concentrations on traffic and meteorological conditions on the example of the Brno – Svatoplukova site. Using the Human Health Risk Assessment method, the health effects of inhalation exposure on three model subjects are evaluated. The work contributes to understanding of the relationship between transport, air pollution and public health protection.

Keywords: particulate matter, road traffic, health risks, immission monitoring stations, HHRA

Chtěla bych vyjádřit svou upřímnou vděčnost vedoucímu práce doc. Mgr. Tomáši Zemanovi, Ph.D. et Ph.D., za jeho odborné vedení, trpělivost, lidský přístup a cenné rady, které mi poskytl během vedení této práce.

Velké poděkování patří také všem, kteří mi ochotně poskytli potřebná data a informace, bez nichž by tato práce nemohla vzniknout.

V neposlední řadě děkuji všem, kteří to se mnou nevzdali, i když to nebylo vždy snadné, věřili mi.

OBSAH

ÚVOD.....	11
CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	15
1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	16
2 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE.....	17
2.1 ZDROJE SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC	17
2.2 PRACHOVÉ ČÁSTICE PM ₁₀	18
2.3 PRACHOVÉ ČÁSTICE PM _{2,5}	18
2.4 PRACHOVÉ ČÁSTICE PM ₁	19
3 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE Z DOPRAVY.....	20
3.1 VÝFUKOVÉ EMISE.....	20
3.2 MECHANICKÉ OTĚRY	20
3.3 RESUSPENZACE PRACHU.....	21
3.4 VLIV DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY A PROVOZU	21
3.5 VLIV METEOROLOGICKÝCH PODMÍNEK NA SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE Z DOPRAVY	22
4 ZDRAVOTNÍ RIZIKA SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC	24
4.1 ZDRAVOTNÍ RIZIKA ZPŮSOBENÁ VYTAVENÍM SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC	24
4.2 NEJNÁCHYLNĚJŠÍ SKUPINY OBYVATEL	25
4.2.1 Děti	26
4.2.2 Těhotné ženy	26
4.2.3 Senioři	26
4.2.4 Osoby trpící chronickými nemocemi	27
4.3 DOPADY NA VEŘEJNÉ ZDRAVÍ V KONTEXTU DOPRAVY	27
5 MONITOROVÁNÍ SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC V OVZDUŠÍ.....	29
5.1 MONITORING KVALITY OVZDUŠÍ V ČESKÉ REPUBLICE	30
5.2 STANICE IMISNÍHO MONITORINGU	30
5.2.1 Typy stanic a zón imisního monitoringu.....	31
5.3 ZÁKLADNÍ METODY MĚŘENÍ KONCENTRACÍ SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC.....	32
5.3.1 Gravimetrická metoda	33
5.3.2 Optické metody	33
5.3.3 Skenovací elektronová mikroskopie	34
5.4 AKTUÁLNÍ VÝVOJ MONITORINGU	35
6 PRÁVNÍ REGULACE SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC V OVZDUŠÍ.....	37
6.1 NORMY A LIMITY PRO SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE	37

6.2	PROGRAM ZLEPŠOVÁNÍ KVALITY OVZDUŠÍ	38
6.3	EVROPSKÁ POLITIKA OCHRANY OVZDUŠÍ A DEKARBONIZACE DOPRAVY	38
7	METODY HODNOCENÍ ZDRAVOTNÍCH RIZIK.....	41
7.1	HEALTH RISK ASSESSMENT.....	41
7.2	HUMAN HEALTH RISK ASSESSMENT	42
7.3	POROVNÁNÍ HEALTH RISK ASSESSMENT A HUMAN HEALTH RISK ASSESSMENT	44
8	SHRNUTÍ TEORETICKÝCH VÝCHODISEK	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	46
9	POPIS LOKALITY A MONITOROVACÍ STANICE.....	47
10	ZÍSKÁNÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT	50
10.1	DATA Z IMISNÍ MONITOROVACÍ STANICE	50
10.2	ZÍSKÁNÍ DAT O INTENZITĚ DOPRAVY	52
10.3	ZÍSKÁNÍ DAT O METEOROLOGICKÝCH UKAZATELÍCH	55
11	ZÁVISLOST KONCENTRACÍ SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC NA VNĚJŠÍCH FAKTORECH	57
11.1.1	Vliv dopravy na suspendované částice bez časového posunu.....	58
11.1.2	Vliv dopravy na suspendované částice s časovým posunem o 3 hodiny	60
11.1.3	Vliv dopravy na suspendované částice s časovým posunem o 6 hodin	61
11.1.4	Vliv dopravy na suspendované částice s časovým posunem o 12 hodin	63
11.2	VYHODNOCENÍ Vlivu DOPRAVY A METEOROLOGICKÝCH PODMÍNEK NA KONCENTRACE SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC	64
12	MODELOVÉ PŘÍKLADY EXPOZICE A APLIKACE METODY HHRA	66
12.1	MODELOVÝ SUBJEKT Č. 1: Dospělý muž.....	66
12.2	MODELOVÝ SUBJEKT Č. 2: Dítě	70
12.3	MODELOVÝ SUBJEKT Č. 3: Žena – senior	72
12.4	ZHODNOCENÍ ZDRAVOTNÍCH DOPADŮ DLOUHODOBÉ INHALAČNÍ EXPOZICE U MODELOVÝCH SUBJEKTŮ.....	75
	DISKUZE.....	77
	ZÁVĚR.....	79
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ	87
	SEZNAM TABULEK.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	89
	SEZNAM PŘÍLOH.....	91

ÚVOD

Znečištění ovzduší je dlouhodobě považováno za jeden z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících zdraví obyvatel a kvalitu životního prostředí, zejména v hustě osídlených městských oblastech. Mezi nejzávažnější polutanty patří suspendované částice, které se ve vzduchu vyskytují jako směs pevných a kapalných složek různé velikosti a složení. Jejich schopnost pronikat hluboko do lidského dýchacího systému a interagovat s vnitřním prostředím organismu z nich činí významný zdravotní rizikový faktor. Dopady dlouhodobé expozice suspendovaným částicím zahrnují celou řadu chronických onemocnění, zejména kardiovaskulárního a respiračního charakteru, ale i předčasnou úmrtnost a sníženou kvalitu života u citlivých skupin obyvatelstva.

Zdroje suspendovaných částic jsou antropogenní i naturogenní. V městském prostředí hraje klíčovou roli silniční doprava, která je nejen zdrojem výfukových emisí, ale i nevýfukových částic. Přestože je vliv dopravy na ovzduší dlouhodobě znám, nevýfukové emise byly donedávna ve srovnání s výfukovými často opomíjeny. Výzkumný zájem o tuto oblast v posledních letech výrazně roste, zejména s ohledem na rostoucí zastoupení elektromobilů, které sice eliminují výfukové emise, ale zvyšují význam jiných částicových zdrojů.

Problematika suspendovaných částic z dopravy se dostává do popředí nejen v odborné komunitě, ale také v politických strategiích na národní i evropské úrovni. Legislativní rámec stanovuje limity pro koncentrace těchto částic, přičemž monitoring kvality ovzduší a hodnocení expozice obyvatel představují důležité nástroje pro ochranu veřejného zdraví. Přesto však zůstávají některé aspekty dopadu těchto částic nedostatečně kvantifikovány, zejména v konkrétních lokalitách a ve vazbě na specifické meteorologické a dopravní podmínky.

Tato diplomová práce se věnuje komplexnímu pohledu na problematiku suspendovaných částic ve vztahu k silniční dopravě, a to jak z hlediska teoretického ukotvení, tak prostřednictvím praktického vyhodnocení konkrétní městské lokality. Teoretická část zahrnuje vymezení základních pojmů, charakteristiku suspendovaných částic, jejich zdravotní rizika, metody monitorování a přehled legislativních opatření. Zvláštní důraz je kladen na vývoj poznání v oblasti nevýfukových emisí a jejich rostoucí význam v kontextu celkové emisní bilance dopravy.

Praktická část práce se zaměřuje na posouzení vlivu dopravy a meteorologických podmínek na koncentrace suspendovaných částic v blízkosti vytižené městské křižovatky v Brně. Za pomoci reálných dat z imisního monitoringu a dopravních průzkumů je analyzována časová souvislost mezi intenzitou dopravy a úrovní znečištění ovzduší. Následně je pomocí metody Human Health Risk Assessment provedeno vyhodnocení zdravotních rizik pro tři modelové subjekty vystavené dlouhodobé inhalační expozici. Výsledky praktické části poskytují vhled do problematiky zdravotního zatížení obyvatelstva v dopravně exponovaných lokalitách a mohou být využitelné při návrhu preventivních a regulačních opatření na místní úrovni.

CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ

V úvodní části je zpracována literární rešerše, která se věnuje zdravotním dopadům suspendovaných částic, jejich hlavním zdrojům v městském prostředí, mechanismům šíření i metodám hodnocení expozice. Součástí teoretického rámce je rovněž přehled platné legislativy a strategických dokumentů v oblasti ochrany ovzduší a veřejného zdraví.

Na teoretickou část navazuje praktická analýza, která je zaměřena na hodnocení expozice suspendovaným částicím ve vybrané městské lokalitě Brno–Židenice, konkrétně v okolí frekventované křižovatky Rokytova × Svatoplukova. Pro účely analýzy byly využity hodinové koncentrace suspendovaných částic získané z automatické imisní stanice Svatoplukova. Tato stanice měří koncentrace suspendovaných částic metodou automatické gravimetrie, přičemž odečty jsou zaznamenávány v hodinovém intervalu. Součástí výstupů monitorovací stanice jsou i základní meteorologické údaje, konkrétně teplota vzduchu, atmosférický tlak, rychlost a směr větru. Tyto parametry umožňují zohlednit vliv aktuálních povětrnostních podmínek na transport a rozptyl znečišťujících látek v městském prostředí. Intenzita silniční dopravy byla stanovena na základě záznamů z dopravní kamery umístěné v bezprostřední blízkosti sledované lokality. Videozáznam byl zpracován tak, aby bylo možné určit počet projíždějících vozidel v jednotlivých hodinových intervalech. Výsledná datová sada sloužila jako vstup pro statistické vyhodnocení, jehož cílem bylo identifikovat možné souvislosti mezi koncentracemi suspendovaných částic, dopravní zátěží a meteorologickými podmínkami.

V rámci statistického vyhodnocení byla provedena korelační analýza, která se zaměřila na zjištění síly a směru mezi sledovanými proměnnými. Pro kvantifikaci těchto vztahů byl využit Pearsonův korelační koeficient, který umožňuje určit, zda a jak silně souvisí dvě kvantitativní proměnné. Výsledky korelační matice poskytly přehled o tom, jak meteorologické podmínky a intenzita dopravy ovlivňují koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ a PM_{2,5} (QuestionPro (2024)).

Součástí práce je rovněž aplikace metody kvantitativního hodnocení zdravotních rizik (Human Health Risk Assessment) (U.S. EPA, 2023), která umožňuje stanovit inhalační dávku a posoudit míru zdravotní zátěže. Vyhodnocení probíhá na třech modelových subjektech: dítěti, dospělém muži a seniorce s ohledem na rozdílné expoziční podmínky a zdravotní citlivost. Výpočet expozice vychází z metodiky agentury US EPA a zahrnuje

základní vstupní parametry, jako je tělesná hmotnost, doba pobytu v expozici, respirační frekvence a koncentrace částic v ovzduší.

Závěrečná část práce se věnuje interpretaci získaných výsledků a zároveň formuluje návrhy opatření, která mohou přispět ke snížení identifikovaných zdravotních rizik v dopravně zatížených městských lokalitách. Návrhy reflektují jak teoretické poznatky, tak praktické možnosti implementace. Celý přístup spočívá v propojení environmentální analýzy, dostupných dat a vědecky uznávané metodiky s cílem přinést prakticky využitelné výstupy v oblasti ochrany ovzduší a zdraví obyvatel.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Z hlediska ochrany ovzduší jsou používány pojmy, které souvisejí se znečišťováním atmosféry a se vnášením škodlivých látek do ovzduší. V České republice je právní rámec vymezován Zákonem č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, v platném znění (Česká republika, 2012). Tímto zákonem jsou stanovovány povinnosti provozovatelů zdrojů znečišťování ovzduší, imisní limity a možnost obcí přijímat opatření ke zlepšení kvality ovzduší. Je jím také popisována smogová situace a uváděny sankce za nedodržování povinností provozovatele zdrojů.

Znečišťující látkou je označována každá chemická látka nebo směs, která může vyvolávat negativní dopady na lidské zdraví a na ekosystémy (Sicard et al., 2021). Do této skupiny jsou řazeny suspendované částice (PM_{10} , $PM_{2,5}$), oxidy dusíku (NO_x), oxid siřičitý (SO_2), oxid uhelnatý (CO), přízemní ozon (O_3), těžké kovy a polyaromatické uhlovodíky (Skácel a Tekáč, 2019). Vliv těchto znečišťujících látek na zdraví bývá zvyrazňován zejména ve městech s intenzivní dopravou (WHO, 2021).

Ochrana ovzduší představuje soubor opatření, která mají zabránit nebezpečné míře znečištění a omezit vypouštění emisí (Česká republika, 2012). Podle WHO (2021) patří znečištění ovzduší mezi klíčové environmentální faktory ovlivňující lidské zdraví.

Emisemi se rozumí vypouštění konkrétních škodlivin do atmosféry (Česká republika, 2012). Mezi hlavní zdroje patří průmyslové provozy, lokální topeniště a také silniční doprava, při níž je uvolňován prach pocházející z brzd, pneumatik a povrchu vozovky (Zapletal et al., 2021).

Emisní limit vymezuje nejvyšší přípustný objem či koncentraci škodliviny, kterou zdroj smí do ovzduší vypouštět. Limity se člení se podle typu a velikosti zdroje a dělí se na obecné a specifické (Česká republika, 2012).

Imise jsou koncentrace znečišťujících látek nebo jejich depozic, měřené v cílovém prostoru (např. v obytné zástavbě). Pokud dopadají přímo na zemský povrch, označují se jako depozit (Skácel a Tekáč, 2019). Imisní limit pak stanovuje nejvyšší přípustnou úroveň znečištění ovzduší v dané lokalitě, aby se omezilo riziko dopadu na lidské zdraví i životní prostředí (WHO, 2021).

2 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE

Suspendované částice (Particulate Matter) jsou v odborné literatuře popisovány jako heterogenní směs pevných a kapalných částic, které se vznášejí v atmosféře (Skácel a Tekáč, 2019). Jejich chemické složení zahrnuje anorganické soli (např. sírany, dusičnany), organické uhlíkaté sloučeniny (PAH), kovy a biologický materiál (bakterie, spory hub). Jejich fyzikální vlastnosti (velikost, tvar) se liší podle zdroje a procesu vzniku (Irakunda a Török, 2025). Prachová částice se podle zákona o ochraně ovzduší dělí na základě velikosti, tedy podle aerodynamického průměru. Velikost částice je uvedena jako dolní index za zkratkou. Pro účely vyhodnocování se velikost částic označuje jako PM_{10} ($\leq 10 \mu m$), $PM_{2,5}$ ($\leq 2,5 \mu m$) a PM_1 ($\leq 1 \mu m$) (Jeong et al., 2023). Menší frakce vykazují schopnost pronikat do hlubších částí dýchacího systému a jsou proto sledovány z hlediska potenciálního dopadu na zdraví a ekosystémy (WHO, 2021).

Suspendované částice (PM) jsou do ovzduší uvolňovány buď přímo (primární emise) z konkrétního zdroje, nebo se nepřímo (sekundárně) vytvářejí atmosférickými reakcemi plyných prekurzorů, jako jsou oxidy síry, dusíku a těkavé organické látky (Sicard et al., 2021). Primární částice pocházejí z emisních procesů, například spalování fosilních paliv, výfukových plynů či mechanického otěru povrchu vozovky (Zapletal et al., 2021). Většina primárních částic se může následně přeměňovat v sekundární částice, které vznikají fyzikálně-chemickými procesy v ovzduší, což zahrnuje například oxidaci a kondenzaci prekurzorů (Sicard et al., 2021; Jeong et al., 2023). Významná část PM je opakovaně uvolňována z povrchu země, tzv. resuspenzí prachu (Skácel a Tekáč, 2019).

2.1 Zdroje suspendovaných částic

Částice se do ovzduší dostávají z antropogenních a přírodních zdrojů.

Hlavní **antropogenní zdroje** suspendovaných částic zahrnuje doprava, tedy spalování motorových paliv a mechanickými otěry, k nimž dochází při kontaktu vozidla s vozovkou, opotřebení pneumatik, brzdových destiček nebo v důsledku eroze silničního povrchu (Zapletal et al., 2021). Podobné procesy se uplatňují také při drcení a mletí materiálu ve stavebnictví, těžbě a výrobě cementu či cihel (Skácel a Tekáč, 2019). Lokální vytápění objektů pomocí stacionárních zdrojů spalujících pevná paliva, uvolňuje hrubší částice spolu s benzo(a)pyrenem. Dalším významným zdrojem je resuspenze prachu, kdy se prach z povrchu vozovek a chodníků znovu víří ve frekventovaných dopravních úsecích (Jeong et al., 2023).

Mezi **naturogenní zdroje** prachových částic se řadí pyl, prachové bouře, sopečná činnost, případně aerosoly z mořské soli (Irakunda a Török, 2025). Přestože se jedná o přirozený jev, dochází při jeho výskytu lokálnímu zvýšení koncentrací PM_{10} a jemnějších frakcí (Jeong et al., 2023).

2.2 Prachové částice PM_{10}

Prachové částice PM_{10} , jejichž aerodynamický průměr je $\leq 10 \mu m$, jsou v odborné literatuře označovány jako hrubší frakce suspendovaného prachu (Skácel a Tekáč, 2019). Jedná se o největší velikostní kategorii sledovanou měřicími stanicemi, přestože ani takto velké částice obvykle nejsou v ovzduší viditelné pouhým okem (European Environment Agency, 2022). Velikost této částice je několikanásobně menší než lidský vlas (Irakunda a Török, 2025).

PM_{10} se vyznačují nepravidelným tvarem a často vyšší hmotností než jemné částice ($PM_{2,5}$ nebo PM_1), což vede k jejich kratší době setrvání v ovzduší. Chemické složení může zahrnovat minerální látky, křemičitany, kovové částice či organické sloučeniny (European Environment Agency, 2022). Některé z nich (např. těžké kovy) mohou vykazovat toxické vlastnosti a přispívat k dalšímu environmentálnímu zatížení.

Vzhledem k hrubší velikosti se PM_{10} snáze usazují na povrchy (vozovky, vegetaci), odkud se mohou opět resuspendovat vlivem pohybu vozidel či silnějšího větru (Jeong et al., 2023). I když v průměru nedosahují tak hlubokého průniku do dýchacích cest jako jemnější $PM_{2,5}$, mohou se ukládat v horních cestách dýchacích, v nose a krku, a působit dráždivě (WHO, 2021). Z legislativního pohledu je v České republice u PM_{10} sledována krátkodobá i dlouhodobá koncentrace, ovšem podrobnosti o limitních hodnotách a počtech překročení jsou upravovány zákonem o ochraně ovzduší a dalšími prováděcími předpisy (Česká republika, 2012).

2.3 Prachové částice $PM_{2,5}$

Částice $PM_{2,5}$ jsou v odborné literatuře označovány jako jemnější frakce suspendovaných částic. Díky menším rozměrům a nižší hmotnosti zůstávají v ovzduší déle než hrubší částice (Skácel a Tekáč, 2019).

Jemné částice $PM_{2,5}$ jsou zpravidla kulovitější či méně nepravidelné než PM_{10} a mají větší specifický povrch, což usnadňuje adsorpci toxických látek (WHO, 2021). Chemicky se skládají z anorganických solí (sírany, dusičnany), elementárního uhlíku (sazí) a organických

sloučenin včetně polycyklických aromatických uhlovodíků či těžkých kovů (Irakunda a Török, 2025).

Díky jemnému průměru dokážou částice $PM_{2,5}$ pronikat hlouběji do dýchacích cest, a proto jsou považovány za zdravotně rizikovější (Jeong et al., 2023). Dokážou dosáhnout dolních cest dýchacích, včetně plicních sklípků, a mohou se podílet na vzniku respiračních, kardiovaskulárních či dalších civilizačních onemocnění (WHO, 2021). Jejich dlouhá doba setrvání v atmosféře současně umožňuje šíření na větší vzdálenosti a ovlivňuje regionální až celostátní kvalitu ovzduší (Sicard et al., 2021).

2.4 Prachové částice PM_1

Nejmenší frakcí prachových částic bývají označovány PM_1 ($\leq 1 \mu m$), které jsou často submikronové a vyskytují se v menším poměru než jemnější kategorie (Irakunda a Török, 2025). Uvolňují se zejména při vysokoteplotních procesech (např. hoření, svařování, tavení kovů) a při chemických přeměnách těkavých organických látek v atmosféře (WHO, 2021). V dopravě se tyto drobné částice uvolňují z výfukových plynů motorových vozidel a v průmyslu se mohou tvořit např. při zpracování nebo spalování nerostných surovin.

3 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE Z DOPRAVY

Doprava představuje jeden z nejvýznamnějších antropogenních zdrojů suspendovaných částic v městském prostředí. Vedle výfukových emisí spalovacích motorů přispívají k celkové zátěži ovzduší také nevýfukové procesy, jako je mechanické opotřebení brzd, pneumatik a vozovky, stejně jako resuspenze prachu z komunikací. Tyto částice se liší svým chemickým složením, velikostí i dopadem na zdraví, přičemž zvláště nebezpečné jsou jemné frakce $PM_{2,5}$ a ultrajemné částice, které snadno pronikají hluboko do dýchacího systému.

3.1 Výfukové emise

Výfukové emise vznikají při spalování fosilních paliv, nejvíce u dieselových vozidel bez filtrů pevných částic. Tyto motory produkují vysoké množství jemných částic $PM_{2,5}$ a PM_{10} , zatímco benzinové motory díky efektivnějším spalovacím procesům a filtraci generují nižší množství pevných částic (Fussell et al., 2022; Andre et al., 2020). Moderní vozidla vybavená technologiemi SCR a DPF výrazně snižují výfukových emisí, ale i nadále produkují oxidy dusíku. Alternativní pohony, jako jsou hybridy nebo CNG, vykazují snížené výfukové emise, nicméně stále podléhají procesům mechanického opotřebení. Elektromobily sice výfukové emise eliminují úplně, ale jejich vyšší hmotnost vede ke zvýšenému zatížení brzdových a pneumatických systémů, čímž se zvyšuje podíl nevýfukových emisí (European Environment Agency, 2022; Kumar et al., 2019). Významným zdrojem částic jsou rovněž těžká nákladní vozidla a autobusy, které způsobují zvýšenou míru resuspenze prachu a otěr silničního povrchu. Fang et al. (2023) uvádí, že u nákladních vozidel tvoří nevýfukové emise více než 60 % všech částicových emisí, přičemž dominantními složkami jsou otěry pneumatik a resuspenze prachu.

3.2 Mechanické otěry

Nevýfukové emise vznikají zejména mechanickým otěrem brzd, pneumatik a vozovky. Při brzdění dochází k uvolňování částic z brzdových destiček, které obsahují těžké kovy, jako je měď, železo a antimon, a přispívají k emisím PM_{10} a $PM_{2,5}$ (Fussell et al., 2022). Pneumatiky se opotřebovávají při kontaktu s vozovkou a uvolňují mikročástice gumy, sazí a polymerů, které se šíří vzduchem nebo splachují do kanalizací, kde dále zatěžují vodní prostředí (Sicard et al., 2021). Zvláštní skupinu představují tzv. TRWP (tire and road wear particles), tedy částice vznikající kombinací otěru pneumatik a silnice. Tyto komplexní částice obsahují abrazivní materiály, prach, zbytky plyných znečišťujících látek a další

příměsí. Jejich zdravotní dopady zatím nejsou dostatečně prozkoumány, ale in vitro studie ukazují, že TRWP mohou vyvolat zánětlivou odpověď alveolárních makrofágů, projevující se zvýšenou produkcí prozánětlivého cytokinu TNF- α , a to i při absenci cytotoxicity nebo oxidačního stresu. Vyšší zánětlivá aktivita byla pozorována právě u TRWP oproti samotným fragmentům pneumatik, což poukazuje na význam složení běhounu při formování toxicity těchto částic (Bouredji et al., 2024).

Uvolněné mikročástice z pneumatik jsou rovněž považovány za jeden z nejvýznamnějších zdrojů mikroplastů. Díky své malé velikosti a chemickému složení přetrvávají v prostředí dlouhodobě a mohou působit jako nosiče toxických látek, jako jsou změkčovadla, těžké kovy či jiné aditivní látky. Vstupují do organismu vdechováním, nebo kontaminací vody a potravy. V reakci na tento problém jsou navrhována různá opatření: vývoje odolnějších pneumatik, úpravu jízdního stylu a techniky zachycování částic ve vodním nebo městském prostředí (Luo et al., 2021).

3.3 Resuspenzace prachu

Resuspenze je proces, při kterém jsou usazené částice na povrchu vozovky znovu vířeny do ovzduší vlivem projíždějících vozidel. Tento jev je nejvýraznější v městském prostředí s vysokou hustotou dopravy, kde dochází ke stálému víření prachu, a přispívá zejména k frakci PM₁₀ (Jeong et al., 2023). Na nezpevněných nebo poškozených vozovkách může být míra resuspenze výrazně vyšší. Povrchová úprava vozovek, jako jsou hutněné nebo vysoce odolné materiály, může významně omezit resuspenzi částic a tím snížit zátěž ovzduší (Casotti Rienda a Alves, 2021; Sicard et al., 2021).

3.4 Vliv dopravní infrastruktury a provozu

Typ dopravní infrastruktury a režim dopravy mají zásadní vliv na emise suspendovaných částic. V městských oblastech s častým zastavováním a rozjížděním dochází k vyšším emisím brzdového prachu i k intenzivnější resuspenzi. Přítomnost dieselových vozidel v městské dopravě zvyšuje podíl výfukových částic PM (Fussell et al., 2022). Problémovými lokalitami jsou tunely a podjezdy, kde se z důvodu omezené ventilace částice akumulují (Sicard et al., 2021). Naopak plynulý provoz na dálnici snižuje výfukové emise díky optimálnímu spalovacímu režimu, ale vyšší rychlosti zároveň zvyšují mechanické emise vlivem intenzivnějšího tření brzd a pneumatik. V méně urbanizovaných oblastech dominují přírodní a silniční prachové částice, obzvláště na nezpevněných komunikacích. Efektivní

údržba silničních povrchů a omezení prašných cest může snížit emise PM v příměstských oblastech.

3.5 Vliv meteorologických podmínek na suspendované částice z dopravy

Meteorologické podmínky hrají zásadní roli v koncentracích suspendovaných částic (PM_{10} a $PM_{2,5}$) v ovzduší, zejména v městských oblastech, kde doprava tvoří dominantní zdroj těchto znečišťujících látek. Mezi nejvýznamnější meteorologické faktory ovlivňující množství PM patří rychlost větru, výskyt teplotní inverze, množství a četnost srážek a relativní vlhkost vzduchu. Tyto prvky určují míru rozptylových podmínek, schopnost atmosféry ředit znečištění a také ovlivňují resuspenzi již usazených částic z povrchu komunikací.

Rychlost větru ovlivňuje schopnost atmosféry ředit a rozptylovat znečišťující látky. Vyšší rychlosti větru podporují horizontální i vertikální transport částic, čímž snižují jejich koncentraci v blízkosti zdrojů emisí. Podle Irankundy a Töröka (2025) dochází při průměrné rychlosti větru nad 3 m/s k významnému poklesu koncentrací $PM_{2,5}$ ve městech s hustou dopravní infrastrukturou. Tento závěr podporuje i ČHMÚ (2023), který zaznamenal snížení koncentrací suspendovaných částic o 20–40 % během období s dobrými rozptylovými podmínkami.

Teplotní inverze, kdy teplota vzduchu s výškou stoupá namísto běžného poklesu, vytváří stabilní vzduchové vrstvy bránící vertikálnímu proudění. Tím dochází k akumulaci znečištění, včetně částic PM, v přízemní vrstvě atmosféry. Tento jev je častý v zimních měsících, kdy vede k tzv. smogovým situacím. Fang et al. (2023) poukazuje na to, že během zimních inverzí došlo v přístavních městech k nárůstu koncentrací $PM_{2,5}$ až o 60 %, a to zejména v důsledku emisí z dopravy. V českých podmínkách jsou inverze typické pro zimní období a často způsobují překročení koncentrací PM_{10} imisního limitu (ČHMÚ, 2023).

Srážky, zejména déšť a sníh, přispívají ke snižování koncentrací suspendovaných částic prostřednictvím mokré depozice. Intenzivní a dlouhotrvající srážky účinně odstraňují suspendované částice z atmosféry. Li et al. (2019) uvádějí, že během deštivých epizod došlo ke snížení $PM_{2,5}$ až o 40 %. Podobně v únoru 2024 vedly nadprůměrné srážky ke znatelnému poklesu PM_{10} a $PM_{2,5}$ v České republice (Laco et al., 2024).

Vlhkost vzduchu ovlivňuje resuspenzi prachu, která je důležitou složkou nevýfukových emisí z dopravy. Vyšší relativní vlhkost (>70 %) výrazně potlačuje víření

částic z povrchu vozovek, zatímco suché a větrné podmínky tento proces podporují (Casotti Rienda a Alves, 2021). Zimní období je navíc spojeno s vyššími emisemi způsobenými posypovými materiály a zvýšeným provozem studených motorů (Fussell et al., 2022). Grange et al. (2021) zdůrazňují, že za suchých podmínek dominují v ovzduší nevýfukové částice z brzd, pneumatik a resuspenze prachu, neboť vlhkost není schopna zabránit jejich víření.

4 ZDRAVOTNÍ RIZIKA SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC

Znečištění ovzduší představuje závažný enviromentální problém současnosti s významnými dopady na lidské zdraví. Mezi nejnebezpečnější znečišťující látky se řadí suspendované částice (PM), ozón (O_3), oxidy dusíku (NO_x), oxid siřičitý (SO_2), těkavé organické sloučeniny (VOC), dioxiny, polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), oxid uhelnatý (CO) a těžké kovy jako olovo (Manisalidis, et al., 2020). Suspendované částice představují závažné zdravotní riziko, přičemž jejich účinky na lidský organismus závisí na velikosti částic, délce expozice a individuální citlivosti jedince (WHO, 2021). Největší riziko spočívá v dlouhodobé expozici prachovým částicím, které pronikají hluboko do plic, přecházejí do krevního oběhu a vyvolávají systémové záněty, oxidační stres nebo metabolickou dysfunkci (Manisalidis, et al., 2020). Znečištěné ovzduší se podílí na vzniku a zhoršení respiračních a kardiovaskulárních onemocnění, přičemž nejvíce ohroženými skupinami jsou děti, senioři a osoby s chronickými onemocněními. Vzhledem k významnému podílu dopravy na emisích PM je nezbytné přijímat opatření ke snížení expozice zejména v městských oblastech a průmyslových regionech, kde dochází k nejvyššímu zatížení ovzduší suspendovanými částicemi.

4.1 Zdravotní rizika způsobená vytavením suspendovaných částic

Z hlediska zdravotních dopadů je zásadním faktorem velikost částic, jelikož menší frakce snadněji pronikají hluboko do dýchacích cest a dále do krevního oběhu (WHO, 2021). Částice PM_{10} jsou z velké části zachytávány v horních cestách dýchacích a způsobují podráždění sliznic, kašel a alergické reakce. Jemnější částice $PM_{2,5}$ pronikají do plicních sklípků, kde vyvolávají chronické záněty, astma a jiné respirační choroby. Nejmenší frakce suspendovaných částic mají schopnost přestoupit až do krevního řečiště a vyvolat zánětlivé reakce, které mohou přispět k rozvoji dalších závažných onemocnění (Manisalidis, et al., 2020).

Kardiovaskulární onemocnění představují nejvýznamnější zdravotní riziko spojené se znečištěním ovzduší, protože suspendované částice vyvolávají zánětlivé procesy, které mohou poškodit cévní výstelku, narušit krevní oběh a zvyšovat krevní tlak. Tato kombinace vede ke zvýšenému riziku ischemické choroby srdeční (ICHS), infarktu myokardu či srdečního selhání. V roce 2016 bylo znečištění ovzduší spojeno s více než 3 miliony předčasných úmrtí na kardiovaskulární choroby, což odpovídá přibližně 19 % všech úmrtí

v této kategorii. Tento vliv je srovnatelný s tradičními rizikovými faktory, jako je kouření, hypertenze nebo obezita (Hadley et al., 2018).

Rakovina plic je další závažné onemocnění úzce související s expozicí jemným prachovým částicím a karcinogenním látkám, zejména polycyklickým aromatickým uhlovodíkům. Tyto látky pronikají hluboko do plicní tkáně, kde mohou poškozovat DNA a vyvolat vznik nádorových buněk. Znečištění ovzduší je každoročně spojeno s přibližně 500 000 úmrtími na rakovinu plic (Schraufnagel, et al., 2019).

Cévní mozkové příhody jsou rovněž častým důsledkem vystavení znečištěnému ovzduší. Jemné částice mohou způsobit zvýšený krevní tlak a poškození cév, což následně zvyšuje riziko jak ischemické, tak hemoragické mrtvice. Zánětlivé procesy a oxidační stres jsou hlavními mechanismy tohoto poškození. Odhaduje se, že až 21 % všech úmrtí na cévní mozkovou příhodu souvisí s expozicí suspendovaným částicím (Schraufnagel, et al., 2019).

Diabetes mellitus 2. typu (T2D) patří mezi metabolická onemocnění, u nichž bylo prokázáno spojení s dlouhodobou expozicí částicím PM_{2,5} a PM₁₀. Yang et al. (2019) uvádí, že dlouhodobá expozice PM_{2,5} vede k vyšší pravděpodobnosti jak incidence, tak prevalence tohoto onemocnění. Bylo zjištěno, že každé zvýšení koncentrace PM_{2,5} o 10 µg/m³ zvyšuje riziko vzniku T2D o 10 % a výskyt diabetu v populaci o 8 %. Podobně i PM₁₀ vykazuje signifikantní souvislost, že každé zvýšení koncentrace zvyšuje riziko vzniku T2D o 11 %. Tento efekt se připisuje schopnosti jemných částic pronikat hluboko do plicních sklípků, vyvolávat systémový zánět, oxidační stres a narušovat metabolickou rovnováhu, zejména glukózovou homeostázu. Expozice prachovým částicím byla navíc spojena s poruchami regulace hladiny krevního cukru, inzulinovou rezistencí a celkovou metabolickou dysfunkcí. Pacienti s již diagnostikovaným diabetem mohou být na účinky prachových částic obzvlášť citliví, což z nich činí zvlášť ohroženou skupinu.

4.2 Nejnáchylnější skupiny obyvatel

Znečištění ovzduší, zejména jemnými suspendovanými částicemi PM_{2,5} a PM₁₀, představuje vážné riziko pro lidské zdraví. Dopady těchto částic jsou ovlivněny nejen jejich koncentrací ve vzduchu, ale také délkou expozice a individuální citlivostí člověka. Nejvíce ohrožené jsou tzv. citlivé skupiny obyvatel, kam se řadí především děti, senioři, těhotné ženy a osoby s chronickými nemocemi, jako jsou astma, chronická obstrukční plicní nemoc (CHOPN), kardiovaskulární choroby či diabetes (Schraufnagel, et al., 2019).

4.2.1 Děti

Tato skupina je jedna z nejzranitelnějších. Jejich dýchání je rychlejší než u dospělých a tráví více času venku, často v blízkosti zdrojů znečištění, jako jsou silnice s intenzivní dopravou, čímž se jejich expozice nebezpečným látkám výrazně zvyšuje. Garcia et al., (2019) se podrobně věnuje dopadům znečištění ovzduší na funkci plic u dětské populace. Děti představují obzvláště citlivou skupinu z hlediska zdravotních rizik vyplývajících z expozice jemným suspendovaným částicím (PM_{2,5}), oxidu dusičitému (NO₂) a ozonu (O₃). Jejich dýchací systém je ve vývoji, což zvyšuje náchylnost vůči poškození tkání a omezenému růstu plic. Výsledky výzkumu ukazují, že dlouhodobá expozice znečištěnému ovzduší může vést k trvalému snížení plicních funkcí a zvýšenému riziku chronických respiračních onemocnění v dospělosti. Zhoršená funkce plic byla pozorována i u dětí žijících v oblastech s relativně nízkými koncentracemi znečišťujících látek, což potvrzuje, že i nižší, avšak dlouhodobá expozice představuje zdravotní riziko. Studie proto zdůrazňuje potřebu ochrany dětí před negativními účinky znečištěného ovzduší prostřednictvím efektivních regulačních opatření, například omezení dopravy v blízkosti škol, podpory zelené infrastruktury a snižování emisí z průmyslu i dopravy. Dále je doporučeno pokračovat ve výzkumu zaměřeném na účinné strategie prevence a adaptace citlivých skupin obyvatelstva.

4.2.2 Těhotné ženy

Vystavení znečištěnému ovzduší je spojeno s významnými riziky pro matku i vyvíjející se plod. Studie Schraufnagel, et al. (2019) ukazuje, že vystavení zvýšené expozice ozónu (O₃) a PM_{2,5} má v období pěti hodin před porodem zvýšené riziko preeklampsie, což je stav charakterizovaný vysokým krevním tlakem, který vede k předčasněmu prasknutí plodových obalů, což může předcházet předčasnému porodu. Předčasný porod a nízká porodní hmotnost jsou spojeny s dlouhodobými zdravotními problémy, včetně sníženého růstu plic a kognitivních poruch, které mohou přetrvávat po celý život.

4.2.3 Senioři

Tyto osoby jsou k účinkům znečištění ovzduší náchylnější kvůli oslabenému imunitnímu systému a častějším výskytům chronických onemocnění. Expozice PM_{2,5} u starších osob zvyšuje riziko hospitalizace pro srdeční selhání a vede k vyšší úmrtnosti na infarkt myokardu. Kombinace vyššího věku, oslabené imunity a přítomnosti dalších onemocnění významně zvyšuje zranitelnost této skupiny vůči negativním účinkům znečištění (Manisalidis, et al., 2020).

4.2.4 Osoby trpící chronickými nemocemi

Mezi chronické onemocnění se řadí: kardiovaskulární, respirační poruchy a diabetes. Studie Manisalidis, et al., (2020) uvádí, že dlouhodobá expozice $PM_{2,5}$ a dalších znečišťujících látek může u těchto pacientů zhoršit jejich zdravotní stav, významně zvýšit pravděpodobnost hospitalizací a vést k předčasnému úmrtí. U pacientů s ischemickou chorobou srdeční a dalšími srdečními poruchami dochází často k destabilizaci zdravotního stavu, která se projevuje například zvýšením krevního tlaku, rizikem infarktu myokardu nebo vzniku arytmií. U pacientů s chronickou obstrukční plicní nemocí (CHOPN) může dlouhodobá expozice způsobit vznik a progresy onemocnění. Suspendované částice pronikají hluboko do plicních sklípků, kde vyvolávají zánětlivé reakce a oxidační stres, což vede k poškození plicní tkáně a postupnému zhoršování plicních funkcí. Studie odhadují, že znečištění ovzduší přispívá k přibližně 1,6 milionu úmrtí na CHOPN ročně (Schraufnagel, et al., 2019).

4.3 Dopady na veřejné zdraví v kontextu dopravy

Znečištění ovzduší z dopravy je významným problémem veřejného zdraví, který se nejvíce projevuje v hustě obydlených městských oblastech. Vlivem dopravní infrastruktury a intenzivního provozu zde dochází k hromadění suspendovaných částic (PM), jejichž koncentrace jsou výrazně vyšší v bezprostřední blízkosti hlavních komunikací. Epidemiologické studie potvrzují, že lidé žijící v okolí těchto dopravních tepen mají zvýšenou pravděpodobnost výskytu respiračních a kardiovaskulárních onemocnění (European Environment Agency, 2022). Vědecké poznatky rovněž ukazují, že snížení koncentrací těchto částic v městském prostředí vede ke znatelnému poklesu hospitalizací a úmrtí v důsledku nemocí spojených se znečištěním ovzduší (WHO, 2021).

Vedle tradičně sledovaných výfukových emisí je stále častěji upozorňováno na význam tzv. nevýfukových emisí, které vznikají mechanickým opotřebením součástí vozidel a vířením prachu z povrchu komunikací. Studie realizovaná v přístavní oblasti Qingdao zjistila, že tyto nevýfukové částice přispívají k téměř polovině celkových koncentrací $PM_{2,5}$ v ovzduší, přičemž v některých oblastech dosahovaly až 49,9 %, což je srovnatelné s výfukovými emisemi (Fang et al., 2023). Tyto výsledky potvrzují, že zaměřit se pouze na snižování emisí ze spalovacích motorů nestačí. Významnou roli totiž hrají i emise vznikající např. opotřebením brzdových destiček, pneumatik nebo opakovanou resuspencí prachu z vozovky.

Rostoucí zájem o tuto problematiku potvrzuje i studie Fussella et al. (2022), která poukazuje na škodlivé účinky nehybridních částic na lidské zdraví. Tyto částice byly spojeny se zvýšeným výskytem kardiovaskulárních onemocnění, sníženou funkcí plic, zánětlivými a oxidačními procesy v dýchacím systému a také s vývojovými poruchami u dětí a novorozenců. Riziko expozice těmito látkám je nejvyšší v blízkosti silnic, kde jejich koncentrace výrazně převyšuje hodnoty naměřené v městském pozadí. Obsažené kovy, jako měď, zinek nebo železo, navíc mohou katalyzovat tvorbu reaktivních kyslíkových forem, které poškozují buněčné struktury a urychlují degenerativní procesy. I přes tato prokázaná rizika zůstávají nehybridní částice mimo rámec stávajících emisních norem, což představuje vážný nedostatek v současné environmentální politice.

Zlepšení kvality ovzduší vyžaduje komplexní přístup zahrnující nejen omezení provozu vozidel se spalovacími motory, ale i řešení problému nevýfukových emisí. Mezi efektivní opatření patří zavádění nízkoemisních zón, podpora elektromobility, zlepšení čistoty komunikací a vývoj materiálů s nižší mírou otěru. Evropská komise (2024) poukazuje na to, že právě kombinace těchto nástrojů může vést k výraznému zlepšení zdravotní situace v městském prostředí a ke snížení zátěže veřejného zdravotnictví.

5 MONITOROVÁNÍ SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC V OVZDUŠÍ

Monitorování suspendovaných částic je zásadní součástí řízení kvality ovzduší a ochrany veřejného zdraví. Jeho význam spočívá především v identifikaci úrovně znečištění v konkrétních lokalitách, sledování trendů v čase a podpoře tvorby účinných regulačních opatření na lokální, národní i mezinárodní úrovni. Systémové měření PM umožňuje kvantifikaci expozice obyvatel, vyhodnocení dopadů jednotlivých emisních zdrojů i stanovení priorit pro environmentální politiku.

Suspendované částice jsou monitorovány nejen kvůli jejich přímému vlivu na zdraví obyvatelstva, ale také kvůli jejich vlivu na životní prostředí. Mimo jiné přispívají ke znečištění vodních toků, okyselování půdy nebo snižování viditelnosti v atmosféře. Jejich fyzikálně-chemické vlastnosti se mění v závislosti na původu, velikosti, meteorologických podmínkách a geografickém kontextu (WHO, 2021; European Environment Agency, 2022).

Evropské země mají vysoce standardizované a legislativně ukotvené monitorovací systémy. Nařízení vycházejí ze směrnice 2008/50/ES a jsou průběžně revidovány podle nových vědeckých poznatků (EUR-Lex, 2008; European Commission, 2024). Většina států provozuje rozsáhlé sítě automatických a manuálních měřicích stanic, jejichž výsledky jsou validovány a centrálně reportovány prostřednictvím systémů jako EEA Air Quality e – Reporting (European Environment Agency, 2022). Monitorování v Evropě je často propojeno s meteorologickými modely, zdravotními databázemi a městským plánováním. Významná je také otevřenost dat vůči veřejnosti.

V mnoha asijských zemích, zejména v hustě osídlených a rychle industrializujících oblastech, je monitoring PM reakcí na vážné problémy se znečištěním ovzduší. Sítě stanic jsou ve velkých městech (např. Peking, Dillí, Dháka) rozsáhlé, ale často se zaměřují především na městská centra a méně pokrývají venkovské oblasti. Data nebývají vždy veřejně dostupná, a v některých případech není zajištěna jejich úplná metodická srovnatelnost (Li et al., 2019; Irankunda a Török, 2025). V Asii hraje klíčovou roli propojení monitoringu s emisními a rozptylovými modely, např. pro předpovědi smogových epizod nebo regulaci dopravy během inverzí.

Zatímco v Evropě je monitoring pevně zakotven v legislativě a zaměřuje se na dlouhodobé trendy a veřejný reporting, v některých asijských státech se důraz klade spíše na reaktivní kontrolu akutních imisních epizod. Evropa také častěji uplatňuje harmonizované referenční metody, zatímco v Asii jsou vedle klasických stanic čím dál častěji používány

nízkonákladové senzory nebo satelitní data, která však mají omezenou přesnost (WHO, 2021; European Commission, 2021; Irankunda a Török, 2025).

5.1 Monitoring kvality ovzduší v České republice

Monitorování kvality ovzduší v České republice je nezbytným nástrojem pro hodnocení imisní zátěže, sledování koncentrací znečišťujících látek v atmosféře a vyhodnocování jejich vlivu na lidské zdraví a životní prostředí. Suspendované částice (PM) patří mezi nejvýznamnější složky znečištění ovzduší, a proto je jejich kontinuální sledování klíčové pro ochranu veřejného zdraví a plnění legislativních požadavků (Česká republika, 2012; WHO, 2021).

Monitorování koncentrací suspendovaných částic v ovzduší v České republice probíhá v rámci Státní sítě imisního monitoringu (SSIM), kterou spravuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Ten odpovídá za odbornou správu systému, sběr, validaci, zpracování a zveřejňování dat. Kromě něj provozují měřicí stanice i další subjekty, jako jsou krajské úřady, města, univerzity, výzkumné instituce či průmyslové podniky, často v návaznosti na povinnosti vyplývající z legislativy (např. z integrovaného povolení nebo jako součást EIA/SEA procesů). Informace o provozovatelích měřicích stanic v České republice lze nalézt na webových stránkách ČHMÚ, který poskytuje přehled o různých subjektech zapojených do monitorování kvality ovzduší. Městské a průmyslové měřicí stanice doplňují data o lokálních podmínkách znečištění, čímž rozšiřují možnosti detailního sledování kvality ovzduší a poskytují informace důležité pro regionální environmentální politiku (European Environment Agency, 2022).

Vývoj moderních monitorovacích metod a integrace automatizovaných systémů umožňuje rychlejší a přesnější hodnocení imisní zátěže. Data získaná z monitorovacích stanic jsou využívána pro legislativní účely, vědecké výzkumy, informování veřejnosti a tvorbu opatření ke zlepšení kvality ovzduší (Česká republika, 2012; WHO, 2021). S rostoucím důrazem na snižování emisí a zpřísňování legislativy v rámci Evropské unie lze očekávat další rozvoj monitorovací infrastruktury a zpřesnění metod vyhodnocování kvality ovzduší (European Commission, 2024).

5.2 Stanice imisního monitoringu

Monitorovací stanice jsou součástí Státní sítě imisního monitoringu (SSIM), kterou spravuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Tato síť zahrnuje automatické, manuální

a mobilní měřicí stanice, které poskytují data pro hodnocení kvality ovzduší a pomáhají navrhovat opatření ke snížení expozice obyvatel znečištěním. Každý typ stanice má specifické využití a přináší odlišné výhody v rámci sledování kvality ovzduší a hodnocení imisní zátěže. Výsledky monitorování jsou využívány nejen pro stanovení trendů v dlouhodobém znečištění, ale také pro hodnocení vlivu dopravy, průmyslových provozů a efektivity zavedených emisních limitů (ČHMÚ, 2023).

Automatické stanice je objekt v podobě kontejneru, který je vybaven počítačem, senzory pro měření meteorologických podmínek a moderními analyzátory, které kontinuálně měří koncentrace znečišťujících látek (např. NO₂, NO, SO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, CO). Naměřená data jsou v reálném čase odesílána do centrální databáze ČHMÚ, kde procházejí validací a následně jsou zveřejňována na online portálech (ČHMÚ, 2023). Výhodou těchto stanic je okamžitá dostupnost dat, což umožňuje rychlou reakci při překročení imisních limitů. Nevýhodou je však vyšší finanční a technologická náročnost provozu těchto zařízení (European Environment Agency, 2022).

Manuální stanice jsou vzorkovače, které využívají gravimetrickou metodu, která patří mezi referenční techniky pro měření koncentrací suspendovaných částic, polycyklických aromatických uhlovodíků a těžkých kovů. Vzorky jsou odebírány pomocí filtrů, přes které je proháněn definovaný objem vzduchu. Nasbírané částice jsou následně analyzovány v laboratoři, což umožňuje nejen stanovení hmotnostní koncentrace PM, ale také určení jejich chemického složení (WHO, 2021). Hlavní výhodou manuálních stanic je vysoká přesnost měření, nicméně jejich nevýhodou je časová prodleva, neboť laboratorní analýza trvá několik dní (Skácel a Tekáč, 2019).

Mobilní stanice, často označované jako měřicí vozy, slouží ke krátkodobému monitoringu kvality ovzduší v oblastech, kde nejsou k dispozici stacionární měřicí stanice, nebo se používají pro specifické výzkumné účely (European Environment Agency, 2022). Jsou vybaveny automatickými analyzátory, které umožňují okamžité měření znečišťujících látek. Mobilní stanice se často nasazují v lokalitách se zvýšenou imisní zátěží, například v blízkosti průmyslových provozů, dopravních tepen nebo během mimořádných událostí, jako jsou požáry či výrazné epizody smogu (Zapletal et al., 2021).

5.2.1 Typy stanic a zón imisního monitoringu

Kromě rozdělení podle metody měření se měřicí stanice klasifikují i podle umístění a specifických podmínek monitoringu. Tento systém kategorizace umožňuje efektivní

interpretaci naměřených dat a hodnocení vlivu jednotlivých zdrojů znečištění na kvalitu ovzduší (ČHMÚ, 2023).

Dopravní stanice se nacházejí v blízkosti hlavních dopravních tepen, kde monitorují emise výfukových plynů, mechanické otěry pneumatik a resuspenzi prachu. Měření v těchto lokalitách umožňuje hodnotit účinnost opatření ke snížení emisí z dopravy, včetně dopadů nízkoemisních zón nebo regulace vjezdu vozidel (WHO, 2021).

Pozad'ové stanice jsou umístěny v oblastech bez dominantního zdroje emisí, což umožňuje hodnocení celkové úrovně znečištění a sledování dlouhodobých trendů. Tyto stanice poskytují referenční hodnoty, které umožňují porovnávat míru znečištění v průmyslových a urbanizovaných oblastech (ČHMÚ, 2023).

Průmyslové stanice monitorují kvalitu ovzduší v oblastech se zvýšenou průmyslovou činností. Tyto stanice jsou klíčové pro sledování dopadů průmyslových emisí a kontrolu dodržování emisních limitů (European Environment Agency, 2022). Často bývají umístěny v blízkosti rafinerií, elektráren nebo hutních provozů, kde je nutné sledovat koncentrace škodlivých látek a hodnotit efektivitu filtračních opatření (Skácel a Tekáč, 2019).

Městské stanice jsou umístěny v hustě osídlených oblastech, kde sledují vliv urbanizace, dopravy a lokálních topenišť na kvalitu ovzduší. V těchto lokalitách bývají často zvýšené koncentrace suspendovaných částic, zejména v zimním období, kdy dochází ke zvýšené produkci emisí ze stacionárních zdrojů vytápění (Zapletal et al., 2021).

5.3 Základní metody měření koncentrací suspendovaných částic

Získaná data ze stanic imisního monitoringu jsou přenášena do centrální databáze, kde podléhají automatické i manuální validaci. Po ověření jsou údaje zveřejňovány na online portálech ve formě aktuálních hodinových hodnot a denních, měsíčních a ročních souhrnů. Hodinové průměry slouží k detekci krátkodobých výkyvů (např. během dopravní špičky, nebo výskytu inverzního počasí). Denní průměry se využívají pro porovnání s krátkodobými imisními limity stanovenými legislativou. Roční průměry umožňují sledovat dlouhodobé trendy kvality ovzduší a hodnotit účinnost regulačních opatření (Česká republika, 2012).

Vzhledem k různorodosti zdrojů znečištění jsou využívány moderní metody analýzy k pochopení složení a původu suspendovaných částic. Zatímco tradiční metody, jako je gravimetrická analýza, určují pouze množství částic ve vzduchu, pokročilejší techniky umožňují detailnější pohled na jejich vlastnosti, například chemické složení nebo tvar.

Takové metody pomáhají zjistit, zda částice pocházejí z dopravy, průmyslu nebo přírodních zdrojů (Grange et al., 2021).

5.3.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrie je standardní referenční metoda pro měření koncentrací suspendovaných částic (PM_{10} , $PM_{2,5}$) v ovzduší. Využívá jednoduchý a zároveň velmi přesný princip vážení hmotnosti částic zachycených na filtru během definovaného časového intervalu, nejčastěji v 24hodinových intervalech. Nejprve se každý filtr individuálně zváží na analytické váze s vysokou přesností a opatří jedinečným označením, aby bylo možné přesně spárovat údaje před a po vzorkování. Poté následuje samotné vzorkování – pomocí vzorkovače se přesně stanovený objem vzduchu nasává přes filtr, přičemž se na něm zachytí částice o požadované velikosti. Po ukončení vzorkování je filtr opět zvážen a z rozdílu hmotností před a po odběru se určí množství zachycených částic. Konečně se koncentrace částic v ovzduší vypočítá jako rozdíl hmotností dělený objemem prosátého vzduchu. Výsledek se udává v mikrogramech na metr krychlový ($\mu g \cdot m^{-3}$) (ČSN EN 12341, 2014).

5.3.2 Optické metody

Optické metody měření suspendovaných částic zahrnují techniky založené na interakci světla s částicemi, které umožňují stanovení jejich velikostní distribuce na základě intenzity a směru rozptýleného světla. Mezi hlavní patří laserová difrakce a statický rozptyl světla. Tyto metody se vyznačují rychlou odezvou a širokým dynamickým rozsahem měření, avšak jejich výsledky mohou být ovlivněny tvarem částic a optickými vlastnostmi materiálu (Microtrac, 2025a, 2025b).

Laserová difrakce je nejběžnější metodou stanovení velikostního rozdělení částic vedle klasické síťové analýzy. Princip metody spočívá ve vychýlení monochromatického laserového paprsku při průchodu vzorkem částic rozptýlených ve vzduchu nebo kapalině. Difrakční úhel je nepřímo úměrný velikosti částic – větší částice rozptylují světlo do menších úhlů a naopak. Detektorová soustava zaznamenává intenzitu světla v různých směrech a algoritmus (Fraunhoferova či Mieho teorie) z těchto dat dopočítává distribuci velikosti. Metoda umožňuje měření v širokém rozsahu (cca 30 nm až 1 000 μm), je rychlá, reprodukovatelná a univerzálně použitelná pro suché i mokré vzorky. Nevýhodou může být nižší rozlišení pro extrémně malé nebo velké částice a nutnost znalosti indexu lomu vzorku při použití Mieho hodnocení (Microtrac, 2025a).

Statický **rozptyl světla** je jev, ke kterému dochází při interakci světelného paprsku s částicemi – dochází k lomu, difrakci, odrazu a absorpci. Vzniklé rozptylové obrazce jsou charakteristické pro různé velikosti částic. Tato metoda se využívá především v analyzátoch velikosti částic, kde je laserový paprsek směřován na suspenzi, emulzi nebo aerosol a rozptýlené světlo je detekováno pod různými úhly. Velké částice mají difrakční obrazce soustředěné do malých úhlů, malé částice rozptylují světlo do větších úhlů. Hodnocení se provádí pomocí Fraunhoferovy nebo Mieho teorie, v závislosti na velikosti a průhlednosti částic. Metoda umožňuje rychlé měření i pro široké spektrum vzorků a poskytuje kvalitní výsledky i při složeném složení vzorku (Microtrac, 2025b).

5.3.3 Skenovací elektronová mikroskopie

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) je pokročilá technika, která umožňuje detailní zobrazení povrchu částic a analýzu jejich chemického složení. Na rozdíl od optických mikroskopů využívá SEM k vytvoření obrazu svazek elektronů, přičemž celý proces probíhá ve vakuu, aby se minimalizovala interakce s atmosférickými částicemi. Vzorky musí být vodivé, a proto se nevodivé materiály pokrývají tenkou vrstvou vodivého materiálu. V oblasti environmentálních věd nachází SEM uplatnění při tzv. částicové analýze ovzduší, kde slouží jako doplňková metoda k určení morfologie (tvaru a velikosti) a chemického složení zachycených částic. Přestože neposkytuje informace o absolutní koncentraci, umožňuje identifikaci potenciálních zdrojů znečištění na základě velikosti, tvaru a složení částic. Například částice vzniklé spalováním bývají menší a pravidelné, zatímco mechanické procesy produkují větší a nepravidelné částice. Specifické tvary mohou mít i saze nebo pylová zrna. Zobrazení v SEM je založeno na detekci různých typů elektronových signálů. Sekundární elektrony, vznikající těsně pod povrchem, poskytují detailní informaci o topografii s vysokým rozlišením a trojrozměrným efektem. Zpětně odražené elektrony (BSE) pronikají hlouběji do vzorku a poskytují kontrast založený na atomovém čísle prvků, tedy těžší prvky se jeví světlejší. BSE lze využít i pro difrakční analýzu krystalografie pomocí metody EBSD. SEM je tedy významným nástrojem pro charakterizaci částic v ovzduší, neboť poskytuje detailní informace o jejich původu, složení a potenciálním dopadu na zdraví a životní prostředí (MATCA, 2025a).

Dalším typem signálu je charakteristické rentgenové záření, využívané v energiově disperzní spektrometrii (EDS). Tato metoda umožňuje rychlou identifikaci chemických prvků a jejich rozložení na povrchu vzorku pomocí bodové nebo plošné analýzy. Detekční limity EDS se pohybují v řádu desetin procent hmotnosti. Přesnější alternativou je vlnově

disperzní spektrometrie (WDS), která je však technicky a časově náročnější (MATCA, 2025b).

5.4 Aktuální vývoj monitoringu

Monitorování kvality ovzduší se neomezuje pouze na samotný sběr dat, ale zahrnuje také jejich efektivní využití k analýze trendů, predikcím a návrhu opatření. Moderní technologie umožňují širokou dostupnost informací, které jsou klíčové jak pro odbornou veřejnost, tak i pro běžné občany sledující kvalitu ovzduší v místě svého bydliště. Historická data jsou pak cenným nástrojem pro sledování vývoje znečištění a dopadů regulačních opatření.

Online přístup k datům

Všechna naměřená data jsou po validaci zveřejňována online prostřednictvím webových platforem, jako jsou ČHMÚ nebo Evropská agentura pro životní prostředí (EEA). Veřejnost tak může sledovat aktuální kvalitu ovzduší v reálném čase, zatímco odborné instituce využívají data ke statistickým analýzám a predikcím vývoje znečištění (European Environment Agency, 2022; WHO, 2021).

Využití historických dat a trendů

Analýza historických dat umožňuje sledování dlouhodobých trendů kvality ovzduší, identifikaci sezónních výkyvů a hodnocení efektivity regulačních opatření. Sledování trendů napomáhá ke zlepšení legislativních strategií a plánování nových opatření ke snižování imisní zátěže (Manisalidis, et al., 2020).

Monitorování kvality ovzduší se neustále vyvíjí s cílem zvýšit přesnost měření, efektivitu monitorovacích systémů a integraci těchto dat do městského plánování. Významnou roli v tomto procesu hraje jak vývoj nových senzorových technologií, tak i rostoucí informovanost veřejnosti, která klade vyšší nároky na přístup k aktuálním údajům o kvalitě ovzduší. Přesnější data umožňují efektivnější řízení emisí a přispívají k formování politik zaměřených na zlepšení kvality ovzduší (PROJEKT-ARAMIS, 2024).

Zlepšení přesnosti a efektivity měření

Moderní technologie senzorů pro monitorování kvality ovzduší se neustále zdokonalují s cílem zvýšit přesnost měření. Nízkonákladové senzory umožňují kontinuální sledování koncentrací znečišťujících látek, avšak jejich přesnost může být ovlivněna meteorologickými podmínkami a dalšími faktory. Proto je nezbytné tyto senzory pravidelně

kalibrovat a ověřovat jejich přesnost ve srovnání s referenčními metodami (PROJEKT- ARAMIS, 2024).

Integrace měřících stanic do městského plánování

Efektivní integrace měřících stanic do městského plánování je klíčová pro optimalizaci urbanistických řešení zaměřených na snížení emisí v kritických lokalitách. Při návrhu nových stavebních projektů je důležité zohlednit údaje o kvalitě ovzduší, aby byla minimalizována expozice obyvatel škodlivým látkám. Podpůrná opatření, jako je správné územní plánování nebo zavádění zelených koridorů, mohou významně přispět ke zlepšení kvality ovzduší (MŽP, 2024b). Například inteligentní identifikační systémy zdrojů znečištění ovzduší umožňují získat detailní časový a prostorový obraz znečištění v dané lokalitě, což napomáhá efektivnějšímu plánování a realizaci opatření ke snížení emisí (PRIORITA, 2024).

Dopad měření na veřejné povědomí

Dostupnost informací o kvalitě ovzduší má zásadní vliv na chování veřejnosti a tlak na zavádění regulačních opatření. Informovaná společnost je více motivována k podpoře politik a opatření zaměřených na zlepšení kvality ovzduší. Přístup k aktuálním datům o znečištění umožňuje nejen jednotlivcům, ale i organizacím a politickým aktérům efektivněji reagovat na environmentální výzvy. Jak upozorňuje Thunberg (2022), zvyšování povědomí o klimatické krizi a jejích dopadech na zdraví a ekosystémy je klíčové pro dosažení strukturálních změn v politice a průmyslu. Měření kvality ovzduší proto neplní pouze roli vědeckého monitoringu, ale také nástroje k mobilizaci veřejnosti a ovlivňování rozhodovacích procesů.

V Evropské unii platí právní předpisy na ochranu čistého ovzduší, které stanovují limity koncentrací znečišťujících látek ve vzduchu. Přesto špatná kvalita ovzduší zůstává problémem v mnoha členských státech, což podtrhuje potřebu zlepšení informovanosti veřejnosti a efektivnějšího vymáhání stávajících předpisů (European Court of Auditors, 2024).

6 PRÁVNÍ REGULACE SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC V OVZDUŠÍ

Regulace kvality ovzduší je zásadní pro ochranu veřejného zdraví a životního prostředí. Suspendované částice patří mezi nejvýznamnější znečišťující látky, a proto jsou jejich koncentrace přísně regulovány na národní i mezinárodní úrovni. Evropská unie stanovuje právní rámec prostřednictvím směrnic o kvalitě ovzduší, přičemž klíčovým dokumentem je směrnice 2008/50/ES, která určuje imisní limity pro PM_{10} a $PM_{2,5}$ (EUR-Lex, 2008).

6.1 Normy a limity pro suspendované částice

V České republice jsou imisní limity pro suspendované částice (PM) upraveny zákonem č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, v platném znění a příslušnými prováděcími předpisy (Česká republika, 2012). Právní úprava stanovovala imisní limity pro PM_{10} denní limit $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (nesmí být překročen více než 35krát za kalendářní rok) a roční limit $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, zatímco u $PM_{2,5}$ byla určena roční hodnota $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (ČHMÚ, 2023). Tyto limity reflektovali požadavky z rámcové směrnice 2008/50/ES o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu (EUR-Lex, 2008). Evropská komise navrhla zpřísnění imisních limitů na základě doporučení WHO. V roce 2024 byla směrnice 2008/50/ES o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu po legislativním procesu evropským Parlamentem a Radou upravena a došlo ke změně imisních limitů nejen pro suspendované částice. Členské státy EU nyní mají 2 roky na transpozici směrnice do národních zákonů, přičemž nové limity musí být reálně splněny do roku 2030. Výjimečně lze za přísných podmínek žádat o prodloužení lhůty až do 2040, pokud by dosažení limitů do 2030 bylo pro konkrétní oblast prokazatelně nereálné (European Commission, 2024).

Tabulka 1 Nové imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí

Znečišťující látka	Doba průměrování	Hodnota imisního limitu	Povolený počet překročení za kalendářní rok
Částice PM_{10}	24 hodin	$45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	18
Částice PM_{10}	1 kalendářní rok	$20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	-
Částice $PM_{2,5}$	24 hodin	$25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	18
Částice $PM_{2,5}$	1 kalendářní rok	$10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	-

(zdroj: vlastní, Česká republika, 2012)

Česká republika bude muset promítnout uvedené zpřísnění do své legislativy (novelizací zákona o ochraně ovzduší a příslušných nařízení vlády) do konce roku 2026 tak, aby od roku 2030 došlo k snížení limitů. V praxi bude nutné přijmout dodatečná opatření ke snižování emisí PM – zejména z lokálního vytápění a dopravy. Očekává se pokračování a zpřísnění programů na výměnu starých kotlů na tuhá paliva za novější a bezemisní zdroje (např. kotlíkové dotace) a regulace spalování pevných paliv v domácnostech při smogových situacích. V dopravě je rozšířeno zavádění nízkoemisních zón ve městech, omezení vjezdu nejvíce znečišťujících vozidel, podpora elektromobility a zlepšování MHD, dále opatření proti víření prachu (čištění komunikací, úprava povrchů). Průmysl a energetika již emisní limity většinou plní, ale i zde se zavádí nejlepší dostupné technologie pro další omezení prachových emisí. Krátkodobě požaduje nová směrnice EU také tvorbu akčních plánů pro smogové situace. V oblastech s vysokými koncentracemi budou muset úřady přijmout okamžitá a mimořádná opatření, pro omezení dopravy, pozastavení stavebních prací či polních prací apod. (SeeTheAir, 2024).

6.2 Program zlepšování kvality ovzduší

Podle zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, mají kraje a obce povinnost přijímat opatření, pokud dojde k překročení stanovených imisních limitů. ČHMÚ v takovém případě vydává informativní nebo varovné zprávy o zhoršení kvality ovzduší. V případě, že je v určité oblasti překročen imisní limit, spadá dané území do tzv. zóny nebo aglomerace se zhoršenou kvalitou ovzduší a musí být ministerstvem životního prostředí (MŽP) ve spolupráci s příslušným krajským nebo obecním úřadem do 18 měsíců od konce kalendářního roku, ve kterém došlo k překročení, zpracován tzv. program zlepšování kvality ovzduší (PZKO), ve kterém stanoví konkrétní opatření ke snížení emisní zátěže. Tento program následně schvaluje MŽP a vyhlašuje ho ve Věstníku MŽP. Obce a kraj následně provádí opatření, která jim daný PZKO ukládá v rámci svých možností tak, aby byl imisní limit splněn co nejdříve. Pro tyto účely musí obec nebo kraj do 12 měsíců sestavit časový harmonogram a k tomuto harmonogramu umožnit dálkový přístup. MŽP ve spolupráci s příslušným krajským nebo obecním úřadem PZKO aktualizuje v případě potřeby, nejméně však jednou za 4 roky (MŽP, 2024a; Česká republika, 2012).

6.3 Evropská politika ochrany ovzduší a dekarbonizace dopravy

Evropská unie dlouhodobě vyvíjí strategická opatření ke zlepšení kvality ovzduší a ochraně veřejného zdraví. Mezi hlavní nástroje patří legislativní předpisy, klimatické strategie,

podpora inovací a investice do ekologických technologií. Klíčovým dokumentem v oblasti ochrany ovzduší je Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/50/ES o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu. Tato směrnice stanovuje cílové a imisní limity pro hlavní znečišťující látky, zavádí systém posuzování a hodnocení kvality ovzduší a ukládá členským státům povinnost přijímat akční plány ke zlepšení ovzduší v oblastech s překročenými limity. Dále definuje požadavky na informování veřejnosti a stanovuje zásady jednotného monitorovacího systému napříč členskými státy.

V rámci Zelené dohody pro Evropu přijala Evropská komise v roce 2021 Akční plán EU „Cesta k nulovému znečištění ovzduší, vody a půdy“. Jeho cílem je do roku 2030 dosáhnout takové úrovně čistoty životního prostředí, která již nebude představovat zdravotní ani ekologické riziko. Plán stanovuje konkrétní cíle, například snížení počtu předčasných úmrtí způsobených znečištěním ovzduší o 55 % oproti roku 2005 nebo omezení škodlivých dopadů na přírodu o 25 %. Plán se rovněž zaměřuje na podporu ekologických a digitálních inovací, spravedlivé rozložení environmentální zátěže a přísnější emisní limity pro suspendované částice (PM) a další látky (European Commission, 2021).

Jedním z klíčových kroků ke snižování emisí v dopravě je zákaz prodeje nových benzinových a naftových automobilů, který byl schválen Evropským parlamentem v roce 2022 s účinností od roku 2035. Cílem tohoto opatření je snížit emise CO₂ ze silniční dopravy, která se podílí přibližně 20 % na celkových emisích skleníkových plynů v EU. I po tomto roce bude možné starší vozy provozovat, avšak jejich provoz bude podléhat přísnějším emisním a daňovým pravidlům. Zákaz má rovněž podpořit masové rozšíření elektromobilů, rozvoj nabíjecí infrastruktury a inovace v automobilovém průmyslu (European Parliament, 2022a).

V rámci dekarbonizace dopravy Evropská unie podporuje využívání alternativních paliv, která mohou výrazně přispět ke snížení emisí škodlivin. Mezi nejvýznamnější alternativní paliva patří biopaliva, syntetická a parafinická paliva, elektřina a vodík. Elektromobilita má největší potenciál v osobní dopravě, zatímco vodíková technologie se uplatňuje zejména v těžké nákladní dopravě a letectví. Biopaliva a syntetická paliva mohou být využita v současných spalovacích motorech a představují přechodné řešení. Evropská unie rovněž podporuje zavádění hybridních vozidel, která mohou snižovat spotřebu fosilních paliv a emise CO₂ během přechodného období (European Parliament, 2021; 2022b).

Celkově je cílem evropské environmentální politiky dosáhnout klimatické neutrality do roku 2050, přičemž kvalitní ovzduší a zdravé životní prostředí patří mezi její klíčové priority.

7 METODY HODNOCENÍ ZDRAVOTNÍCH RIZIK

Hodnocení zdravotních rizik představuje klíčový nástroj pro identifikaci, analýzu a interpretaci možných zdravotních dopadů spojených s expozicí škodlivým látkám v životním prostředí. V podmínkách zhoršené kvality ovzduší, především v městských oblastech s vysokou dopravní zátěží, slouží tyto metody jako základní opora pro veřejné zdravotnictví, územní plánování i environmentální politiku. Umožňují předpovědět potenciální dopady na zdraví a určit míru rizika pro specifické skupiny obyvatel a navrhnout cílená opatření ke snížení expozice (U.S. EPA, 2023).

Metody hodnocení zdravotních rizik vycházejí ze zavedených vědeckých principů, zejména z oblasti toxikologie, epidemiologie a modelování expozice. Cílem je propojit dostupná data o kvalitě životního prostředí s poznatky o lidské fyziologii a chování populace. V praxi se uplatňují kvalitativní expertní analýzy nebo komplexní kvantitativní modely zahrnující výpočet ukazatelů jako je relativní riziko nebo doživotní pravděpodobnost výskytu onemocnění.

Důležitým nástrojem statistického hodnocení vztahů mezi proměnnými v oblasti veřejného zdraví je korelační analýza. Ta je často využívána k identifikaci souvislostí mezi koncentracemi škodlivin v ovzduší, meteorologickými podmínkami a zdravotními ukazateli. Korelační matice slouží k přehlednému zobrazení vztahů mezi více proměnnými současně. Jedná se o tabulku, ve které jsou uvedeny korelační koeficienty (např. Pearsonův) pro každou dvojici proměnných.

7.1 Health Risk Assessment

Hodnocení zdravotních rizik (HRA) je systematický proces k hodnocení zdravotních dopadů různých typů environmentálních a pracovních faktorů expozic. Pokrývá široké spektrum rizikových faktorů, jimiž jsou fyzikální, chemické, biologické nebo psychosociální vlivy.

Metodika zahrnuje následující fáze:

- Plánování a definice problému
- Identifikace nebezpečí (hazard identification)
- Hodnocení dávka–účinek (dose–response assessment)
- Hodnocení expozice (exposure assessment)
- Charakterizace rizika (risk characterization)

V podmínkách městského prostředí se HRA uplatňuje zejména při hodnocení celkového dopadu suspendovaných částic na zdraví obyvatel. HRA se využívá se především při tvorbě zdravotní politiky, řízení rizik, hodnocení EIA a při krizovém plánování (Health.Vic, 2024; CENIA, 2020).

7.2 Human Health Risk Assessment

Hodnocení zdravotních rizik lidského zdraví (HHRA) je standardizovaný kvantitativní přístup určený k identifikaci a analýze zdravotních dopadů spojených s expozicí člověka chemickým kontaminantům v životním prostředí (Health.Vic, 2024; U.S. EPA, 2023).

Metoda HHRA se uplatňuje v oblastech veřejného zdraví, environmentální politiky a územního plánování. Je využívána při hodnocení kvality ovzduší v městských aglomeracích, kde dochází k dlouhodobé expozici obyvatel suspendovaným částicím. Cílem této metody je určit, zda je zjištěná expozice zdravotně přijatelná, identifikovat rizikové skupiny a navrhnout opatření ke snížení zdravotního rizika (Singha a Ghosh, 2023).

Na tuto fázi navazují čtyři hlavní kroky hodnocení, jak je definuje metodika U.S. EPA (2023a), přičemž pořadí některých kroků se může mírně lišit podle přístupu konkrétních institucí. V této práci jsou kroky uvedeny v pořadí, které odpovídá logice vybraného přístupu a dostupnosti dat:

Identifikace nebezpečí (Hazard Identification) je první krok hodnocení, v jehož rámci se zjišťuje, zda zkoumaná látka (např. suspendované částice) může způsobit nepříznivé zdravotní účinky. Tato fáze je založena na výsledcích epidemiologických a toxikologických studií, které popisují možné mechanismy účinku i podmínky, za nichž k účinkům dochází.

Hodnocení dávky–účinku (Dose–Response Assessment) stanovuje kvantitativní vztah mezi koncentrací škodlivé látky v prostředí a pravděpodobností výskytu zdravotního účinku u exponované populace. V případě suspendovaných částic $PM_{2,5}$ se využívá exponenciální model, který umožňuje výpočet relativního rizika na základě rozdílu mezi aktuální a referenční koncentrací.

Stanovení přebytkového zdravotního rizika realizuje podle vzorce

$$ER = \exp[\beta \times (C - C_0)] - 1 \quad (1)$$

kde RR značí relativní riziko (bezrozměrné číslo), β představuje koeficient dávka–účinek ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C označuje průměrnou koncentraci škodliviny v ovzduší ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a C_0 referenční koncentraci stanovenou zdravotními normami ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). V praktické části této práce jsou tyto vztahy aplikovány na modelové subjekty vystavené různým úrovním znečištění ovzduší v městské lokalitě Brna, což umožňuje kvantifikovat přebytkové zdravotní riziko (Excess Risk) pro různé věkové a zdravotní skupiny obyvatel.

Hodnocení expozice (Exposure Assessment) zahrnuje odhad úrovně, frekvence a délky kontaktu zkoumané osoby s daným kontaminantem. Tento výpočet pracuje s konkrétními daty o koncentracích, délkou expozice a charakteristikou cílového subjektu.

Stanovení průměrné denní dávky se provádí podle vzorce

$$ADD = \frac{(C \times IR \times ET \times EF \times ED)}{(BW \times AT)}, \quad (2)$$

Stanovení chronické denní dávky se provádí podle vzorce

$$CDD = \frac{(C \times IR \times ET \times EF)}{BW} \quad (3)$$

kde C značí koncentraci škodliviny v ovzduší ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), IR představuje inhalační rychlost (m^3/hod), ET označuje dobu expozice (hod/den), EF frekvenci expozice (dní/rok), ED dobu trvání expozice (let), BW tělesnou hmotnost jedince (kg) a AT průměrnou dobu expozice (v celkovém počtu dní).

Charakterizace rizika (Risk Characterization) je závěrečnou fází, v níž se výsledky předchozích výpočtů integrují do celkového hodnocení zdravotního rizika. Tento krok zahrnuje kvantifikaci zdravotního dopadu prostřednictvím ukazatele hazardního kvocientu (HQ), který je definován vzorcem:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad (4)$$

Rovnice 4 Vzorec pro výpočet hazardního kvocientu

kde ADD představuje průměrnou denní dávku ($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{den}$) a RfD referenční dávku ($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{den}$). Hodnota HQ menší než 1 značí přijatelnou úroveň expozice, zatímco HQ rovné

nebo větší než 1 signalizuje možné zdravotní riziko, které může vyžadovat regulační nebo preventivní opatření.

Metoda HHRA je široce využívána v odborné literatuře i regulační praxi. V Ghaně byla aplikována ve studii Ababio et al. (2025), kde byly analyzovány zdravotní dopady $PM_{2,5}$, NO_2 a O_3 v 57 městech. Výsledky ukázaly souvislost mezi zvýšenými koncentracemi znečišťujících látek a zkrácením střední délky života. Podobné závěry byly učiněny i v Rumunsku (Bodor et al., 2022), kde mírně zvýšené koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ vedly ke zvýšené nemocnosti a úmrtnosti, a v Polsku (Gruszecka-Kosowska et al., 2021), kde byla metoda využita pro identifikaci rizik pro děti a seniory. V České republice se HHRA stává součástí zpráv Ministerstva životního prostředí o dopadech znečištění ovzduší a slouží k odhadům přebytečného karcinogenního rizika a nadměrné úmrtnosti (MŽP, 2024a).

7.3 Porovnání Health Risk Assessment a Human Health Risk Assessment

Rozdíl mezi Health Risk Assessment (HRA) a Human Health Risk Assessment (HHRA) spočívá zejména v rozsahu a zaměření obou metod. Zatímco HRA je univerzální přístup k hodnocení zdravotních dopadů různých druhů stresorů tak HHRA je specificky zaměřena na chemické kontaminanty a jejich vliv na lidské zdraví.

HRA se uplatňuje ve velmi širokém spektru oblastí, jako je plánování územního rozvoje, hodnocení pracovního prostředí či krizový management. Její univerzálnost umožňuje posuzovat celou škálu zdravotních rizik napříč populací a prostředími (Health.Vic, 2024).

HHRA poskytuje přesně definovaný kvantitativní rámec pro hodnocení zdravotních rizik z chemické expozice. Vylučuje hodnocení jiných než chemických stresorů a zaměřuje se výhradně na člověka jako cílový organismus. Její čtyřkrokový proces zahrnuje identifikaci nebezpečí, hodnocení dávky–účinku, hodnocení expozice a charakterizaci rizika. Díky tomu se metoda HHRA osvědčuje zejména při hodnocení dopadů znečištění ovzduší, vody nebo půdy, kde je požadována přesná kvantifikace rizik (U.S. EPA, 2023; Singha a Ghosh, 2023).

8 SHRUTÍ TEORETICKÝCH VÝCHODISEK

Teoretická část práce se zaměřuje na suspendované částice, které představují jednu z nejvýznamnějších složek znečištění ovzduší. Vznikají přímými emisemi a sekundárními chemickými reakcemi. Vyznačují se různou velikostí a komplexním chemickým složením. Obsahují anorganické soli, těžké kovy, organické sloučeniny a biologické částice.

V městském prostředí je hlavním zdrojem suspendovaných částic doprava. K jejich tvorbě přispívají výfukové emise a mechanickými procesy. Míra znečištění závisí na typu vozidel, intenzitě dopravy, stavu infrastruktury a meteorologických podmínkách. Efektivní snižování emisí vyžaduje kombinaci technických, infrastrukturních a behaviorálních opatření.

Zdravotní rizika plynoucí z expozice suspendovaných částic souvisí s jejich schopností pronikat hluboko do plicních sklípků a vstupovat do krevního oběhu, kde vyvolávají zánětlivé a oxidační procesy, které vedou k rozvoji závažných onemocnění, jako je astma, ischemická choroba srdeční, diabetes mellitus 2. typu, rakovina plic a zvýšená úmrtnost. Nejohroženějšími skupinami jsou děti, senioři, těhotné ženy a osoby s chronickými zdravotními problémy.

Monitorování kvality ovzduší v České republice zajišťuje Státní síť imisního monitoringu, která využívá automatické, manuální i mobilní stanice. Měření probíhá gravimetricky, opticky nebo pokročilými analytickými metodami. Data jsou veřejně dostupná a slouží k hodnocení expozice obyvatel, sledování trendů a regulačních opatření.

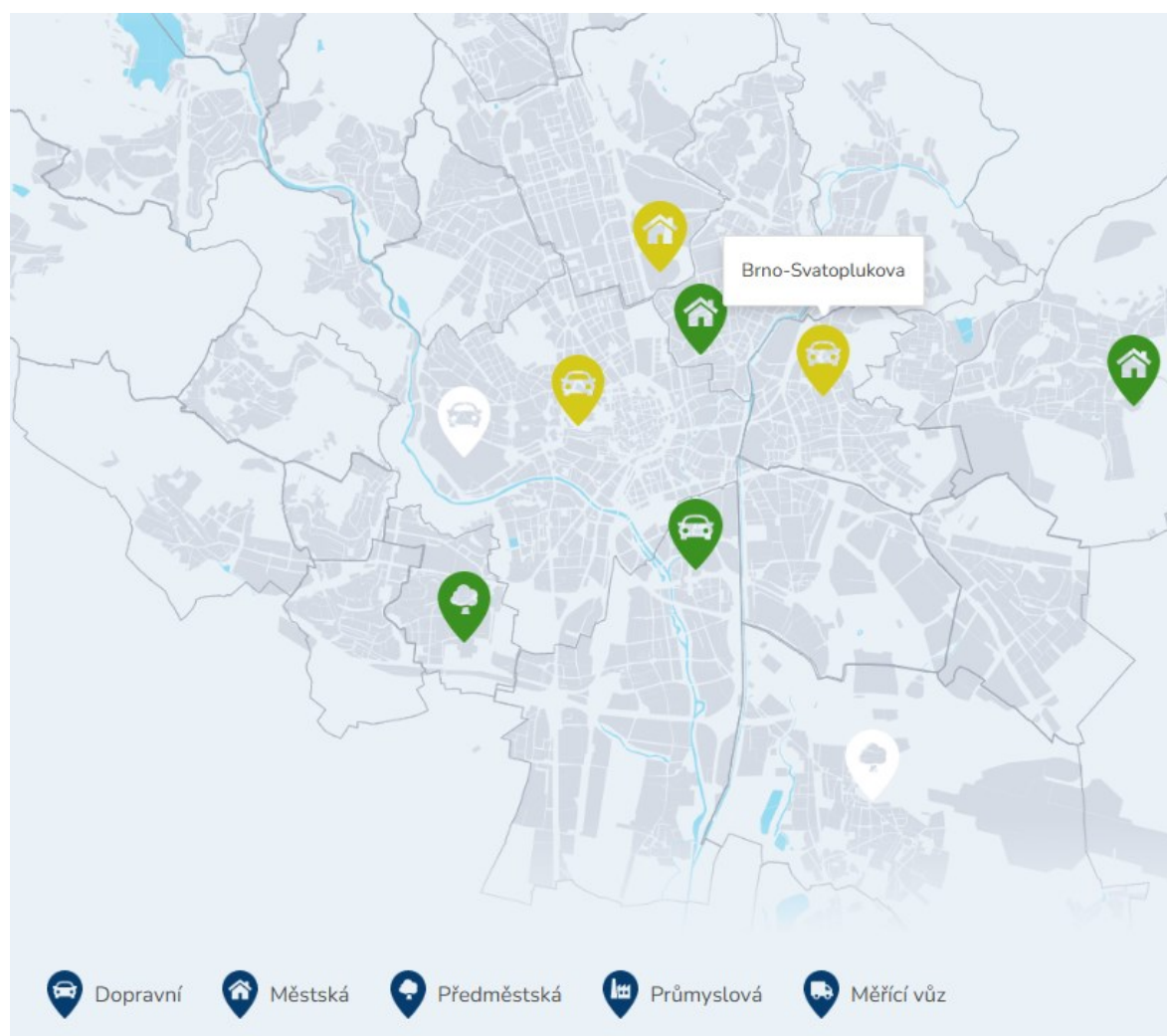
Právní rámec regulace suspendovaných částic v ČR vychází ze zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší a evropské směrnice 2008/50/ES. Nové imisní limity musí být implementovány do roku 2026 a plněny do roku 2030, s cílem dosažení klimatické neutrality do roku 2050. Mezi opatření patří i Programy zlepšování kvality ovzduší.

Nástrojem pro kvantitativní hodnocení zdravotních rizik je metoda Human Health Risk Assessment (U.S. EPA, 2023; Health.Vic, 2024), která využívá toxikologické, expoziční a epidemiologické údaje a je vhodná zejména pro přesné hodnocení zdravotních dopadů znečištění ovzduší. Oproti širšímu rámci Health Risk Assessment, který zahrnuje i fyzikální či psychosociální stresory, se HHRA zaměřuje výhradně na člověka a chemické kontaminanty. Tento teoretický rámec bude v praktické části diplomové práce aplikován na reálná data z konkrétní lokality v České republice za účelem kvantifikace zdravotních rizik z expozice suspendovaným částicím.

II PRAKTICKÁ ČÁST

9 POPIS LOKALITY A MONITOROVACÍ STANICE

V rámci systému monitorování kvality ovzduší je na území města Brna provozováno celkem devět monitorovacích stanic (Statutární město Brno, n.d.). Jejich vlastníkem je Český hydrometeorologický ústav a Statutární město Brno. Stanice jsou rozmístěny s ohledem na charakter jednotlivých lokalit a pokrývají různé typy prostředí. Tento diverzifikovaný přístup umožňuje získávat reprezentativní data o imisní zátěži v různých částech města a přispívá k přesnému hodnocení kvality ovzduší, identifikaci dominantních zdrojů znečištění a formulaci účinných opatření v oblasti veřejného zdraví a životního prostředí.



Obrázek 1 Mapa stanic imisního monitoringu v Brně

(zdroj: Statutární město Brno)

Pro účely praktické části této diplomové práce byla vybrána automatická monitorovací stanice Svatoplukova, která se řadí mezi dopravní stanice. Volba této stanice byla z důvodu její strategické polohy a charakteru zátěžového prostředí. Stanice se nachází v městské části Brno – Židenice, konkrétně na ulici Svatoplukova, v areálu s omezeným přístupem, který spadá do vojenského prostoru.



Obrázek 2 Monitorovací stanice Svatoplukova

(zdroj: Statutární město Brno)

Automatická imisní monitorovací stanice Svatoplukova představuje strategicky významné místo pro sledování vlivu dopravy na kvalitu ovzduší. Nachází se v bezprostřední blízkosti silnice I/42, která je součástí Velkého městského okruhu a dopravní křižovatky ulic Svatoplukova × Rokytova. Tato lokalita je dlouhodobě vystavena vysoké dopravní zátěži, a proto je vhodná pro hodnocení vztahu mezi intenzitou dopravy a koncentracemi suspendovaných částic.

V rámci praktické části diplomové práce byl na křižovatce Svatoplukova × Rokytova realizován monitoring dopravní intenzity pomocí automatického zpracování videozáznamů z dopravní kamery provozované společností Brněnské komunikace a.s. Tento datový zdroj

poskytuje informací o aktuální intenzitě dopravy, který může být využit k přesnějšímu hodnocení vztahu mezi dopravním zatížením a koncentracemi suspendovaných částic v ovzduší. Výsledky budou využity při kvantifikaci zdravotních rizik spojených s expozicí suspendovaným částicím v dané lokalitě.



Obrázek 3 Poloha monitorovací stanice Svatoplukova v kontextu dopravní křižovatky

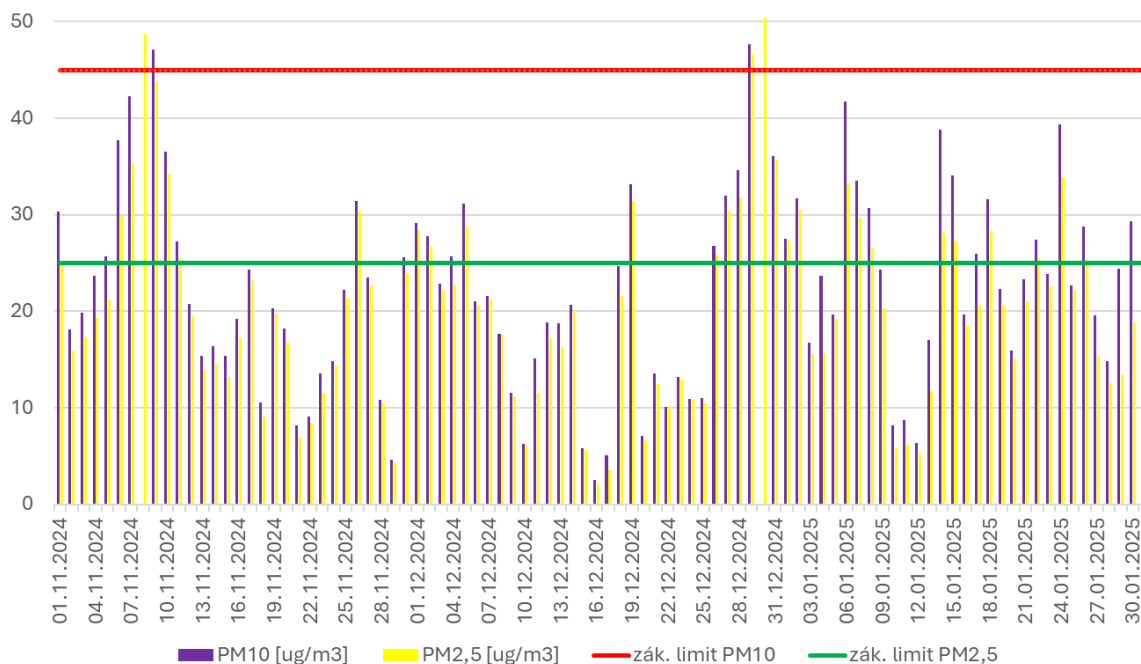
(zdroj: Statutární město Brno)

10 ZÍSKÁNÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

V rámci praktické části diplomové práce je cílem posoudit zdravotní rizika spojená s expozicí suspendovaným částicím z dopravy v konkrétní městské lokalitě. Pro realizaci tohoto hodnocení bylo nezbytné získat dvě datové sady, a to meteorologická a imisní data z automatické imisní monitorovací stanice a údaje o intenzitě silničního provozu v dané oblasti. Tato data slouží jako podklad pro následné vyhodnocení míry expozice obyvatel suspendovaným částicím a posouzení potenciálních zdravotních dopadů spojených s dopravním znečištěním.

10.1 Data z imisní monitorovací stanice

Meteorologická data zahrnující směr a rychlost větru (včetně maximálních hodnot), teplotu vzduchu, relativní vlhkost a atmosférický tlak, spolu s neverifikovanými hodinovými koncentracemi suspendovaných částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ za období od 1. listopadu 2024 do 31. ledna 2025, byla poskytnuta Statutárním městem Brnem. Jedná se o data naměřená automatickou imisní monitorovací stanicí Svatoplukova, která je součástí Státní sítě imisního monitoringu. Vzhledem k tomu, že data byla předána před finální validací Českým hydrometeorologickým ústavem, jedná se o jejich neverifikovanou verzi.



Graf 1 Naměřené suspendované částice za období od 1.11.2024 do 31.1.2025

(zdroj: vlastní)

Graf znázorňuje denní průměrné koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ (fialově) a PM_{2,5} (žlutě) naměřené na stanici Brno – Svatoplukova v období od 1. listopadu 2024 do 31. ledna 2025. Červená čára vyznačuje nový limit pro PM₁₀ (45 µg/m³), tyrkysová čára pak limit pro PM_{2,5} (25 µg/m³) dle aktualizovaných evropských norem platných od roku 2030. Hodnoty PM₁₀ překročily limit pouze výjimečně, konkrétně ve dvou dnech (9.11.2024, 29.12.2024), zatímco koncentrace PM_{2,5} přesahovaly stanovený limit opakovaně, zejména v prosinci a lednu. Tyto výsledky potvrzují sezónní charakter znečištění, protože vyšší koncentrace suspendovaných částic nastávají v zimních měsících, kdy se zhoršují rozptylové podmínky a přibývá emisí z vytápění a dopravy, což může představovat zvýšené zdravotní riziko.



Graf 2 Naměřené suspendované částice v průběhu dne 17.11.2024

(zdroj: vlastní)

Graf znázorňuje hodinové koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ (fialová linie) a PM_{2,5} (žlutá linie) naměřené dne 17. listopadu 2024. Z průběhu je patrný výrazný denní cyklus koncentrací: nejnižší hodnoty byly zaznamenány dopoledne kolem 8:00, kdy PM_{2,5} dosahovalo 14,90 µg/m³ a PM₁₀ 15,60 µg/m³. Odpoledne dochází k mírnému nárůstu koncentrací, přičemž nejvyšších hodnot bylo dosaženo večer mezi 22:00 a 23:00, kdy koncentrace PM₁₀ dosáhly denního maxima 37,40 µg/m³ a PM_{2,5} v denním maximu

36,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tento vývoj může být ovlivněn zvýšenou dopravní aktivitou a zhoršenými rozptylovými podmínkami ve večerních hodinách. Graf ukazuje, jak se kvalita ovzduší může výrazně měnit v průběhu dne, a poukazuje na rizikovost večerních expozic.

10.2 Získání dat o intenzitě dopravy

Data o četnosti vozidel byla získána za období od 4. listopadu 2024 do 04. února 2025 z videozáznamu pocházejícího z veřejně dostupného online streamu umístěného na webových stránkách Brněnských komunikací. Na uvedené webové stránce byl dostupný živý přenos z dopravní kamery umístěné na křižovatce Rokytova × Svatoplukova. Kamera snímá dopravní situaci na silnici I/42, která vede v těsné blízkosti a ve směru k automatické imisní monitorovací stanici Svatoplukova. Tato komunikace představuje významnou dopravní tepnu města Brna, což z dané lokality činí vhodné místo pro sledování vztahu mezi intenzitou dopravy a kvalitou ovzduší. Tento živý přenos byl automaticky stahován a ukládán do lokálního úložiště ve formě hodinových videozáznamů pro následnou zpracování (Brněnské komunikace a.s., n.d.).

Získání záznamu z živého vysílání bylo uskutečněno pomocí nástroje Streamlink. Jako vstupní URL (Uniform Resource Locator) je použita adresa HLS (HTTP Live Streaming) streamu dopravní kamery, přičemž je zajištěno, aby se přenášely i požadované hlavičky, jako například referer, který je nutný pro úspěšné připojení ke streamu.

Každou celou hodinu se spouští CronJob, který program restartuje. Tento mechanismus slouží k tomu, aby se každou hodinu ukončil aktuální záznam a začal nový, čímž dochází k přirozenému dělení nahrávky na hodinové segmenty.

Celý systém byl navržen tak, aby automaticky, spolehlivě a bez lidského zásahu stahoval dopravní video stream, ukládal jej do trvalého úložiště a každou hodinu spouštěl záznam nový. Tím vznikají dobře organizované, hodinově členěné video soubory.



Obrázek 4 Zachycení dopravní situace z živého záznamu kamery

(zdroj: Brněnské komunikace a.s.)

Pro analýzu videozáznamů byl použit python skript převzatý z repozitáře <https://github.com/python-dontrepeatyourself/Real-Time-Vehicle-Detection-Tracking-and-Counting-in-Python>, který byl modifikován a optimalizován pro konkrétní využití. Automaticky počítá vozidla projíždějící křižovatkou Rokytova X Svatoplukova na základě získaného videozáznamu dopravní kamery. Využívá metody strojového vidění pro detekci a sledování objektů modelem YOLOv8 (You Only Look Once) pro rozpoznávání vozidel a algoritmus DeepSORT (Simple Online and Realtime Tracking) pro jejich sledování v čase (python-dontrepeatyourself, 2023).

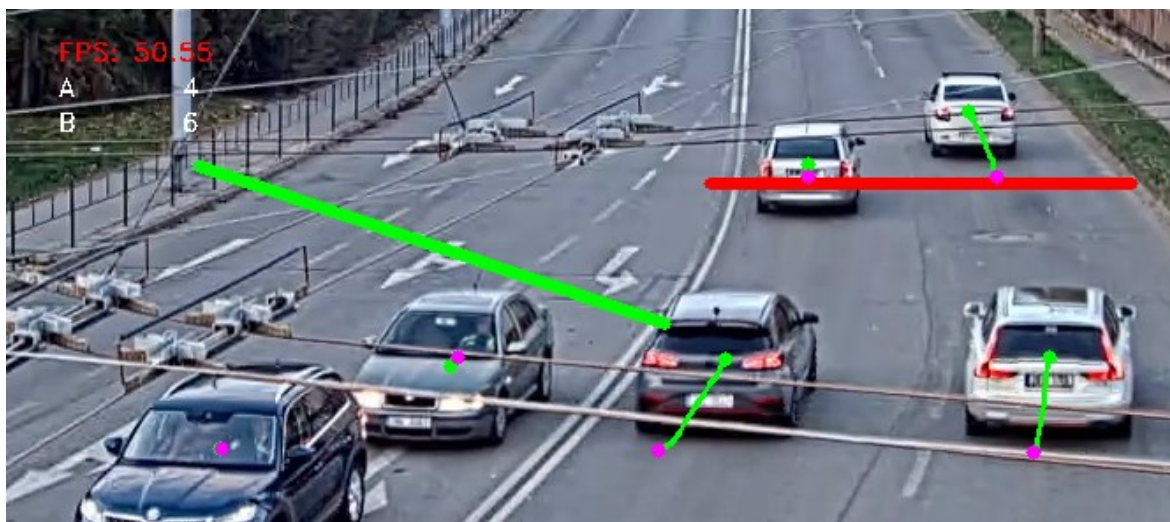
Script postupně zpracovává jednotlivé snímky. V každém snímku označí nová vozidla unikátním identifikátorem a sleduje jejich pohyb. Pro sledování trajektorie se využívá seznam posledních souřadnic každého vozidla.



Obrázek 5 Vizualizace sledování pohybu vozidel

(zdroj: vlastní)

V obraze jsou vyznačeny dvě počítací čáry pro každý směr zvlášť. Jakmile vozidlo překročí tuto hranici ve správném směru, je započítáno do příslušného čítače. Tímto způsobem lze určit, kolik vozidel projelo daným směrem během celé délky záznamu.



Obrázek 6 Vizualizace hranice čítače

(zdroj: vlastní)

Na konci zpracování záznamu skript vypočítá celkový počet vozidel v obou směrech, odhadne průměrný hodinový průjezd, kde se minimalizuje dopad na výpadky spojení se zdrojem videa. Následně získané výsledky zapíše do CSV souboru. Tento soubor obsahuje strukturované údaje o každém hodinovém videozáznamu, konkrétně název souboru, datum pořízení záznamu, délku videa v sekundách, počet detekovaných vozidel ve dvou směrech

(označených jako countA a countB) a celkový průměrný počet vozidel za danou hodinu (avr). Takto získaná data umožňují dále kvantifikovat intenzitu dopravy v jednotlivých časových intervalech a následně budou využívána při hodnocení vlivu dopravního zatížení na koncentrace suspendovaných částic v ovzduší. Struktura výstupu v CSV formátu je ilustrována následujícím příkladem:

name	filename	date	videoLength	countA	countB	avr
rokytova	-20241104-010005.mkv	4.11.2024	3600	5	20	25,00
rokytova	-20241104-020224.mkv	4.11.2024	3495	17	23	41,20
rokytova	-20241104-030006.mkv	4.11.2024	3634	29	26	54,49
rokytova	-20241104-040006.mkv	4.11.2024	3636	111	88	197,03
rokytova	-20241104-050007.mkv	4.11.2024	3634	394	372	758,83
rokytova	-20241104-060006.mkv	4.11.2024	3631	597	760	1345,41
rokytova	-20241104-070005.mkv	4.11.2024	3633	712	877	1574,57
rokytova	-20241104-080005.mkv	4.11.2024	3634	620	854	1460,21
rokytova	-20241104-090005.mkv	4.11.2024	3636	431	790	1208,91
rokytova	-20241104-100006.mkv	4.11.2024	3633	540	728	1256,48

10.3 Získání dat o meteorologických ukazatelích

Získaná data z automatické imisní monitorovací stanice Svatoplukova zahrnují hodinové koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ a PM_{2,5}, meteorologické parametry a počet vozidel projíždějících křižovatkou Rokytova × Svatoplukova. Všechna tato data byla sloučena do jednoho souhrnného souboru ve formátu Excel, který obsahuje denní i hodinové hodnoty za období od 4. listopadu 2025 do 31. ledna 2025. Tento soubor představuje výchozí podklad pro analýzu vzájemných vztahů mezi jednotlivými proměnnými a umožňuje tak posoudit, do jaké míry dopravní a meteorologické faktory ovlivňují koncentrace suspendovaných částic v ovzduší.

Na základě konzultace s provozovatelem bylo stanoveno, že automatická imisní monitorovací stanice Svatoplukova je situována severně od středu dopravní křižovatky Rokytova × Svatoplukova. Tento směr byl označen jako referenční směr, vůči němuž byl přepočítáván aktuální směr větru zaznamenaný stanicí.

Pro každý časový záznam byl vypočten rozdíl mezi zaznamenaným směrem větru a tímto referenčním úhlem. Výsledná transformovaná hodnota tak definovala úhel, kde 0° odpovídá proudění vzduchu přímo směrem ke stanici a 180° proudění ve směru od stanice. Výsledné hodnoty nabývají rozmezí od -1 do 1, přičemž 1 značí vítr foukající přímo na

stanici, -1 přesně opačný směr a hodnoty mezi těmito krajními body odpovídají úhlům odklonu proudění.

Na tyto hodnoty byla následně aplikována kosinová transformace:

$$S = \cos\left(\frac{\pi}{180} \times (\theta - \theta_{ref})\right) \quad (5)$$

kde θ je zaznamenaný směr větru ve stupních a θ_{ref} je referenční úhel odpovídající směru od stanice ke křižovatce. Tato transformace umožňuje kvantifikaci směrového účinku proudění vzduchu (S) v rozmezí od -1 do 1 . Hodnota 1 značí proudění přímo na stanici, -1 proudění opačné a hodnoty mezi těmito mezními body odpovídají různým úhlům odklonu.

Takto získané hodnoty byly využity v následné analýze k posouzení vztahů mezi směrem proudění vzduchu, meteorologickými podmínkami, dopravní intenzitou a koncentracemi suspendovaných částic v ovzduší.

11 ZÁVISLOST KONCENTRACÍ SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC NA VNĚJŠÍCH FAKTORECH

Za účelem posouzení vzájemných vztahů mezi koncentracemi suspendovaných částic a vybranými meteorologickými a dopravními proměnnými byla provedena korelační analýza. Vstupními daty byly hodinové koncentrace suspendovaných částic (PM_{10} a $PM_{2,5}$) zaznamenané automatickou imisní monitorovací stanicí Svatoplukova a data o intenzitě dopravy v lokalitě křižovatky Rokytova $\times$ Svatoplukova. Mezi meteorologické proměnné zahrnuté do analýzy patřil směr a rychlost větru, teplota, relativní vlhkost a atmosférický tlak.

Na základě dat získaných z automatické imisní stanice Svatoplukova a údajů o intenzitě dopravy na křižovatce Rokytova $\times$ Svatoplukova byla provedena korelační analýza s cílem posoudit vztahy mezi koncentracemi suspendovaných částic (PM_{10} a $PM_{2,5}$), meteorologickými podmínkami (směr a rychlost větru, teplota, vlhkost a tlak vzduchu) a počtem projíždějících vozidel.

K vyhodnocení vzájemné závislosti mezi proměnnými byl použit Pearsonův korelační koeficient (r), který měří sílu a směr lineárního vztahu mezi dvěma spojitými veličinami. Tento koeficient nabývá hodnot v intervalu $\langle -1; 1 \rangle$:

- hodnota $r = +1$ značí dokonalý kladný lineární vztah (růst jedné proměnné je doprovázen růstem druhé),
- hodnota $r = -1$ vyjadřuje dokonalý záporný lineární vztah (růst jedné proměnné je spojen s poklesem druhé),
- hodnota $r = 0$ naznačuje, že mezi proměnnými neexistuje lineární závislost.

Pro usnadnění interpretace výsledků byla vytvořena korelační matice, jejíž vizuální část byla doplněna barevnou škálou, která umožňuje rychlou orientaci. Pozitivní korelace jsou označeny odstíny zelené, zatímco negativní vztahy jsou zobrazeny červenými odstíny. Sytost barvy přitom odpovídá absolutní hodnotě korelačního koeficientu, čím sytější barva, tím silnější je identifikovaný vztah. Tento přístup přispívá k přehlednému zachycení případných souvislostí mezi sledovanými proměnnými a představuje užitečný nástroj pro identifikaci dominantních faktorů ovlivňujících koncentrace suspendovaných částic v městském ovzduší (Di Stefano et al., 2025).

11.1.1 Vliv dopravy na suspendované částice bez časového posunu

Korelační analýza bez uvažovaného časového posunu poskytuje základní přehled o okamžitých vztazích mezi koncentracemi suspendovaných částic a vybranými meteorologickými a dopravními proměnnými. Zaměřuje se na přímé souvislosti v daném časovém okamžiku, které mohou poukazovat na dominantní faktory ovlivňující imisní zátěž v městském prostředí.

Tabulka 2 Korelační vztahy bez časového zpoždění dopravní intenzity

	větrná orientace	rychlost větru [m/s]	teplota [°C]	vlhkost [%]	tlak [hPa]	maximální směr větru [°]	maximální rychlost větru [m/s]	Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	počet vozidel
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,14	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,12	-0,43	-0,25	0,37	0,18	-0,03	-0,55	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,08	-0,44	-0,35	0,50	0,17	0,00	-0,58	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,16	0,37	-0,36	-0,03	-0,14	0,25	-0,06	-0,19	1,00

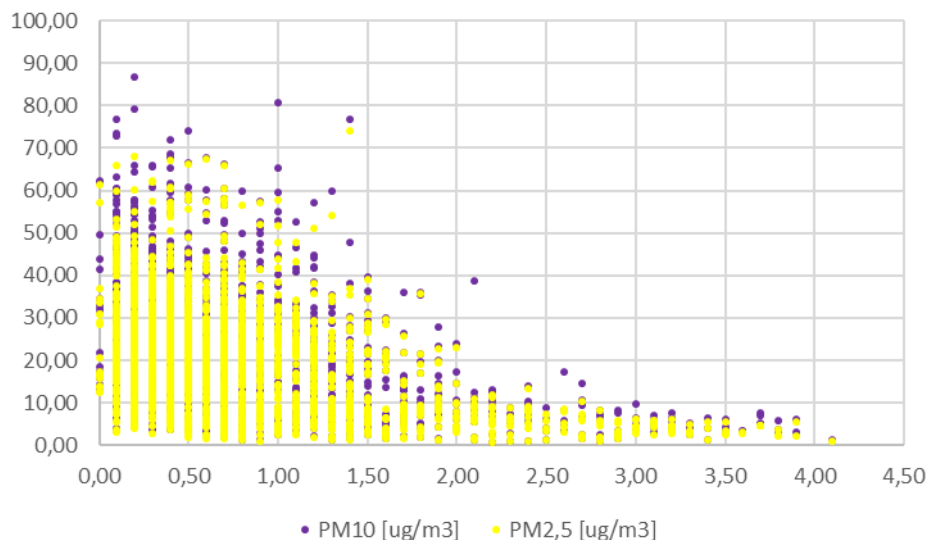
(zdroj: vlastní)

Nejsilnější vzájemná korelace byla zaznamenána mezi koncentracemi PM_{10} a $PM_{2,5}$ ($r = 0,95$), což potvrzuje, že obě frakce suspendovaných částic se zpravidla vyskytují za podobných podmínek a pravděpodobně pocházejí ze společných nebo úzce souvisejících zdrojů. Tento výsledek odpovídá současným poznatkům odborné literatury, která na tuto souvislost opakovaně poukazuje.

Dopravní intenzita, vyjádřená počtem projíždějících vozidel za hodinu, nevykazuje v tomto případě výraznější korelaci s koncentracemi PM_{10} ($r = -0,06$) ani $PM_{2,5}$ ($r = -0,19$). Tyto velmi slabé negativní korelace naznačují, že vztah mezi aktuálním dopravním zatížením a okamžitými koncentracemi suspendovaných částic není lineární a může být ovlivněn dalšími faktory, jako je okamžitá meteorologická situace, typ emisních zdrojů, poloha stanice vůči komunikaci či časová setrvačnost tvorby a transportu částic. Tento výsledek ukazuje na nutnost komplexního přístupu, který zohlední i zpožděné účinky, kombinace více proměnných nebo potřebu podrobnější analýzy dat včetně časových posunů.

Z meteorologických proměnných vykazuje nejvýraznější negativní korelaci průměrná rychlost větru, a to s koncentracemi PM_{10} ($r = -0,43$) a $PM_{2,5}$ ($r = -0,44$). Tento výsledek potvrzuje předpoklad, že vyšší rychlost proudění vzduchu napomáhá rozptýlu suspendovaných částic a snižuje jejich lokální koncentrace v ovzduší. Slabší vítr naopak

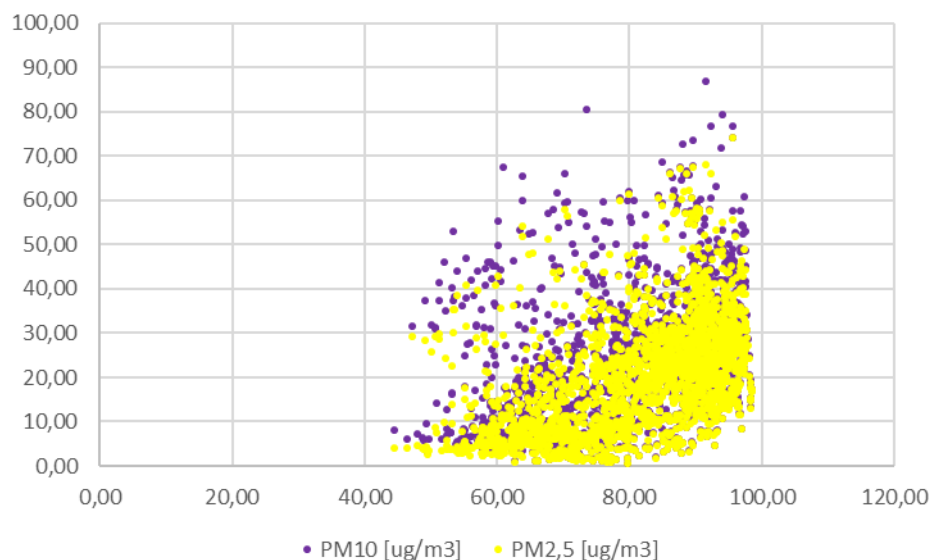
přispívá k jejich hromadění, zvláště v městských zástavbách s omezeným větráním. Uvedené hodnoty dokládají, že meteorologické podmínky, zejména proudění vzduchu, hrají významnou roli při formování imisní zátěže v dopravně zatížených lokalitách.



Graf 3 Závislost koncentrací PM_{10} a $PM_{2,5}$ na relativní vlhkosti vzduchu

(zdroj: vlastní)

Relativní vlhkost vzduchu vykazuje kladnou korelaci zejména s koncentrací $PM_{2,5}$ ($r = 0,50$), což může být důsledkem vyšší tvorby sekundárních aerosolů při zvýšené vlhkosti, ale i zhoršeného rozptylu částic za podmínek vyššího nasycení vzduchu vodní parou.



Graf 4 Závislost koncentrací PM_{10} a $PM_{2,5}$ na průměrné rychlosti větru

(zdroj: vlastní)

Ostatní meteorologické faktory, jako je teplota vzduchu nebo atmosférický tlak, nevykazují s koncentracemi suspendovaných částic významné korelace, což naznačuje, že v analyzovaném souboru dat jejich vliv nebyl klíčový.

Výsledky této analýzy potvrzují, že i bez časového zpoždění existují v městském prostředí Brna měřitelné a interpretovatelné vztahy mezi dopravní aktivitou, meteorologickými podmínkami a imisní zátěží. Tyto poznatky mohou sloužit jako podklad pro návrh opatření na zlepšení kvality ovzduší, například formou řízení dopravy či úprav městské infrastruktury s cílem zlepšit větrání exponovaných oblastí.

11.1.2 Vliv dopravy na suspendované částice s časovým posunem o 3 hodiny

Pro ověření možného opožděného dopadu dopravy na kvalitu ovzduší byla provedena korelační analýza s časovým posunem o tři hodiny. Tento přístup vychází z předpokladu, že vliv emisí z dopravy na koncentrace suspendovaných částic se nemusí projevit okamžitě, ale s určitým zpožděním v důsledku disperzních a akumulačních procesů v městském prostředí.

Tabulka 3 Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 3 hodiny

	větrná orientace	rychlost větru [m/s]	teplota [°C]	vlhkost [%]	tlak [hPa]	maximální směr větru [°]	maximální rychlost větru [m/s]	Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	počet vozidel
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,14	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,16	-0,37	-0,20	0,27	0,20	-0,06	-0,49	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,15	-0,40	-0,27	0,36	0,20	-0,05	-0,53	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,15	0,37	-0,36	-0,03	-0,14	0,25	0,00	-0,11	1,00

(zdroj: vlastní)

Výsledky ukazují, že vztah mezi dopravní intenzitou a koncentracemi suspendovaných částic je při tříhodinovém posunu velmi slabý, případně zcela nevýznamný. V případě PM₁₀ byla zjištěna pouze slabá negativní korelace $r = -0,11$, zatímco pro PM_{2,5} se neprokázal žádný lineární vztah ($r = 0,00$). To naznačuje, že v dané lokalitě a časovém rámci nedochází k systematickému opožděnému nárůstu koncentrací suspendovaných částic v návaznosti na intenzitu dopravy.

Výsledky korelační analýzy ukazují, že časový posun meteorologických proměnných o tři hodiny neměl významný vliv na charakter a sílu vztahů s koncentracemi suspendovaných částic PM_{10} a $PM_{2,5}$. Korelace zůstaly ve srovnatelné úrovni jako při hodnocení bez časového posunu, přičemž nejvýraznější vazby byly opět pozorovány u průměrné rychlosti větru, které si uchovaly středně silnou negativní korelaci. Ostatní meteorologické faktory, jako relativní vlhkost, teplota nebo atmosférický tlak, nevykázaly žádné podstatné změny v síle ani směru korelačního vztahu. Tato skutečnost naznačuje, že vliv meteorologických podmínek na koncentrace suspendovaných částic se v dané lokalitě a časovém rámci neprojevuje se zřetelným zpožděním a působí spíše v reálném čase.

Tyto výsledky mohou být ovlivněny dalšími faktory, jako je proměnlivost meteorologických podmínek, orientace zástavby či charakter dopravního proudu. Přesto absence významného korelačního vztahu naznačuje, že alespoň v tomto konkrétním případě není opožděný vliv dopravy na koncentrace PM zásadní. Analýza tak přispívá k přesnějšímu pochopení dynamiky šíření škodlivin v městské atmosféře a poukazuje na potřebu kombinovat více metod a proměnných při vyhodnocování dopravního vlivu na kvalitu ovzduší.

11.1.3 Vliv dopravy na suspendované částice s časovým posunem o 6 hodiny

Za účelem prověření, zda se účinky dopravy na koncentrace suspendovaných částic mohou projevit až s větším časovým odstupem, byla provedena korelační analýza s šestihodinovým posunem koncentrací PM_{10} a $PM_{2,5}$. Tento přístup zohledňuje možnost, že vliv dopravních emisí na kvalitu ovzduší nemusí být bezprostřední, ale může se projevit se zpožděním způsobeným například akumulací znečištění nebo jeho rozptylem v závislosti na aktuálních atmosférických podmínkách. Cílem analýzy bylo zjistit, zda existují výraznější vazby mezi dopravní aktivitou a koncentracemi částic v ovzduší po tomto časovém posunu.

Tabulka 4 Korelační vztahy při šestihodinovém posunu dopravní intenzity

	větrná orientace	rychlost větru [m/s]	teplota [°C]	vlhkost [%]	tlak [hPa]	maximální směr větru [°]	maximální rychlost větru [m/s]	Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	počet vozidel
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,13	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,17	-0,32	-0,16	0,20	0,23	-0,07	-0,44	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,19	-0,33	-0,18	0,23	0,23	-0,08	-0,45	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,16	0,37	-0,36	-0,03	-0,14	0,25	0,02	-0,01	1,00

(zdroj: vlastní)

Z hlediska vlivu dopravní zátěže na koncentrace suspendovaných částic nebyly při časovém posunu o šest hodin zjištěny významné korelace. Hodnota Pearsonova korelačního koeficientu mezi intenzitou dopravy a koncentrací PM₁₀ činí pouze $r = 0,02$, což značí prakticky nulový vztah. V případě jemnější frakce PM_{2,5} byla dokonce identifikována slabá negativní korelace ($r = -0,01$). Tyto výsledky nepodporují hypotézu o existenci opožděného účinku dopravních emisí na koncentrace suspendovaných částic v dané lokalitě. Absence výraznější vazby může být důsledkem komplexních rozptylových a akumulčních procesů v městském prostředí, charakteru místní dopravní infrastruktury, či přítomnosti jiných významných emisních zdrojů, které snižují přímý vliv dopravy na koncentrace PM_{2,5}.

Meteorologické podmínky si i při šestihodinovém posunu zachovávají konzistentní vliv na koncentrace suspendovaných částic. Průměrná rychlost větru vykazuje středně silnou negativní korelaci s koncentrací PM₁₀ ($r = -0,32$) a slabší negativní korelaci s PM_{2,5} ($r = -0,18$). Tento vztah potvrzuje rozptylovou funkci větru, kdy vyšší rychlost proudění napomáhá snižování koncentrací částic v ovzduší.

Relativní vlhkost vzduchu si udržuje slabě pozitivní vztah s oběma frakcemi (PM₁₀: $r = 0,20$; PM_{2,5}: $r = 0,23$), což může být důsledkem komplexních atmosférických procesů, které za vyšší vlhkosti podporují tvorbu nebo setrvávání jemných částic.

11.1.4 Vliv dopravy na suspendované částice s časovým posunem o 12 hodin

S ohledem na skutečnost, že vliv emisí z dopravy na koncentrace suspendovaných částic se může projevit až s určitým zpožděním, byla provedena korelační analýza s časovým posunem o 12 hodin. Tento interval již představuje výrazný časový odstup, který přesahuje běžně předpokládané horizonty pro akumulaci a transport znečišťujících látek v městském prostředí. Cílem bylo ověřit, zda se účinek dopravní zátěže může projevit i v delším časovém měřítku, např. v důsledku noční akumulace nebo změn v meteorologických podmínkách.

Tabulka 5 Korelační vztahy při dvanáctihodinovém posunu dopravní intenzity

	větrná orientace	rychlost větru [m/s]	teplota [°C]	vlhkost [%]	tlak [hPa]	maximální směr větru [°]	maximální rychlost větru [m/s]	Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	počet vozidel
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,14	1,00							
vlhkost [%]	-0,07	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,18	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,14	-0,03	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,07	0,82	0,31	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,10	-0,27	-0,22	0,21	0,28	-0,03	-0,38	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,14	-0,26	-0,22	0,21	0,29	-0,06	-0,37	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,20	0,15	0,37	-0,35	-0,03	-0,14	0,24	-0,03	0,04	1,00

(zdroj: vlastní)

Ve vztahu k dopravní zátěži byl při dvanáctihodinovém posunu zaznamenán obdobný výsledek jako při korelaci po šestihodinovém posunu. Korelační koeficient mezi intenzitou dopravy a koncentrací PM₁₀ dosáhl hodnoty $r = -0,03$, zatímco pro PM_{2,5} činil $r = 0,04$. Tyto hodnoty potvrzují, že účinek dopravy se projevuje spíše ve kratším časovém horizontu a při dvanáctihodinovém zpoždění již tento vliv výrazně slábne.

Korelace mezi koncentracemi PM₁₀ a PM_{2,5} zůstává i nadále velmi silná ($r = 0,95$), což potvrzuje, že obě frakce vykazují obdobné chování bez ohledu na časový posun. Meteorologické podmínky se při tomto časovém posunu nijak zásadně nemění. Průměrná rychlost větru si udržuje středně silný negativní vztah ke koncentracím PM₁₀ ($r = -0,27$) i PM_{2,5} ($r = -0,26$), což potvrzuje její významnou roli při rozptylu suspendovaných částic. Vlhkost vzduchu rovněž koreluje s koncentracemi obou frakcí záporně ($r = -0,21$), což odpovídá předpokladu, že vyšší vlhkost může napomáhat snižování koncentrací částic prostřednictvím jejich sedimentace či aglomerace.

11.2 Vyhodnocení vlivu dopravy a meteorologických podmínek na koncentrace suspendovaných částic

Na základě provedené korelační analýzy bylo možné posoudit jednotlivé meteorologické faktory a intenzitu dopravy ovlivňují koncentrace suspendovaných částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ na automatické imisní stanici Svatoplukova v období od 4. listopadu 2025 do 31. ledna 2025. Výpočty využívající Pearsonův korelační koeficient byly realizovány bez časového posunu a s časovým posunem dopravních dat o 3, 6 a 12 hodin. Byla testována i jiná časová zpoždění dle přílohy I, která však nepřinesla odlišné výsledky a potvrdila trend pozorovaný u hlavních analyzovaných intervalů.

Koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ vykazovaly ve všech variantách velmi silnou vzájemnou korelaci ($r = 0,95$), což potvrzuje jejich obdobné chování a společný zdroj. Z meteorologických faktorů se jako nejvýznamnější proměnná ukázala průměrná rychlost větru, která ve všech verzích matice vykazovala středně silnou až silnou negativní korelaci s koncentracemi PM. Tento vztah poukazuje na význam rozptylových podmínek, že při silnějším větru dochází k rychlejšímu rozptýlení částic a tím ke snížení jejich koncentrací v ovzduší. Vlhkost vzduchu rovněž zpravidla negativně korelovala s PM, zejména s $PM_{2,5}$, což může souviset s jejich srážením nebo aglomerací za vyšší vlhkosti. Oproti tomu teplota a tlak vzduchu nevykazovaly žádné stabilní nebo výrazné korelace s koncentracemi PM, a jejich vliv tak nebyl prokázán jako významný.

Významným cílem analýzy bylo zjistit, zda se vliv dopravy na kvalitu ovzduší projevuje s časovým zpožděním. Bez časového posunu byla korelace mezi počtem vozidel a koncentracemi PM velmi nízká (PM_{10} : $r = -0,06$; $PM_{2,5}$: $r = -0,19$), což naznačovalo, že dopad dopravní zátěže na znečištění nemusí být okamžitý. Při časovém posunu o 3 hodiny došlo k mírnému nárůstu korelace s PM_{10} ($r = -0,11$), zatímco u PM_{10} zůstala nulová. Při šestihodinovém posunu se vztah mezi intenzitou dopravy a $PM_{2,5}$ o téměř neprojevil ($r = 0,02$) a korelace s $PM_{2,5}$ zůstala velmi slabá ($r = -0,01$). Rovněž při posunu o 12 hodin zůstaly korelační koeficienty na nízké úrovni (PM_{10} : $r = -0,03$; $PM_{2,5}$: $r = 0,04$), což signalizuje slábnoucí vliv dopravy s rostoucím časovým odstupem.

Z výsledků vyplývá, že se vliv dopravy na koncentrace suspendovaných částic neprojevuje výrazně ani bezprostředně, ani s testovanými časovými zpožděními. Výsledné korelační vztahy zůstávají slabé a nevýrazné napříč různými posuny, což může být způsobeno kombinací více vlivů, včetně meteorologických podmínek, charakteru dopravní

zátěže, nebo skladby emisních zdrojů v lokalitě. Tato skutečnost podtrhuje komplexnost interakcí mezi dopravou a kvalitou ovzduší a ukazuje na nutnost doplnění dalších analytických metod, které by mohly zpřesnit identifikaci příčinných vztahů mezi proměnnými.

12 MODELOVÉ PŘÍKLADY EXPOZICE A APLIKACE METODY

HHRA

V rámci praktické aplikace metody HHRA (Human Health Risk Assessment) byly definovány tři modelové případy osob, které se dlouhodobě pohybují nebo trvale pobývají v okolí dopravně zatížené městské křižovatky Rokytova × Svatoplukova v Brně. Tato lokalita se nachází v těsné blízkosti automatické imisní stanice Svatoplukova, která poskytuje podrobná data o koncentracích znečišťujících látek v ovzduší, zejména suspendovaných částic PM_{10} a $PM_{2.5}$. Znečištění v této oblasti je typické pro městské nebodové dopravní zdroje, jako jsou otěry pneumatik a brzd, víření prachu (resuspenze) z povrchu komunikací. Metodika vychází z rámce HHRA, který zahrnuje čtyři základní kroky: identifikaci nebezpečí, hodnocení dávky–účinku, hodnocení expozice a charakterizaci rizika. Na základě dostupných dat o koncentracích znečišťujících látek a charakteristik expozice byly vytvořeny tři odlišné modelové případy, které zohledňují různé faktory ovlivňující míru zdravotního rizika, jako jsou věk, délka pobytu v lokalitě, fyziologické parametry či chování osob.

Jednotlivé scénáře jsou následně analyzovány pomocí kvantitativních výpočtů zdravotní zátěže a jejich výsledky slouží k ilustraci možných dopadů dlouhodobé expozice částicím PM na různé skupiny populace v podmínkách městského ovzduší.

12.1 Modelový subjekt č. 1: Dospělý muž

První z analyzovaných scénářů představuje zdravého dospělého muže ve věku 50 let, který pracuje na administrativní pozici ve vojenském objektu nacházejícím se přímo v oblasti s vysokým dopravním zatížením. Tento muž byl vystaven škodlivým látkám přibližně 5 hodin denně, a to po dobu 15 let. Pracovní prostor je větrán přirozeně (okna jsou často otevřená) což zvyšuje míru přímé expozice venkovnímu ovzduší. Inhalační cesta expozice je hlavní, přičemž relevantní zdravotní rizika zahrnují astma, ischemickou chorobu srdeční, diabetes mellitus 2. typu, rakovinu plic a zvýšenou úmrtnost. Tento případový model je dále analyzován s cílem kvantifikace zdravotního rizika spojeného s dlouhodobou expozicí PM.

Identifikace nebezpečí (Hazard Identification)

V rámci posouzení zdravotního rizika pomocí metody Human Health Risk Assessment byl jako nebezpečný faktor identifikován vdechovaný prach tvořený suspendovanými částicemi (PM_{10} a $PM_{2.5}$), pocházející především z nevýfukových emisí dopravy, mechanické

opotřebení z otěrů pneumatik, brzd a resuspenze prachu v důsledku intenzivního silničního provozu. Suspendované částice obsahují toxické složky, jako jsou těžké kovy (např. měď, železo, zinek), polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), mikroplasty a další sloučeniny s prokázaným nebo pravděpodobným karcinogenním účinkem.

Na základě odborné literatury a závěrů Světové zdravotnické organizace (WHO, 2021) patří mezi zdravotní účinky spojené s expozicí suspendovaným částicím PM zvýšené riziko vzniku astmatu a dalších respiračních onemocnění, ischemické choroby srdeční a dalších kardiovaskulárních poruch, diabetu mellitus 2. typu, rakoviny plic a celkově zvýšené úmrtnosti. Tyto negativní dopady jsou přímo úměrné koncentraci částic v ovzduší i délce a intenzitě expozice. Za zvláště zranitelné skupiny jsou považovány osoby s chronickými onemocněními, senioři a osoby dlouhodobě vystavené městskému znečištění což tyto charakteristiky naplňuje i modelový subjekt hodnocení.

Hodnocení dávky–účinku (Dose–Response Assessment)

V rámci HHRA byla vyhodnocena míra přebytečného zdravotního rizika (ER – Excess Risk), které vyjadřuje relativní navýšení pravděpodobnosti vzniku daného onemocnění v důsledku vyšší expozice ve srovnání s referenčními podmínkami. Výpočet ER byl zvolen pro dvě diagnózy: ischemické choroby srdeční (ICHS) a diabetes mellitus 2. typu.

Pro hodnocení přebytečného rizika byla použita průměrná koncentrace $PM_{2,5}$ ve výši $20,4 \mu g/m^3$, získaná z měření prováděného v dané lokalitě v období od listopadu 2024 do ledna 2025. Referenční koncentrace (C_0) stanovená Světovou zdravotnickou organizací (WHO, 2021) činí $5 \mu g/m^3$. Relativní rizika (RR) pro obě zdravotní diagnózy byla převzata z odborných studií, které předpokládají lineární vztah mezi nárůstem koncentrace $PM_{2,5}$ a zdravotními dopady. Hodnoty β , které vyjadřují míru změny relativního rizika na jednotku koncentrace, byly odvozeny na základě odborných studií předpokládajících exponenciální vztah mezi expozicí $PM_{2,5}$ a zdravotními dopady. Pro ischemickou chorobu srdeční (ICHS) byla použita hodnota $\beta = 0,000915$ (Chen & Hoek, 2020) a pro diabetes mellitus 2. typu $\beta = 0,00065$ (Orellano et al., 2020).

Ischemická choroba srdeční:

$$ER = \exp[\beta \times (C - C_0)] - 1 = \exp[0,000915 \times (20,4 - 5)] - 1 \approx 1,42\% \quad (6)$$

Dosažením do rovnice vychází přebytečné riziko pro ICHS přibližně na 1,42 %, což naznačuje zvýšené zdravotní riziko spojené s dlouhodobou expozicí zvýšeným koncentracím jemných suspendovaných částic.

Diabetes mellitus 2. typu:

$$ER = \exp[\beta \times (C - C_0)] - 1 = \exp[0,00065 \times (20,4 - 5)] - 1 \approx 1,006\% \quad (7)$$

Výpočet ukázal přebytečné riziko ve výši do 2 %, což potvrzuje mírně zvýšené riziko výskytu těchto onemocnění v důsledku dlouhodobého působení zvýšených koncentrací PM_{2,5} v ovzduší.

Tyto hodnoty představují relativní nárůst pravděpodobnosti onemocnění oproti referenčnímu stavu. Výsledky ukazují na významné zdravotní dopady dlouhodobé expozice suspendovaným částicím z dopravy.

Hodnocení expozice (Exposure Assessment)

Pro kvantitativní hodnocení expozice byly využity specifické parametry modelového subjektu. Hodnocený muž má hmotnost 85 kg a pracuje 5 hodin denně po dobu 260 dní v roce (5 dní týdně) po dobu 15 let. Je vystaven koncentraci PM_{2,5} ve výši 20,4 µg/m³, přičemž dýchá s frekvencí 10 dechů za minutu a objemem plic 1,2 litrů na den. Inhalační rychlost (IR) byla stanovena na 0,72 m³/hod. Doba expozice (ET) činí 5 hod/den, frekvence expozice (EF) je 260 dní/rok, doba expozice (ED) 15 let a průměrná doba expozice (AT) pro nekarcinogenní účinky je 5475 dní

Průměrná denní dávka:

$$ADD = \frac{(C \times IR \times ET \times EF \times ED)}{(BW \times AT)} \quad (8)$$

$$ADD = \frac{(20,4 \times 0,72 \times 5 \times 260 \times 15)}{(85 \times 5475)} = 0,6155 \text{ µg/kg/den}$$

Průměrná denní dávka (ADD), vztahovaná na celé období expozice, činí zaokrouhleně 0,6155 µg/kg/den.

Chronická denní dávka:

Dále byla vypočtena chronická denní dávka (CDD), která vyjadřuje množství látky vdechnuté za den během celého období expozice.

$$CDD = \frac{(C \times IR \times ET \times EF)}{BW} = \frac{(20,4 \times 0,72 \times 5 \times 260)}{85} = 224,64 \quad (9)$$

Chronická denní dávka vztahovaná na dny skutečné expozice činí 224,64 µg/kg/den.

Tato výrazně vyšší hodnota CDD je očekávaná, neboť nezohledňuje období, kdy subjekt expozici nepodléhá. CDD poskytuje realistický odhad dávky vdechované v den, kdy k expozici skutečně dochází, zatímco ADD slouží jako ukazatel průměrné celoživotní expozice. Tyto informace slouží jako klíčový vstup do závěrečného hodnocení zdravotních rizik.

Charakterizace rizika (Risk Characterization)

Pro posouzení nekarcinogenních zdravotních rizik byla vypočtena hodnota HQ (hazard quotient), která slouží k porovnání průměrné denní dávky s referenční dávkou (RfD). Vzhledem k tomu, že PM_{2,5} je směs látek a nemá jednotnou toxikologickou referenční hodnotu, je RfD odvozena z epidemiologických dat, jak to činí WHO či US EPA. Pro HQ výpočet byla použita hodnota 5 µg/kg/den, jak stanovuje studie (de Oliveira, Ignotti a Hacon, 2012). Výsledná hodnota HQ <1 značí přijatelnou úroveň expozice, zatímco HQ ≥ 1 indikuje potenciální zdravotní riziko a poukazuje na potřebu zvážit ochranná opatření nebo intervence v pracovním prostředí (WHO, 2021; US EPA, 2023).

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} = \frac{0,6155}{5} = 0,1231 \quad (10)$$

Výsledná hodnota HQ = 0,1231 je výrazně nižší než 1, což znamená, že expozice modelového subjektu suspendovaným částicím PM_{2,5} nepředstavuje významné zdravotní riziko. Tato hodnota naznačuje, že pravděpodobnost výskytu negativních zdravotních účinků v důsledku inhalační expozice je nízká a nepřekračuje mezní hodnoty stanovené referenční dávkou (RfD).

12.2 Modelový subjekt č. 2: Dítě

Druhý z analyzovaných scénářů představuje zdravé dítě ve věku 7 let, které tráví podstatnou část dne venku v oblasti s vysokou intenzitou silniční dopravy. Dítě je tomuto znečištěnému ovzduší vystaveno přibližně 7 hodin denně, a to každodenně po dobu tří let. Vzhledem k dlouhodobému pobytu venku v blízkosti frekventované komunikace dochází k pravidelné inhalační expozici suspendovaným částicím $PM_{2,5}$. Tento subjekt váží přibližně 23 kg a jeho dýchací aktivita je vyšší než u dospělého člověka, což zvyšuje absorpci škodlivých látek do organismu.

Identifikace nebezpečí (Hazard Identification)

Rizikovou látkou jsou suspendované částice $PM_{2,5}$ obsahují nebezpečné složky jako těžké kovy, mikroplasty a PAHs, které mají negativní vliv na zdraví dětí, zejména na respirační trakt, rozvoj imunitního systému a neurovývojové procesy.

Hodnocení dávky–účinku (Dose–Response Assessment)

V rámci druhého scénáře bylo vyhodnoceno přebytečné zdravotní riziko (ER – Excess Risk), které vyjadřuje relativní navýšení pravděpodobnosti vzniku vybraných onemocnění v důsledku zvýšené koncentrace suspendovaných částic $PM_{2,5}$ ve venkovním ovzduší. Výpočet ER byl zaměřen na dvě zdravotní diagnózy, které se u dětí v souvislosti s expozicí jemnému prachu vyskytují nejčastěji, tedy astma a respirační onemocnění a zvýšená dětská úmrtnost. Výpočty vycházely z předpokladu lineárního vztahu mezi koncentrací $PM_{2,5}$ a zdravotními dopady, jak uvádějí odborné studie a doporučení Světové zdravotnické organizace.

Pro účely hodnocení přebytečného zdravotního rizika byla použita průměrná koncentrace suspendovaných částic $PM_{2,5}$ ve výši 20,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Referenční koncentrace (C_0), tedy hladina považovaná za relativně bezpečnou, činí 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ podle doporučení Světové zdravotnické organizace (WHO, 2021). Relativní rizika (RR) pro obě vybrané diagnózy byla převzata z mezinárodních studií, které potvrzují souvislost mezi dlouhodobou expozicí $PM_{2,5}$ a zvýšeným výskytem těchto onemocnění. Hodnoty β byly odvozeny na základě odborných studií pro astma a respirační onemocnění byla použita hodnota $\beta = 0,0036$ (Orellano et al., 2020) a pro zvýšenou dětskou úmrtnost $\beta = 0,135$ de (Oliveira et al. (2012).

Astma a respirační onemocnění:

$$ER = \exp[\beta \times (C - C_0)] - 1 = \exp[0,0036 \times (20,4 - 5)] - 1 \approx 5,7\% \quad (11)$$

Dětská úmrtnost:

$$ER = \exp[\beta \times (C - C_0)] - 1 = \exp[0,135 \times (20,4 - 5)] - 1 \approx 7\% \quad (12)$$

Výsledky ukazují, že nejvyšší přebytné riziko bylo zaznamenáno u ukazatele dětské úmrtnosti (7 %), následované astmatem a respiračními onemocněními (5,7 %). Tyto hodnoty potvrzují zvýšenou zdravotní zátěž dětského organismu při dlouhodobé expozici zvýšeným koncentracím PM_{2,5} ve venkovním ovzduší, zejména v městském prostředí s vysokou dopravní zátěží.

Hodnocení expozice (Exposure Assessment)

Hodnocený modelový subjekt je sedmileté dítě s má tělesnou hmotnost 23 kg a tráví denně 7 hodin venkovními aktivitami, každý den v týdnu po dobu 3 let. Respirační parametry odpovídají věku dítěte: dechová frekvence činí 20 dechů za minutu a objem plic 0,4 litru na jeden dech. Z těchto údajů vyplývá inhalační rychlost (IR) 0,48 m³/hod. Výpočet průměrné denní dávky (ADD) byl proveden na základě následujících parametrů: koncentrace škodliviny v ovzduší (C) = 20,4 µg/m³, doba expozice (ET) = 7 hod/den, frekvence expozice (EF) = 365 dní/rok, doba trvání expozice (ED) = 3 roky, tělesná hmotnost (BW) = 23 kg a průměrná doba expozice (AT) = 1095 dní.

Průměr denní dávky (ADD)

$$ADD = \frac{(C \times IR \times ET \times EF \times ED)}{(BW \times AT)} =$$

$$ADD = \frac{(20,4 \times 0,48 \times 7 \times 365 \times 3)}{(23 \times 1095)} = 2,98 \quad (13)$$

Průměrná denní dávka (ADD), vztahovaná na celé období života, činí zaokrouhleně 2,98 µg/kg/den.

Chronická denní dávka (CDD)

Dále byla vypočtena chronická denní dávka (CDD), která vyjadřuje množství látky vdechnuté za den během celého období expozice, přičemž není vztažena na průměr života:

$$CDD = \frac{(C \times IR \times ET \times EF)}{BW} = \frac{(20,4 \times 0,48 \times 7 \times 365)}{23} = 1087,76 \quad (14)$$

Chronická denní dávka (CDD), vztahovaná na dny skutečné expozice, činí 1087,76 µg/kg/den.

Vyšší hodnota CDD je očekávaná, protože nezohledňuje dny bez expozice. Poskytuje tak realistický odhad dávky v den, kdy k expozici skutečně dochází, zatímco ADD slouží jako ukazatel průměrné denní zátěže po celé hodnocené období.

Charakterizace rizika (Risk Characterization)

Na základě předchozích výpočtů bylo provedeno vyhodnocení potenciálního zdravotního rizika prostřednictvím ukazatele hazard quotient (HQ). Zatímco hodnota HQ menší než 1 bývá interpretována jako přijatelná, překročení této hodnoty signalizuje možnost vzniku nepříznivých zdravotních účinků, zejména u citlivých skupin populace, jakou jsou právě děti. Pro HQ výpočet byla použita hodnota 5 µg/kg/den, jak stanovuje studie (de Oliveira, Ignotti a Hacon, 2012).

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} = \frac{2,98}{5} = 0,59 \quad (15)$$

Výsledná hodnota HQ = 0,59 se nachází mírně pod doporučenou mezní hodnotou 1, což naznačuje potenciálně zvýšené zdravotní riziko pro modelové dítě. Tato hodnota odráží zvýšenou úroveň expozice v důsledku dlouhodobého denního pobytu venku a vyšší inhalační aktivity, která je u dětí spojena s větší fyziologickou citlivostí na toxické látky obsažené v suspendovaných částicích.

12.3 Modelový subjekt č. 3: Žena – senior

Třetí z analyzovaných scénářů představuje ženu ve věku 68 let, která dlouhodobě pobývá ve městě v oblasti s hustou dopravou. Tato seniorka tráví dvakrát týdně přibližně dvě hodiny sezením na lavičce před svým domem, který se nachází v blízkosti frekventované komunikace. Expozice probíhá vdechováním suspendovaných částic PM_{2,5} v otevřeném venkovním prostoru. Zátěž má charakter fyzikálního, nebodového znečištění vzduchu,

přičemž dominantní cestou expozice je inhalační absorpce. Hodnocené období činí 7 let pravidelného pobytu ve venkovním prostředí. Vzhledem ke svému věku spadá hodnocená osoba mezi zranitelné skupiny obyvatelstva, u nichž může být expozice částicím $PM_{2,5}$ provázena zvýšeným rizikem vzniku závažných zdravotních komplikací, zejména respiračních onemocnění a zvýšené celkové úmrtnosti. Tento případový model je dále analyzován s cílem kvantifikovat zdravotní riziko spojené s dlouhodobou inhalační expozicí suspendovaným částicím v městském prostředí.

Identifikace nebezpečí (Hazard Identification)

Rizikovým faktorem je znečištění ovzduší suspendovanými částicemi $PM_{2,5}$, které vznikají zejména z nevýfukových emisí dopravy, včetně otěrů brzd, pneumatik, abraze vozovky a resuspenze usazeného prachu. U osob vyššího věku je pozorována vyšší náchylnost k negativním zdravotním dopadům expozice z důvodu snížené fyziologické rezervy. Mezi nejčastější dopady patří chronická respirační onemocnění, zhoršená funkce plic a zvýšené riziko úmrtí v důsledku dlouhodobé expozice $PM_{2,5}$.

Hodnocení dávky–účinku (Dose–Response Assessment)

V rámci třetího modelového scénáře byla zhodnocena pravděpodobnost vzniku vybraných zdravotních komplikací v důsledku dlouhodobé expozice suspendovaným částicím $PM_{2,5}$. Výpočet přebytkového zdravotního rizika (ER – Excess Risk) byl zaměřen na dvě diagnózy: celkovou úmrtnost a respirační onemocnění. Hodnocení vychází z předpokladu lineárního vztahu mezi koncentrací $PM_{2,5}$ v ovzduší a výskytem zdravotních dopadů, jak je popsáno v odborné literatuře a doporučeních WHO. Pro výpočet byly využity naměřené hodnoty koncentrace $PM_{2,5}$ ve výši $20,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a referenční hodnota $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hodnoty β byly odvozeny na základě odborných studií pro celkovou úmrtnost byla použita hodnota $\beta = 0,00129$ (Orellano et al., 2020) a pro respirační onemocnění $\beta = 0,00119$ (Orellano et al., 2020; WHO, 2021).

Celková úmrtnost:

$$ER = \exp[\beta \times (C - C_0)] - 1 = \exp[0,00208 \times (20,4 - 5)] - 1 \approx 2\% \quad (16)$$

Respirační onemocnění:

$$ER = \exp[\beta \times (C - C_0)] - 1 = \exp[0,00208 \times (20,4 - 5)] - 1 \approx 1,85\% \quad (17)$$

Nejvyšší přebytkové riziko bylo zaznamenáno u celkové úmrtnosti (2,00 %), následované respiračními onemocněními (1,85 %). Tyto výsledky poukazují na zvýšenou

zdravotní zátěž pro seniorskou populaci při dlouhodobé expozici jemným suspendovaným částicím v městském ovzduší.

Hodnocení expozice (Exposure Assessment)

Pro kvantitativní hodnocení expozice byly využity specifické parametry modelového subjektu. Hodnocená žena ve věku 68 let má tělesnou hmotnost 65 kg a pravidelně tráví čas ve venkovním prostředí s vysokou dopravní zátěží. Expozice probíhá 2 hodiny denně, dvakrát týdně, tedy 104 dny v roce, a to po dobu 7 let. Seniorka je vystavena koncentraci $PM_{2,5}$ ve výši $20,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Inhalační rychlost byla stanovena na základě dechové frekvence 14 dechů za minutu a objemu plic 0,5 litru na jeden dech, což odpovídá $0,42 \text{ m}^3/\text{hod}$. Celková průměrná doba expozice (AT) činí 2555 dní.

Průměr denní dávky (ADD)

$$ADD = \frac{(C \times IR \times ET \times EF \times ED)}{(BW \times AT)} \quad (18)$$

$$ADD = \frac{(20,4 \times 0,42 \times 2 \times 104 \times 7)}{(65 \times 2555)} = 0,075$$

Průměrná denní dávka (ADD), vztahovaná na celé období života, činí zaokrouhleně $0,075 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{den}$.

Chronická denní dávka (CDD)

Dále byla vypočtena chronická denní dávka (CDD), která vyjadřuje množství látky vdechnuté za den během celého období expozice, přičemž není vztažena na průměr života:

$$CDD = \frac{(C \times IR \times ET \times EF)}{BW} = \frac{(20,4 \times 0,42 \times 2 \times 104)}{65} = 27,41 \quad (19)$$

Chronická denní dávka (CDD), vztahovaná na dny skutečné expozice, činí $27,41 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{den}$.

Charakterizace rizika (Risk Characterization)

Na základě předchozích výpočtů byla provedena charakterizace zdravotního rizika prostřednictvím ukazatele hazard quotient (HQ). Tento bezrozměrný index slouží k posouzení, zda je průměrná denní dávka přijatelná z hlediska možného dopadu na lidské zdraví. Hodnota HQ nižší než 1 bývá interpretována jako přijatelná, zatímco hodnota rovna nebo vyšší než 1 upozorňuje na možnost nepříznivých zdravotních účinků, zejména

u citlivých skupin populace, jakou senioři bezpochyby jsou. Pro HQ výpočet byla použita hodnota 5 $\mu\text{g/kg/den}$, jak stanovuje studie (de Oliveira, Ignotti a Hacon, 2012).

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} = \frac{0,075}{5} = 0,015 \quad (20)$$

Výsledná hodnota $HQ = 0,015$ je výrazně nižší než referenční mezní hodnota 1, což znamená, že expozice modelového subjektu (seniorské ženy) není vystaven zdravotním rizikům. Přesto je nutné brát v úvahu dlouhodobou zranitelnost starší populace, kumulativní účinek jiných stresorů a skutečnost, že i nízká úroveň expozice může mít při chronickém působení nepříznivé zdravotní důsledky. Výsledek tak podtrhuje důležitost cílené ochrany ohrožených skupin, zejména seniorů žijících v prostředí se zhoršenou kvalitou ovzduší.

12.4 Zhodnocení zdravotních dopadů dlouhodobé inhalační expozice u modelových subjektů

Při interpretaci výsledků hodnocení zdravotních rizik suspendovaných částic metodou HHRA je nezbytné zohlednit určité nejistoty, které ovlivňují přesnost závěrů. Prvním klíčovým faktorem je samotné měření koncentrací $\text{PM}_{2,5}$ hodnoty použité v analýze vycházejí z údajů z automatické imisní stanice, avšak skutečné expoziční podmínky se mohou lišit v závislosti na mikroklimatických jevech, orientaci budov, výšce sání a dalších lokálních podmínkách prostředí. Rovněž individuální návyky a chování osob (například větrání místností nebo fyzická aktivita venku) nejsou v modelu zahrnuty a představují potenciální zdroj odchylky. HHRA navíc pracuje s lineárním dávkově-účinkovým vztahem, který může ve skutečnosti vykazovat nelineární odezvy, synergické účinky s jinými polutanty a interindividuální rozdíly v citlivosti organismu.

Navzdory těmto omezením poskytuje metoda HHRA užitečný nástroj pro kvantitativní odhad zdravotní zátěže v důsledku expozice suspendovaným částicím. že dítě bylo vystaveno nejvyššímu přebytečnému zdravotnímu riziku: pro dětskou úmrtnost činil ER 7 %, zatímco pro respirační onemocnění 5,7 %. Hodnota HQ dosáhla 0,59, což signalizuje mírně zvýšené zdravotní riziko, zejména s ohledem na vyšší citlivost dětského organismu. U seniorky byl ER 2,00 % pro celkovou úmrtnost a 1,85 % pro respirační onemocnění, HQ činil 0,015. Dospělý muž vykázal mírně nižší, ale stále kvantifikovatelné riziko: ER 1,42 % pro ischemickou chorobu srdeční a 1,006 % pro diabetes mellitus 2. typu, HQ dosáhl 0,1231. Tyto výsledky potvrzují, že dlouhodobá expozice v městském prostředí

může vést k významnému ohrožení zdraví, a to i v případech, kdy nejsou překračovány platné imisní limity.

Rovněž výsledky hazard quotientu (HQ) potvrzují, že zdravotní riziko může být významné i při hodnotách nižších než 1, zejména u citlivých skupin populace. U dítěte dosáhl HQ hodnoty 0,59, u dospělého muže činil 0,1231 a u seniorky 0,015. Tyto výsledky jednoznačně ukazují na zdravotní zátěž spojenou s dlouhodobou inhalační expozicí suspendovaným částicím PM_{2,5}. Analýza rovněž poukazuje na to, že i relativně nízká frekvence pobytu ve znečištěné lokalitě může vést k výrazné zdravotní zátěži, pokud je expozice dlouhodobá. Vzhledem k těmto zjištěním je nezbytné věnovat zvýšenou pozornost opatřením zaměřeným na zlepšení kvality ovzduší v městském prostředí a na ochranu zranitelných skupin obyvatelstva, jako jsou děti a senioři.

DISKUZE

Korelační analýza se zaměřila na vztah mezi koncentracemi $PM_{2,5}$, intenzitou dopravy a meteorologickými podmínkami. Výsledky ukázaly, že koncentrace $PM_{2,5}$ nejsou výrazně ovlivňovány intenzitou dopravy. Meteorologické podmínky především rychlost větru a atmosférický tlak také významně ovlivňují úroveň znečištění. Tyto výsledky odpovídají poznatkům uvedeným v teoretické části, kde je doprava identifikována jako klíčový zdroj suspendovaných částic, a je popsán vliv rozptylových podmínek na koncentrace polutantů. Z literatury rovněž vyplývá, že nevýfukové emise (z otěru brzd, pneumatik a resuspenze prachu) nabývají stále většího významu, a jejich vliv nelze podceňovat ani v moderních vozových parcích.

Výsledky hodnocení zdravotních rizik pomocí metody HHRA ukazují, že v podmínkách, kdy nedochází k překračování zákonných imisních limitů pro $PM_{2,5}$, může být populace vystavena zdravotní zátěži. Nejvyšší hodnoty přebytečného zdravotního rizika byly zaznamenány u dítěte ($ER = 7 \%$ pro dětskou úmrtnost; $HQ = 0,59$), následované seniorkou ($ER = 2 \%$ pro celkovou úmrtnost; $HQ = 0,015$) a dospělým mužem ($ER = 1,42 \%$ pro ischemickou chorobu srdeční; $HQ = 0,1231$). Tato zjištění poukazují na zvýšené ohrožení citlivých skupin obyvatelstva i při dlouhodobé nízké-úrovňové expozici.

Na základě zjištěných hodnot a identifikovaných rizik je nutné přijmout opatření ke snížení zdravotní zátěže vyplývající z expozice suspendovaným částicím. Mezi nejméně náročné opatření lze považovat kroky vedoucí k optimalizaci dopravy v zatížených lokalitách, např. úpravou průjezdnosti křižovatek, zavedením preferencí pro hromadnou dopravu a snižováním počtu zastavení, která zvyšují emise z otěru brzd a pneumatik. Význam má rovněž technickými úpravami silniční infrastruktury, jako je pravidelné čištění komunikací, použití nízko-prašných povrchů a údržba zelených pásů. Dlouhodobě je důležité podporovat bezemisní a nízkoemisní formy dopravy. Podpora elektromobility je možná na základě rozšiřování sítě dobíjecích stanic, zaváděním preferenčních pruhů pro elektrobusy a zvyšováním atraktivity MHD, rozvojem infrastruktury pro cyklisty a chodce. Z pohledu ochrany veřejného zdraví je nezbytné posilovat informační kampaně, které by zvýšily povědomí veřejnosti o zdravotních dopadech znečištění ovzduší, zejména u dětí, seniorů a osob s chronickými onemocněními.

Jedním z efektivních nástrojů regulace jsou nízkoemisní zóny, které se v řadě evropských měst osvědčily jako účinný prostředek ke snížení emisí z dopravy. Zavádění zón

omezuje vjezd vozidel s vysokými emisemi zplodin do vymezených oblastí měst, čímž dochází ke snížení koncentrací škodlivých látek v ovzduší.

Evropská unie vytyčila v rámci Zelené dohody pro Evropu ambiciózní cíle, mimo jiné snížit do roku 2030 počet předčasných úmrtí způsobených znečištěním ovzduší o 55 % oproti roku 2005. Akční plán „Cesta k nulovému znečištění“ (European Commission, 2021) zahrnuje strategii ke snížení škodlivých emisí a zavádění přísnějších norem pro kvalitu ovzduší, které budou v souladu s nejnovějšími doporučeními WHO. Kromě toho byla v roce 2022 schválena legislativa zakazující prodej nových benzinových a naftových vozidel v EU po roce 2035 (European Parliament, 2024), čímž má dojít ke snížení emisí CO₂ i škodlivin v městských aglomeracích.

Součástí evropské strategie je rovněž podpora alternativních paliv nebo biopaliv, syntetických a parafinických paliv, elektřiny a vodíku. Elektromobilita, ač bez přímých emisí, zvyšuje otěry pneumatik a brzd, a proto je potřeba i nadále regulovat a monitorovat suspendované částice i v bezemisním dopravním režimu. Vodíková vozidla, zejména v nákladní a hromadné dopravě, představují slibnou alternativu, jejichž využití však limituje současná nedostatečná infrastruktura (European Parliament, 2021; 2022b).

Závěrem lze konstatovat, že účinné řešení zdravotních dopadů expozice PM vyžaduje mezioborový přístup, propojení zdravotní politiky, dopravního plánování, technologických inovací a zapojení veřejnosti. Jen tímto způsobem lze naplnit cíle klimatické neutrality a zlepšení kvality života ve městech.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala problematikou zdravotních rizik suspendovaných částic, které jsou významným polutantem v městském prostředí, zejména v souvislosti se silniční dopravou. Práce byla zaměřena na vyhodnocení vztahu mezi intenzitou dopravy, meteorologickými podmínkami a koncentracemi $PM_{2,5}$ v ovzduší, a na následné posouzení zdravotních dopadů dlouhodobé expozice na obyvatelstvo ve vymezené lokalitě města Brna.

V teoretické části byla provedena rozsáhlá literární rešerše zaměřená na zdroje suspendovaných částic, jejich fyzikálně-chemické vlastnosti, zdravotní účinky, možnosti měření a monitorování, stejně jako legislativní rámec týkající se ochrany ovzduší. Dále byly popsány dostupné metodiky hodnocení zdravotních rizik, přičemž zvláštní důraz byl kladen na metodu Human Health Risk Assessment (HHRA), která byla následně aplikována v praktické části.

Praktická část byla zaměřena na konkrétní dopravně zatíženou městskou křižovatku Rokytova × Svatoplukova. Zde byla analyzována data z automatické imisní stanice v kombinaci s dopravním průzkumem a meteorologickými údaji. Pomocí korelační analýzy byly zjištěny nízké souvislosti mezi intenzitou dopravy, rozptylovými podmínkami a koncentracemi suspendovaných částic. Následně byla provedena aplikace metody HHRA na tři modelové subjekty různého věku a zdravotní citlivosti: dítě, dospělého muže a seniorku. Výpočty ukázaly, že byla expozice $PM_{2,5}$ spojena s měřitelnou zdravotní zátěží, zejména u citlivějších skupin obyvatelstva.

Výsledky práce potvrdily, že suspendované částice ze silniční dopravy mohou představovat významné riziko pro zdraví obyvatel i za podmínek, které formálně odpovídají platným hygienickým normám. Zvolená metodika umožnila propojit teoretické poznatky s reálnými daty a přinesla prakticky využitelný pohled na environmentálně-zdravotní dopady městské dopravy.

Na základě zjištěných skutečností byla navržena opatření směřující ke snížení zdravotních rizik, mezi něž patří zejména podpora plynulé a udržitelné dopravy, zavádění nízkoemisních zón, pravidelné čištění komunikací, úprava povrchů silnic s ohledem na prašnost, stejně jako osvěta a včasné varování obyvatel při nepříznivých podmínkách.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

ABABIO, D. V. K., BAAH-BOATENG, W., KUSI, J. a OPOKU, A., 2025. *Comprehensive health risk assessment of urban ambient air pollution (PM_{2,5}, NO₂ and O₃) in Ghana*. Online. Elsevier. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117591> [cit. 2025-04-19].

ANDRE, M., SARTELET, K., MOUKHTAR, S., ANDRE, J.M. a REDAELLI, M., 2020. *Diesel, petrol or electric vehicles: What choices to improve urban air quality in the Ile-de-France region? A simulation platform and case study*. Online. Elsevier. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117752> [cit. 2025-03-22].

BODOR, K., ȘCHIOPU, A. a DUMITRESCU, E., 2022. *The human health risk assessment of particulate air pollution (PM_{2.5} and PM₁₀) in Romania*. Online. Environmental Science and Pollution Research. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.03.022> [cit. 2025-04-19].

BOUREDJI, A., MURESAN, B., TRUONG, X.T., LUMIÈRE, L., POURCHEZ, J. a FOREST, V., 2024. *An in vitro comparison of the toxicological profiles of ground tire particles (TP) and actual tire and road wear particles (TRWP) emissions*. Online. Elsevier. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108885> [cit. 2025-03-22].

BRNĚNSKÉ KOMUNIKACE A.S., n.d. *Rokytova x Svatoplukova*. Online. Brno: Brněnské komunikace a.s. Dostupné z: <https://www.bkom.cz/dopravni-situace/detail/52> [cit. 2025-04-19].

CASOTTI RIENDA, I. a ALVES, C.A., 2021. *Road dust resuspension: A review*. Online. Elsevier BV. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105740> [cit. 2025-03-22].

CENIA, 2020. *Hodnocení zdravotních rizik – Portál životního prostředí*. Online. Praha: CENIA. Dostupné z: <https://portal.cenia.cz/eiasea> [cit. 2025-04-19].

ČESKÁ REPUBLIKA, 2012. *Zákon č. 201/2012 Sb., ze dne 02. května 2012, o ochraně ovzduší*. Online. In: *Sbírka zákonů České republiky*, částka 69/2012. Dostupné z: <https://www.e-sbirka.cz/sb/2012/201> [cit. 2025-03-12].

ČHMÚ, 2023. *Aktuální informace o kvalitě ovzduší v České republice*. Online. Praha: Český hydrometeorologický ústav. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/ovzdusi> [cit. 2025-03-13].

ČSN EN 12341, 2014. *Kvalita ovzduší - Referenční gravimetrická metoda stanovení hmotnostní koncentrace frakcí aerosolových částic PM10 a PM2,5*. Praha: Česká agentura pro standardizaci. 40 s. Třídící znak 83 5612 [cit. 2025-04-12].

DE OLIVEIRA, B.F.A., IGNOTTI, E., HACON, S.S. (2012). *Risk Assessment of PM2.5 to Child Residents in Brazilian Amazon Region with Biofuel Production*. Environmental Health, 11(1). Online. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/1476-069x-11-64> cit. 2025-04-21].

DI STEFANO, et al., 2025. *Dynamic and Static Analysis of Environmental Variables in Coronavirus Spread*. Online. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5058743/v1>. [cit. 2025-04-21].

European Environment Agency (EEA), 2022. *Air Quality in Europe*. Online. Dostupné z: <https://data.europa.eu/doi/10.2800/488115> [cit. 2025-03-13].

EUR-Lex, 2008. *Směrnice 2008/50/ES o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu*. Online. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32008L0050> [cit. 2025-03-13].

European Commission, 2024. *New pollution rules come into effect for cleaner air by 2030*. Online. 10. prosince 2024. Dostupné z: https://environment.ec.europa.eu/news/new-pollution-rules-come-effect-cleaner-air-2030-2024-12-10_en [cit. 2025-03-13].

European Commission, 2021. *Zero Pollution Action Plan: Pathway to a Healthy Planet for All*. Online. Brussels: European Commission. Dostupné z: https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en [cit. 2025-03-13].

European Court of Auditors, 2024. *Air Quality in Europe – Implementation of EU Policy*. Online. Dostupné z: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/air-quality-23-2018/cs/> [cit. 2025-03-17].

European Parliament, 2021. *Obnovitelný vodík: jaké výhody přinese na cestě ke klimaticky neutrální Evropě*. Online. 12. května 2021. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20210512STO04004/obnovitelny-vodik-jake-vyhody-prinese-na-cestě-ke-klimaticky-neutralni-evrope> [cit. 2025-03-13].

EUROPEAN PARLIAMENT, 2022a. *Jak zvýšit využívání alternativních paliv v automobilech*. Online. Evropský parlament, 13. října 2022. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20221013STO43019/jak-zvysit-vyuzivani-alternativnich-paliv-v-automobilech> [cit. 2025-03-13].

EUROPEAN PARLIAMENT, 2022b. *Zákaz prodeje nových benzinových a naftových aut od roku 2035*. Online. Evropský parlament, 19. října 2022. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20221019STO44572/zakaz-prodeje-novych-benzinovych-a-naftovych-aut-od-roku-2035> [cit. 2025-03-13].

FANG, Tiange, Ting Wang, Chao Zou, Quanyou Guo, Jianhua Lv, Yanjie Zhang, Lin Wu, Jianfei Peng a Hongjun Mao, 2023. *Heavy vehicles' non-exhaust exhibits competitive contribution to PM_{2.5} compared with exhaust in port and nearby areas*. Online. *Environmental Pollution*, září 2023. Elsevier BV. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122124> [cit. 2025-03-22].

Fussell, J.C. et al., 2022. *A review of road traffic-derived non-exhaust particles: Emissions, physicochemical characteristics, health risks, and mitigation measures*. Online. *Environmental Science & Technology*, 56(11), s. 6813–6835. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.2c01072> [cit. 2025-03-22].

GARCIA, Erika, Mary B. RICE a Diane R. GOLD, 2021. *Air pollution and lung function in children*. Online. B.m.: Elsevier BV. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2021.05.006> [cit. 2025-04-02].

Grange, Stuart K. et al., 2021. *Switzerland's PM₁₀ and PM_{2.5} environmental increments show the importance of non-exhaust emissions*. Online. *Atmospheric Environment: X*, 12. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100145> [cit. 2025-03-22].

GRUSZECKA-KOSOWSKA, Agnieszka et al., 2021. *Human health risk assessment of air pollution in the regions of unsustainable heating sources. Case study—The tourist areas of southern Poland*. Online. *Atmosphere*, 12(5), 615. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/atmos12050615> [cit. 2025-04-20].

Hadley, Michael B., Rajesh Vedanthan a Valentin Fuster, 2018. *Air pollution and cardiovascular disease: a window of opportunity*. Online. *Nature Reviews Cardiology*. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nrcardio.2017.207> [cit. 2025-04-04].

Health.Vic, 2024. Human health risk assessments. Online. Victoria State Government. Dostupné z: <https://www.health.vic.gov.au/environmental-health/human-health-risk-assessments> [cit. 2025-04-19].

CHEN, Jie a Gerard HOEK. 2020. *Long-term exposure to PM2.5 and mortality: A systematic review and meta-analysis. Environment International.* 143, 105974. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974> [cit. 2025-04-21].

Irakunda, E. a Z. Török, 2025. *Monitoring and dispersion modelling of particulate matter (PM2.5) in Rwanda.* Online. *Aerosol Science and Engineering.* Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s41810-025-00297-1> [cit. 2025-03-22].

JEONG, Sohee et al., 2023. *Rapid estimation of tire-wear particle concentration in road dust using PM10 and traffic data in a ternary plot.* Online. *Science of the Total Environment*, prosinec 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167227> [cit. 2025-03-22].

KUMAR, Prashant et al., 2019. The nexus between air pollution, green infrastructure and human health. Online. *Environment International*, prosinec 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105181> [cit. 2025-03-22].

Laco, M. et al., 2024. *Měsíční zpráva Únor 2024.* Online. Praha: Český hydrometeorologický ústav. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/aktuality/2024/Mesicni_zprava_2024-02.pdf [cit. 2025-03-28].

LI, Xiang, Weigang Wang, Qiang Huang a Guofan Cui, 2019. *Seasonal Variation and Source Apportionment of PM2.5, PM10, and TSP in a Semi-arid City in Northwest China. Atmosphere,* 10(5), 256. ISSN 2073-4433. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/atmos10050256> [cit. 2025-03-13].

MANISALIDIS, Ioannis, Elisavet Stavropoulou, Agathangelos Stavropoulos a Eugenia Bezirtzoglou, 2020. *Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review.* Online. Frontiers Media SA. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014> [cit. 2025-03-22].

MATCA, 2025a. *Analytické metody – SEM.* Online. MATCA. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/sem/> [cit. 2025-04-14].

MATCA, 2025b. *Analytické metody – EDS*. Online. MATCA. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/eds/> [cit. 2025-04-14].

MICROTRAC, 2025a. *Analýza velikosti a tvaru částic – Laserová difrakce*. Online. Microtrac. Dostupné z: <https://www.microtrac.cz/cz/produkty/analiza-velikosti-a-tvaru-castic/laserova-difrakce/> [cit. 2025-04-14].

MICROTRAC, 2025b. *Statický rozptyl laserového světla*. Online. Microtrac. Dostupné z: <https://www.microtrac.cz/cz/znalostni-baze/staticky-rozptyl-laseroveho-svetla/> [cit. 2025-04-14].

MŽP, 2024a. *Informace o zdravotních rizicích spojených s kvalitou ovzduší v roce 2022*. Online. Praha: Ministerstvo životního prostředí. Dostupné z: https://www.mzp.cz/system/files/2024-10/OOO-Zdravotni_rizika_2022-20240206.pdf [cit. 2025-04-19].

MŽP, 2024b. *Podpůrná opatření ke zlepšení kvality ovzduší*. Online. Ministerstvo životního prostředí. Dostupné z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/programy_zlepsovani_kvality_ovzdusi [cit. 2025-03-17].

ORELLANO, Pablo et al. 2020. *Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis*. *Environment International*. 142. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876> [cit. 2025-04-21].

PRIORITA, 2024. *Inteligentní identifikační systém zdrojů znečištění ovzduší*. Online. Priorita.cz. Dostupné z: <https://www.priorita.cz/reportaze/inteligentni-identifikacni-system-zdroju-znecistení-ovzdusi/> [cit. 2025-03-17].

PROJEKT-ARAMIS, 2024. *Senzory kvality ovzduší a jejich přesnost*. Online. Projekt-ARAMIS. Dostupné z: https://www.projekt-aramis.cz/results/Senzory_2024.pdf [cit. 2025-03-17].

PYTHON-DONTREPEATYOURSELF, 2023. *Real-Time-Vehicle-Detection-Tracking-and-Counting-in-Python*. Online. GitHub. Dostupné z: <https://github.com/python-dontrepeatyourself/Real-Time-Vehicle-Detection-Tracking-and-Counting-in-Python> [cit. 2025-04-02].

QuestionPro (2024). *Correlation Matrix: Definition, Types, and Examples*. Online. Dostupné z: https://www.questionpro.com/blog/correlation-matrix/#What_is_a_Correlation_Matrix [cit. 2025-04-20].

SEETHEAIR, 2024. *Europe: New PM2,5 Limits*. Online. See The Air, 26 February 2024. Dostupné z: <https://seetheair.org/2024/02/26/europe-new-pm2-5-limits/#:~:text=the%20limit%20and%20target%20values,alert%20thresholds%20will%20be%20exceeded> [cit. 2025-03-13].

SCHRAUFNAGEL, Dean E., John R. Balmes, Clayton T. Cowl, Sara De Matteis, Soon-Hee Jung, Kevin Mortimer, Rogelio Perez-Padilla, Mary B. Rice, Horacio Riojas-Rodriguez, Akshay Sood, George D. Thurston, Teresa To, Anessa Vanker a Donald J. Wuebbles, 2019. *Air Pollution and Noncommunicable Diseases*. Online. Elsevier BV. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.042> [cit. 2025-04-02].

SICARD, Pierre, Agathokleous, Evgenios, De Marco, Alessandra, Paoletti, Elena a Calatayud, Vicent, 2021. *Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades*. Online. *Environmental Sciences Europe*, 33(28), s. 1–12. ISSN 2190-4707. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00450-2> [cit. 2025-03-12].

SINGHA, B. a GHOSH, A., 2023. *Human Health Risk Assessment for Environmental Exposure: A Brief Account*. Online. ResearchGate. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/371844072> [cit. 2025-04-19].

SKÁCEL, František a Viktor Tekáč, 2019. *Analýza ovzduší*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 978-80-7592-038-6. [cit. 2025-03-12].

STATUTÁRNÍ MĚSTO BRNO, n.d. *Mapa města Brna*. Online. Dostupné z: <https://gis.brno.cz/mapa/mapa-mesta/> [cit. 2025-04-19].

STATUTÁRNÍ MĚSTO BRNO, n.d. *Monitoring ovzduší*. Online. Dostupné z: <https://www.brnskeovzdusi.cz/monitoring-ovzdusi/> [cit. 2025-04-19].

THUNBERG, Greta, 2022. *Kniha o klimatu*. Praha: Euromedia Group. ISBN 978-80-242-8226-8.

U.S. EPA, 2023. *Human Health Risk Assessment*. Online. United States Environmental Protection Agency. Dostupné z: <https://www.epa.gov/risk/human-health-risk-assessment> [cit. 2025-04-19].

WHO, 2021. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Online. Geneva: World Health Organization. ISBN 978-92-4-003422-8. Dostupné z: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> [cit. 2025-03-12].

YANG, B.-Y., FAN, S., THIERING, E., SEISSLER, J., NOWAK, D., DONG, G.-H. a HEINRICH, J., 2019. *Ambient Air Pollution and Diabetes: A Systematic Review and Meta-Analysis*. Online. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108817> [cit. 2025-03-22].

ZAPLETAL, Miloš, Vít Kašpar, Pavel Sumec, Jiří Bílek, Karel Doležal et al., 2021. *Zelená infrastruktura a její vliv na kvalitu ovzduší: metodika výsadby zeleně v urbánním prostředí s ohledem na zachyt polutantů*. Ostrava: Statutární město Ostrava, Odbor strategického rozvoje. ISBN 978-80-88399-03-2. [cit. 2025-03-12].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Mapa stanic imisního monitoringu v Brně	47
Obrázek 2 Monitorovací stanice Svatoplukova	48
Obrázek 3 Poloha monitorovací stanice Svatoplukova v kontextu dopravní křižovatky	49
Obrázek 4 Zachycení dopravní situace z živého záznamu kamery	53
Obrázek 5 Vizualizace sledování pohybu vozidel	54
Obrázek 6 Vizualizace hranice čítače	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Nové imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí.....	37
Tabulka 2 Korelační vztahy bez časového zpoždění dopravní intenzity	58
Tabulka 3 Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 3 hodiny.....	60
Tabulka 4 Korelační vztahy při šestihodinovém posunu dopravní intenzity	62
Tabulka 5 Korelační vztahy při dvanáctihodinovém posunu dopravní intenzity	63

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ADD	průměrné denní dávky
AT	doba expozice
BSE	zpětně odražené elektrony
BW	tělesná hmotnost
C	měřená koncentrace
C ₀	referenční koncentrace
CDD	chronická denní dávka
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ED	doba expozice
EDS	energie disperzní spektrometrie
EF	frekvence expozice
ER	Excess Risk
ET	doba expozice/ den
HHRA	Human Health Risk Assessment
HLS	HTTP Live Streaming
HQ	hazard quotient
HRA	Health Risk Assessment
CHOPN	chronická obstrukční plicní nemoc
ICHS	ischemická choroba srdeční
IR	inhalační rychlost
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
PM	Particulate Matter
RfD	referenční dávkou
RR	Relativní rizika
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie

SSIM	Státní síť imisního monitoringu
TRWP	tire and road wear particles
T2D	Diabetes mellitus 2. typu
URL	Uniform Resource Locator
μm	mikrometr
$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	mikrogram na metr krychlový

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Korelační tabulky časových posunů

PŘÍLOHA P I: KORELAČNÍ TABULKY ČASOVÝCH POSUNŮ

A: Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 1 hodinu

	větrná orientace	rychlost větru [m/s]	teplota [°C]	vlhkost [%]	tlak [hPa]	maximální směr větru [°]	maximální rychlost větru [m/s]	Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	počet vozidel
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,14	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,13	-0,42	-0,24	0,34	0,19	-0,04	-0,54	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,10	-0,44	-0,34	0,47	0,18	-0,01	-0,58	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,16	0,37	-0,36	-0,03	-0,14	0,25	-0,04	-0,17	1,00

B: Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 2 hodiny

	větrná orientace	rychlost větru [m/s]	teplota [°C]	vlhkost [%]	tlak [hPa]	maximální směr větru [°]	maximální rychlost větru [m/s]	Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	počet vozidel
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,14	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,15	-0,40	-0,22	0,30	0,20	-0,05	-0,52	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,13	-0,42	-0,31	0,41	0,19	-0,04	-0,56	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,16	0,37	-0,36	-0,03	-0,14	0,25	-0,02	-0,14	1,00

C: Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 4 hodiny

	větrná orientace	rychlost větru [m/s]	teplota [°C]	vlhkost [%]	tlak [hPa]	maximální směr větru [°]	maximální rychlost větru [m/s]	Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	počet vozidel
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,14	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,17	-0,35	-0,18	0,24	0,21	-0,06	-0,47	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,17	-0,37	-0,23	0,31	0,21	-0,06	-0,51	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,15	0,37	-0,36	-0,03	-0,14	0,25	0,01	-0,07	1,00

D: Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 5 hodin

	<i>větrná orientace</i>	<i>rychlost větru [m/s]</i>	<i>teplota [°C]</i>	<i>vlhkost [%]</i>	<i>tlak [hPa]</i>	<i>maximální směr větru [°]</i>	<i>maximální rychlost větru [m/s]</i>	<i>Svatoplukova; PM10 [ug/m3]</i>	<i>Svatoplukova; PM25 [ug/m3]</i>	<i>počet vozidel</i>
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,13	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,17	-0,34	-0,17	0,22	0,22	-0,06	-0,45	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,18	-0,35	-0,20	0,27	0,22	-0,07	-0,48	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,16	0,37	-0,36	-0,03	-0,14	0,25	0,02	-0,04	1,00

E: Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 7 hodin

	<i>větrná orientace</i>	<i>rychlost větru [m/s]</i>	<i>teplota [°C]</i>	<i>vlhkost [%]</i>	<i>tlak [hPa]</i>	<i>maximální směr větru [°]</i>	<i>maximální rychlost větru [m/s]</i>	<i>Svatoplukova; PM10 [ug/m3]</i>	<i>Svatoplukova; PM25 [ug/m3]</i>	<i>počet vozidel</i>
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,13	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,53	-0,14	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,16	-0,31	-0,16	0,19	0,24	-0,06	-0,42	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,19	-0,31	-0,16	0,20	0,25	-0,08	-0,43	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,16	0,37	-0,36	-0,03	-0,14	0,25	0,02	0,01	1,00

F: Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 8 hodin

	<i>větrná orientace</i>	<i>rychlost větru [m/s]</i>	<i>teplota [°C]</i>	<i>vlhkost [%]</i>	<i>tlak [hPa]</i>	<i>maximální směr větru [°]</i>	<i>maximální rychlost větru [m/s]</i>	<i>Svatoplukova ; PM10 [ug/m3]</i>	<i>Svatoplukova ; PM25 [ug/m3]</i>	<i>počet vozidel</i>
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,13	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,53	-0,14	-0,01	1,00			
Svatoplukova ; PM10 [ug/m3]	-0,14	-0,29	-0,17	0,19	0,25	-0,05	-0,41	1,00		
Svatoplukova ; PM25 [ug/m3]	-0,18	-0,30	-0,16	0,18	0,26	-0,08	-0,41	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,16	0,37	-0,36	-0,03	-0,14	0,25	0,01	0,03	1,00

G: Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 9 hodin

	<i>větrná orientace</i>	<i>rychlost větru [m/s]</i>	<i>teplota [°C]</i>	<i>vlhkost [%]</i>	<i>tlak [hPa]</i>	<i>maximální směr větru [°]</i>	<i>maximální rychlost větru [m/s]</i>	<i>Svatoplukova; PM10 [ug/m3]</i>	<i>Svatoplukova; PM25 [ug/m3]</i>	<i>počet vozidel</i>
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,13	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,53	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,14	-0,28	-0,18	0,19	0,26	-0,05	-0,40	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,17	-0,28	-0,16	0,18	0,27	-0,07	-0,39	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,15	0,37	-0,35	-0,03	-0,14	0,25	0,01	0,05	1,00

H: Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 10 hodin

	<i>větrná orientace</i>	<i>rychlost větru [m/s]</i>	<i>teplota [°C]</i>	<i>vlhkost [%]</i>	<i>tlak [hPa]</i>	<i>maximální směr větru [°]</i>	<i>maximální rychlost větru [m/s]</i>	<i>Svatoplukova; PM10 [ug/m3]</i>	<i>Svatoplukova; PM25 [ug/m3]</i>	<i>počet vozidel</i>
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,15	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,19	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,14	-0,04	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,08	0,82	0,32	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,12	-0,28	-0,19	0,19	0,26	-0,04	-0,38	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,16	-0,28	-0,18	0,18	0,28	-0,07	-0,38	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,15	0,37	-0,35	-0,03	-0,14	0,25	0,00	0,06	1,00

I: Korelační vztahy při časovém posunu koncentrací PM o 11 hodin

	<i>větrná orientace</i>	<i>rychlost větru [m/s]</i>	<i>teplota [°C]</i>	<i>vlhkost [%]</i>	<i>tlak [hPa]</i>	<i>maximální směr větru [°]</i>	<i>maximální rychlost větru [m/s]</i>	<i>Svatoplukova; PM10 [ug/m3]</i>	<i>Svatoplukova; PM25 [ug/m3]</i>	<i>počet vozidel</i>
větrná orientace	1,00									
rychlost větru [m/s]	0,27	1,00								
teplota [°C]	-0,13	0,14	1,00							
vlhkost [%]	-0,08	-0,40	-0,53	1,00						
tlak [hPa]	0,18	0,01	-0,18	-0,13	1,00					
maximální směr větru [°]	0,78	0,18	-0,14	-0,03	0,20	1,00				
maximální rychlost větru [m/s]	0,07	0,82	0,32	-0,52	-0,15	-0,01	1,00			
Svatoplukova; PM10 [ug/m3]	-0,11	-0,28	-0,20	0,20	0,27	-0,03	-0,38	1,00		
Svatoplukova; PM25 [ug/m3]	-0,15	-0,27	-0,20	0,19	0,29	-0,07	-0,37	0,95	1,00	
počet vozidel	-0,19	0,15	0,37	-0,35	-0,03	-0,14	0,24	-0,01	0,06	1,00