



národní
úložiště
šedé
literatury

Monitorování kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží

Ličbinský, Roman; Huzlík, Jiří; Hegrová, Jitka
2017

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-432327>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 24.04.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní nusl.cz .

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

METODIKA

Monitorování kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží

Monitorování kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží

M E T O D I K A

uplatnění výsledků výzkumu

2017

Výstup řešení projektu: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)

Identifikační kód CEZ: TE01020168

Zpracovatel: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV)

Odpovědný řešitel: Mgr. Roman Ličbinský (roman.licbinsky@cdv.cz)

Spoluřešitelé: RNDr. Jiří Huzlík, Ph.D., Mgr. Jitka Hegrová, Ph.D.

Metodika schválena: č.j. 131/2017 – 710 – VV/1

Tato metodika byla vytvořena s finanční podporou TA ČR na výzkumné infrastrukturu pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

ISBN 978-80-88074-55-7

Recenzenti: Mgr. Robert Skeřil, Ph.D. – vedoucí Oddělení ochrany čistoty ovzduší, Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno
Mgr. Pavel Chaloupecký – obchodně projektový manažer, ENVItech Bohemia s.r.o.

Vydání: první, 2017

Počet stran: 47

Jazyková korektura: nebyla provedena.

Vytištěno vlastním nákladem.

© Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Líšeňská 33a, 636 00 Brno

ISBN 978-80-88074-55-7

Anotace

Certifikovaná metodika

Autoři:

Mgr. Roman Ličbinský, RNDr. Jiří Huzlík, Ph.D., Mgr. Jitka Hegrová, Ph.D.

Název:

Monitorování kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží

Abstrakt:

Znečištění ovzduší emisemi je jedním z nejzávažnějších problémů dopravy, a to zejména v důsledku významného rizika pro zdraví člověka. Příčinou emisí škodlivin do volného ovzduší jsou výfukové plyny vznikající při spalování pohonných hmot v motorech automobilů. Jsou to komplexní směsi, obsahující stovky chemických látek v různých koncentracích, přispívající k dlouhodobému oteplování atmosféry, k tzv. "skleníkovému efektu", nebo často s toxickými, mutagenními i karcinogenními vlastnostmi pro člověka.

Předkládaná metodika byla zpracována v rámci projektu TE01020168 - Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI), za finanční podpory Technologické agentury ČR v rámci programu Centra kompetence. Jejím cílem je sjednocení postupů pro realizaci a vyhodnocení sledování kvality ovzduší za účelem poskytování objektivních informací o skutečném stavu a vývoji kvality ovzduší v oblastech s intenzivní dopravou. Shrnuje legislativou definované požadavky na sledování kvality ovzduší a zároveň definuje škodliviny, jejichž velmi významným zdrojem je doprava, a které je vhodné sledovat při hodnocení vlivu dopravy na kvalitu ovzduší, tzn. oxid dusičitý, (nano)částice, benzen, případně platinové kovy a benzo[*a*]pyren.

Metodika může sloužit Ministerstvu dopravy, vlastníkům silničních komunikací či jejich správcům (ŘSD, státní správě a samosprávě) jako efektivní nástroj pro kontrolu jak dlouhodobého monitoringu, tak orientačních ambulantních měření kvality ovzduší v okolí silničních komunikací. Zároveň nalezne uplatnění u zpracovatelů měření, a organizací zabezpečujících vlastní měření kvality ovzduší, kterým poskytne standardizovaný postup k zabezpečení precizního hodnocení kvality ovzduší na základě reálných údajů. Metodika přispěje také k prohloubení znalostí zaměstnanců všech zmíněných institucí a poskytne standardizovaný postup, na který se budou moci například odkázat zadavatelé veřejných zakázek v dané oblasti.

Klíčová slova:

kvalita ovzduší, (nano)částice, oxid dusičitý, benzen, platinové kovy, benzo[*a*]pyren

Certifikační orgán:

ČR, Ministerstvo dopravy, Odbor kosmických aktivit a ITS.

Annotation

Certified Method

Authors:

Mgr. Roman Ličbinský, RNDr. Jiří Huzlík, Ph.D., Mgr. Jitka Hegrová, Ph.D.

Title:

Air quality monitoring in areas with high traffic load

Abstract:

Emissions of pollutants are one of the most serious problems of transportation, particularly as a result of a significant risk to human health. The causes of emissions of pollutants to ambient air are the exhaust gases generated by the combustion of fuel in motor vehicles. They are complex mixtures containing hundreds of chemical substances at different concentrations contributing to long-term warming of the atmosphere, the so-called "greenhouse effect" or often with toxic, mutagenic and carcinogenic properties for humans.

The presented methodology was developed within project TE01020168 - Center for effective and sustainable transport infrastructure (CESTI) with the financial support of the Technological Agency of the Czech Republic within the Competence Centres Programme. Its aim is to unify the procedures for the implementation and evaluation of air quality monitoring in order to provide objective information on the actual status and development of air quality in areas with intensive transport. It summarizes the legislatively defined requirements for air quality monitoring and at the same time defines the pollutants whose very important source is transport and which should be monitored when assessing the impact of transport on air quality: nitrogen dioxide, (nano)particles, benzene, or platinum group elements and benzo[*a*]pyrene.

The methodology can be used by the Ministry of Transport, road owners or their managers (ŘSD, regions and municipalities) as an effective tool for controlling both long-term monitoring and indicative measurements of air quality in the vicinity of roadways. At the same time, it will find application to metering processors and organizations providing their own air quality measurement to provide a standardized procedure to ensure a precise air quality assessment based on real data. The methodology will also help to deepen the knowledge of the staff of all the mentioned institutions and provide a standardized procedure for which, for example, contracting authorities may refer to public procurement.

Keywords:

air quality, (nano)particles, nitrogen dioxide, benzene, platinum group elements, benzo[*a*]pyren

Certification Authority:

The Czech Republic, Ministry of Transport, Space Technologies and Satellite Systems Department.

Předmluva

Jedním z nejzávažnějších problémů dopravy, a to zejména v důsledku významného rizika pro zdraví člověka, je znečištění ovzduší emisemi. Příčinou emisí škodlivin z motorů vozidel do volného ovzduší jsou výfukové plyny vznikající při spalování pohonných hmot. Jsou to komplexní směsi obsahující stovky chemických látek v různých koncentracích přispívající k dlouhodobému oteplování atmosféry, k tzv. "skleníkovému efektu", nebo často s toxickými, mutagenními i karcinogenními vlastnostmi pro člověka. V místech s vysokou dopravní zátěží tak emise z automobilů dominantně ovlivňují kvalitu ovzduší, a to zejména v městském prostředí. Důsledkem toho je pětina městské populace v EU vystavena znečištěnému ovzduší, které překračuje imisní limity definované legislativou EU (EEA, 2017).

Výše uvedené vede k nutnosti sledovat kvalitu ovzduší, a to jak kontinuálně v dlouhodobém měřítku, tak v podobě doplňkových měření, např. při nedostatku dat o kvalitě ovzduší na určité lokalitě za účelem zpřesnění informací o stavu ovzduší, či při podezření na aktuální zhoršení kvality ovzduší. Požadavek sledování a hodnocení je mimo jiné stanoven v legislativě EU ve směrnici o kvalitě ovzduší 2008/50/ES přijaté v roce 2008, která byla do legislativního rámce ČR implementována Zákonem o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb, ve znění pozdějších předpisů. Uvedená směrnice resp. zákon definuje všechny aspekty měření kvality ovzduší vč. metodických principů měření. I přesto se však k měřením znečištění ovzduší využívají nejrůznější typy přístrojů, čidel či analyzátorů pracujících na různých principech měření. Předložená metodika si tak klade za cíl jasně definovat postupy měření kvality ovzduší v místech silně zatížených dopravou.

Metodika byla zpracována v rámci řešení projektu TE01020168 „Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)“ podporovaného Technologickou agenturou České republiky, na výzkumné infrastruktuře pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

Obsah

1. Cíl metodiky	8
2. Úvod	9
2.1. Principy měření koncentrací škodlivin v ovzduší	9
2.1.1. Obecně používané metody pro měření koncentrací škodlivin v ovzduší.....	10
2.1.2. Jiné používané metody pro měření koncentrací škodlivin v ovzduší.....	14
2.2. Závazné předpisy, základní pojmy	15
3. Metodická část	17
3.1. Obecné požadavky na měření kvality ovzduší	17
3.2. Měřené parametry	18
3.2.1. Oxidy dusíku	19
3.2.2. Pevné částice	19
3.2.3. Benzen	19
3.2.4. Benzo[<i>a</i>]pyren	19
3.2.5. Platinové kovy	20
3.3. Metody měření	20
3.3.1. Oxidy dusíku	20
3.3.2. Pevné částice	21
3.3.3. Benzen	21
3.3.4. Benzo[<i>a</i>]pyren	22
3.3.5. Platinové kovy	22
3.3.6. Meteorologické podmínky	22
3.4. Zásady návrhu měřicí lokality	22
3.5. Hodnocení úrovně znečištění ovzduší	23
3.5.1. Obsah zpráv o měření.....	23
3.5.2. Hodnocení úrovně znečištění ovzduší.....	23
4. Srovnání novosti postupů	26
4.1. Přístroje využívající referenční metody sledování kvality ovzduší	26
4.2. Další přístroje pro měření kvality ovzduší	27
5. Popis uplatnění certifikované metodiky	32
6. Ekonomické aspekty	33
7. Použitá literatura	34
8. Seznam publikací, které předcházely metodice	36
9. Seznam použitých zkratk	38
10. Příloha 1 - Zdroje a vlastnosti vybraných škodlivin v ovzduší	40

1. Cíl metodiky

Cílem metodiky je jasně definovat postupy měření kvality ovzduší v místech silně zatížených dopravou za účelem poskytování objektivních informací o skutečném stavu a vývoji kvality ovzduší. Shrnuje legislativou definované požadavky na sledování kvality ovzduší a zároveň definuje škodliviny, jejichž velmi významným zdrojem je doprava, a které je vhodné sledovat při hodnocení vlivu dopravy na kvalitu ovzduší.

2. Úvod

Znečištění ovzduší emisemi je jedním z nejzávažnějších problémů dopravy, a to zejména v důsledku významného rizika pro zdraví člověka. Příčinou emisí škodlivin do volného ovzduší je zejména spalování pohonných hmot v motorech automobilů, při kterém vznikají výfukové plyny. Jsou to komplexní směsi obsahující stovky chemických látek (viz příloha 1) v různých koncentracích přispívající k dlouhodobému oteplování atmosféry, k tzv. "skleníkovému efektu", nebo často s toxickými, mutagenními i karcinogenními vlastnostmi pro člověka. Nejvýznamnější škodliviny znečišťující ovzduší z dopravy je možné rozdělit na látky limitované, na které se vztahují emisní limity, a látky nelimitované. Mezi limitované škodliviny jsou řazeny oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku (NO_x), ne-metanové plynné uhlovodíky (NM VOC) a pevné částice pro dieselová vozidla (PM). Nelimitované škodliviny mají často závažnější dopady na zdraví člověka, ale pro v současné době nedostatek informací o látkách samotných a daleko vyšším nárokům na měřicí techniku, není jejich produkce monitorována. Do této skupiny řadíme látky přispívající k dlouhodobému oteplování atmosféry, tj. oxid uhličitý (CO₂), metan (CH₄), oxid dusný (N₂O). Další škodliviny, nebezpečné pro zdraví člověka, vznikající zejména při nedokonalém spalování pohonných hmot, jsou polyaromatické uhlovodíky (PAH), fenoly, ketony, dehet, 1,3 butadien a benzen, toluen, xyleny (BTX). Při spalování pohonných hmot mohou vznikat rovněž polychlorované dibenzodioxiny/furany (PCDD/F) a polychlorované bifenyly (PCB) v případě přítomnosti chlóru ve spalovacím systému. Uvolňování škodlivin do ovzduší vlivem dopravního provozu, zejména pak pevných částic (PM), je však spojeno i s dalšími procesy jako obroušování namáhaných součástí (brzdové a spojkové obložení), kdy se do ovzduší uvolňují měď (Cu), antimón (Sb), baryum (Ba), železo (Fe), hliník (Al), zinek (Zn), molybden (Mo), mangan (Mn), hořčík (Mg), kadmium (Cd) a další (Vallius et al., 2005). Abrazí pneumatik, obsahujících různé druhy pryží, je zdrojem především Zn, dalších kovů jako vápník (Ca) a Fe, a také elementárního uhlíku. Celá řada kovů se do životního prostředí dostává rovněž při mechanické separaci z rezivějící karoserie automobilů a pouličního příslušenství (koše, dopravní značení, osvětlení, svodidla apod.) (Lough et al., 2005). Z katalyzátorů se v podobě pevných částic do prostředí uvolňují kovy ze skupiny platiny, jako jsou platina (Pt), paládium (Pd) a rhodium (Rh) (Moldovan, 2007). Významnou zátěž ovzduší představuje také zvíření (resuspenze) PM deponovaných na vozovce a v jejím blízkém okolí, iniciovaného projíždějícími vozidly či proudícím větrem (Braaten et al., 1990). Vozovkový prach zahrnuje částice převážně velikostně větších frakcí, na jejichž složení se podílí kovy jak geologického původu z okolní půdy (Al, Si, Ca, Mg), tak uvedené výše z provozu automobilů (Claiborn et al., 1995). Nezanedbatelnou roli hrají také částice chemického (sůl) i inertního materiálu (písek, štěrk, struska) pro posyp silnic v zimním období, opadávající nečistoty z vozidel, a ztráty převáženého materiálu.

2.1. Principy měření koncentrací škodlivin v ovzduší

Vše výše uvedené vede k nutnosti sledovat kvalitu ovzduší, a to jak kontinuálně v dlouhodobém měřítku, tak v podobě doplňkových měření, např. při nedostatku dat o kvalitě ovzduší na určité lokalitě za účelem zpřesnění informací o stavu ovzduší či při podezření na aktuální zhoršení kvality ovzduší. Požadavek sledování a hodnocení je mimo jiné stanoven v legislativě EU ve směrnici o kvalitě ovzduší 2008/50/ES přijaté v roce 2008, která byla do legislativního rámce ČR implementována Zákonem o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Uvedená směrnice resp. zákon definuje všechny aspekty měření

kvality ovzduší vč. metodických principů měření. V případech, kdy jsou realizována dlouhodobá měření pro posuzování úrovně znečištění, resp. kvality ovzduší, ve smyslu Zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, je nutné dodržet postupy pro odběr vzorků a provádění analýz stanovené v části A přílohy č. 6 k vyhlášce MZP č. 330/2012 Sb. o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích (tzv. referenční metody sledování kvality ovzduší). Nicméně je přípustné k měření použít i jiný postup nebo metodu, jestliže lze prokázat testem ekvivalence jejich těsnou statistickou vazbu ke stanovené referenční metodě.

2.1.1. Obecně používané metody pro měření koncentrací škodlivin v ovzduší

Stručný přehled metod měření koncentrací vybraných škodlivin v rámci monitorovací sítě kvality ovzduší v ČR provozované Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ), zdravotními ústavy, městskými úřady, případně dalšími subjekty (např. ČEZ) uvádí tab. 2.1.

Tab. 2.1. Přehled metod měření jednotlivých škodlivin používaných v současnosti i nedávné minulosti v ČR s tučně vyznačenými referenčními metodami měření pro příslušnou škodlivinu (zdroj: ČHMÚ 2016, upraveno).

škodlivina	metoda měření
SO ₂	ultrafialová fluorescence
	spektrofotometrie s TCM a fuchsinem (West-Gaekova)
	iontová chromatografie
	elektrochemický palivový článek
	coulometrie
NO ₂	chemiluminiscence
	coulometrie
NO _x	chemiluminiscence
	elektrochemický palivový článek
	guajakolová (modif. Jakobs-Hochheiserova)
	spektrofotometrie
	triethanolaminová spektrofotometrie
PM ₁₀ , PM _{2.5}	gravimetrie
	radiometrie
	oscilační mikrováhy
	ortogonální nefelometrie
CO	IR-korelační absorpční spektrometrie
O ₃	ultrafialová absorpční fotometrie
NH ₃	chemiluminiscence
BTX	plynová chromatografie s plamenoionizační detekcí

škodlivina	metoda měření
	plynová chromatografie s fotoionizační detekcí
	atomová absorpční spektrometrie
	polarografie
	atomová emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
těžké kovy	rtg-fluorescence
	hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
	nízkoteplotní plynová atomová fluorescenční spektrometrie
	atomová absorpční spektrofotometrie AMA na stanovení Hg
	pasivní dosimetrie
benzen	sání vzduchu přes adsorbent
	v obou případech následné stanovení plynová chromatografie s plamenoionizační detekcí
PAH	plynová chromatografie s hmotnostně selektivní detekcí
	vysokotlaká kapalinová chromatografie

K hlavním problémům kvality ovzduší v ČR patří znečištění pevnými částicemi (PM), které často překračují imisní limity stanovené Zákonem č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, resp. v příloze č. 1 tohoto zákona, a to na různých lokalitách. K měření koncentrací PM v ovzduší se využívají tři hlavní metodologické přístupy.

Gravimetrické stanovení je referenční metodou (ČSN EN 12341 Kvalita ovzduší - Referenční gravimetrická metoda stanovení hmotnostní koncentrace frakcí aerosolových částic PM₁₀ a PM_{2,5}) pro měření koncentrací této škodliviny spočívající v určení rozdílu hmotností filtru před a po jeho expozici po příslušnou dobu na lokalitě. Vzorek je odebírán spojitou filtrací venkovního ovzduší přes vybraný filtrační materiál (membránové filtry z derivátů celulózy či teflonu s odpovídající velikostí pórů nebo ze skleněných vláken s účinností záchytu > 99,5 %).

Druhou metodou je v současné době poměrně hojně používaná ortogonální nefelometrie. Měření koncentrací je založeno na principu rozptylu laserového paprsku na částicích procházejících odebíraným vzorkem vnějšího ovzduší. Zdrojem světla je polovodičová laserová dioda emitující laserový paprsek o určité vlnové délce. Výstupem jsou aktuální počty částic nebo hmotnostní koncentrace prашného aerosolu v okolním ovzduší v jednotlivých velikostních frakcích.

Třetí metodou je pak radiometrie založená na absorpci beta záření ve vzorku zachyceném na filtračním materiálu. Z rozdílu absorpce beta záření mezi exponovaným a neexponovaným filtračním materiálem, který je úměrný hmotnosti zachycených částic, je určena koncentrace částic.

V minulosti byla používána metoda oscilačních mikrováh (TEOM), které měří hmotnostní množství vzorku zachyceného na výměnném filtru podle změny frekvence oscilujícího

kuželovitého nosiče. Vzorek vzduchu prochází filtrem, kde se zachytávají částice prachu, a pokračuje dutým kuželovitým prvkem přes elektronické ovládání průtoku do vývěvy.

Stanovení chemického složení PM je prováděno na částicích zachycených na různých typech filtračního média postupy platnými pro referenční metodu – gravimetrii - s využitím laboratorních analytických metod, jako např. plynová chromatografie s hmotnostní detekcí (GC-MS) pro stanovení koncentrací polyaromatických uhlovodíků (PAH) vázaných na částice nebo hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS) či atomová absorpční spektrometrie (AAS) k určení obsahů anorganických škodlivin.

K měření koncentrací a odběrům vzorků PM je možné využít i další postupy, které se však používají spíše pro krátkodobá a doplňující měření k dlouhodobému monitoringu. Nicméně všechny používané metody je nutné navázat pomocí testu ekvivalence na referenční metodu měření (gravimetrii). Pokud tomu tak není, výsledky těchto jiných měření resp. měření založená na jiném principu než gravimetrie nelze využít k hodnocení kvality ovzduší ve smyslu Zákona č.201/2012 Sb. o ochraně ovzduší ve znění pozdějších předpisů.

Některé metody jsou využívány pouze pro stanovení určité chemické škodliviny. Příkladem takové metody je ultrafialová fluorescence pro stanovení koncentrací oxidu siřičitého (SO₂) v ovzduší, která je zároveň referenční metodou a také nejběžněji používanou (ČSN EN 14212 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení oxidu siřičitého ultrafialovou fluorescencí). Analyzovaný vzorek je ozařován UV lampou a tím dochází k energetické excitaci molekuly SO₂. Při zpětném přechodu molekuly do základního energetického stavu dochází k uvolnění energie ve formě fluorescenčního záření, které je úměrné koncentraci oxidu siřičitého a je následně detekováno fotonásobičem.

Většinu metod je ale možné s určitou úpravou využít pro měření většího počtu škodlivin v ovzduší, jak je patrné z tab. 2.1.

Referenční metodou pro měření koncentrací NO, NO₂ a NO_x je chemiluminiscence založená na excitaci molekul oxidu dusnatého ozonem (ČSN EN 14211 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení oxidu dusičitého a oxidu dusnatého chemiluminiscencí). Při přechodu molekul z excitovaného do základního energetického stavu dochází k uvolnění žlutozeleného chemiluminiscenčního záření, které je detekováno fotonásobičem. Takto lze měřit přímo koncentrace NO. Pokud se vede vzorek plynu přes molybdenový konvertor, ve kterém se NO₂ redukuje na NO, je výsledkem měření chemiluminiscence celková koncentrace NO_x. Z rozdílu koncentrací NO a NO_x se pak počítá koncentrace NO₂. Metoda umožňuje stanovení okamžitých koncentrací oxidů dusíku v ovzduší, je vysoce selektivní, neboť ostatní složky ovzduší nevykazují chemiluminiscenci při této vlnové délce. Intenzita záření je lineární funkcí koncentrace v širokém rozmezí několika řádů.

Referenční metodou měření koncentrací přízemního ozónu je ultrafialová fotometrie (ČSN EN 14625 Kvalita ovzduší – normovaná metoda stanovení ozónu na principu ultrafialové fotometrie). Princip metody spočívá v absorpci UV záření určité vlnové délky uvolňovaného z vysokonapěťové UV lampy ozónem ve vzorkovaném ovzduší.

Podobný princip měření využívá i referenční metoda měření koncentrací oxidu uhelnatého (CO) (ČSN EN 14626 Kvalita ovzduší – normovaná metoda stanovení oxidu uhelnatého na principu nedisperzní infračervené spektroskopie). Infračervený paprsek prochází plynem (vzorkované ovzduší) a v případě přítomnosti CO je jím absorbován a tím klesá intenzita paprsku. Fotodetektor pak po jeho průchodu plynem měří pokles této intenzity.

Metody využívané ke stanovení koncentrací dalších limitovaných škodlivin v ovzduší jsou v podstatě kombinací několika postupů většinou zahrnující záchyt předmětné škodliviny na nějakém médiu a následnou chemickou analýzu.

Ke stanovení benzenu v plynných směsích lze použít řadu metod založených na různých principech v závislosti na cílech analýzy a obsahu analytu v plynu. Postup odběru vzorků a analýzy benzenu ve volném ovzduší je založený na sorpci benzenu v sorpční trubici, tepelné desorpci a stanovení kapilární plynovou chromatografií (referenční metody stanovení benzenu ve venkovním ovzduší Evropské unie pro účely porovnání výsledků měření s určenými ročními limitními hodnotami) je uveden v evropské normě ČSN EN 14662. Tato evropská norma uvádí několik variant postupu. Jedním z nejpoužívanějších využívá tepelné desorpce analytu z poměrně rozsáhlého souboru doporučených sorbentů (ČSN EN 14662-1). Variantou tohoto postupu je extrakce sorbátu sirouhlíkem s následnou analýzou GC-FID (ČSN EN 14662-2). Další část této normy uvádí postup difúzního odběru vzorků sorpcí na pevných sorbentech, uvolněním analytu tepelnou desorpcí (ČSN EN 14662-4) nebo extrakcí sirouhlíkem (ČSN EN 14662-5) s následnou analýzou GC-FID. Norma rovněž připouští automatický odběr vzorku prosáváním sorpční trubicí s následnou analýzou plynovou chromatografií (ČSN EN 14622-3).

Stanovení koncentrací benzo[*a*]pyrenu (BaP) je nutné realizovat v souladu s normou ČSN EN 15549, která uvádí postup stanovení benzo[*a*]pyrenu (BaP) neseného aerosolovými částicemi venkovního ovzduší. Metoda musí být založena na manuálních vzorkovacích zařízeních pro odběr thorakální frakce PM₁₀ podle ČSN EN 12341 nebo obdobné normy s následnou extrakcí vzorku a analýzou vysokoúčinnou kapalinovou chromatografií (HPLC) s použitím fluorescenčního detektoru (FLD) nebo plynovou chromatografií s hmotnostně-spektrometrickým detektorem (GC-MS). Metodu lze použít pro stanovení BaP v rozsahu hmotnostních koncentrací přibližně 0,04 ng.m⁻³ do zhruba 20 ng.m⁻³, kde dolní mez uvedeného rozsahu závisí na úrovni šumu detektoru a variabilitě laboratorního slepého filtru.

Stanovení koncentrací rizikových prvků v ovzduší, jejichž koncentrace jsou limitovány Zákonem č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, tedy olova (Pb), kadmia (Cd), arsenu (As) a niklu (Ni) určuje norma ČSN EN 14902 (ČSN EN 14902 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení Pb, Cd, As a Ni ve frakci PM₁₀ aerosolových částic), která podává obecný návod pro odběr vzorků aerosolových částic záchytem na vhodných filtrech a následné stanovení těchto prvků v aerosolových částicích venkovního ovzduší frakce PM₁₀ aerosolových částic, mikrovlnný rozklad těchto vzorků a analýzu v grafitové katodě metodou atomové absorpční spektrometrie nebo hmotové spektrometrie s (kvadrupolově) indukčně vázaným plazmatem.

Nedílnou součástí při měření koncentrací škodlivin v ovzduší jsou měření meteorologických podmínek, kde se rovněž využívají nejrůznější typy čidel. Přehled metod měření meteorologických podmínek v rámci monitorovací sítě kvality ovzduší v ČR je uveden v tab. 2.2.

Tab. 2.2 Přehled metod měření doprovodných meteorologických podmínek (zdroj: ČHMU 2016, upraveno).

veličina	metoda měření
	optoelektronicky
směr a rychlost větru	ultrazvukový anemometr lopatkový anemometr
globální sluneční záření	metoda teplotní difference

veličina	metoda měření
atmosférický tlak	měření atmosférického tlaku
relativní vlhkost vzduchu	kapacitní čidlo
	vlasový vlhkoměr
teplota	odporová metoda
radioaktivita	dosimetr

2.1.2. Jiné používané metody pro měření koncentrací škodlivin v ovzduší

V posledních letech se v souvislosti se snahou o co největší množství informací o kvalitě ovzduší objevuje celá řada levnějších přístrojů pro měření koncentrací škodlivin v ovzduší. K měření jsou tak používány různé typy senzorů, nejčastěji pak senzory elektrochemické.

Elektrochemické senzory jsou založeny na principu absorpce, adsorpce a chemisorpce. Adsorpce je proces, při kterém se shromažďuje měřená látka na povrchu analyzátoru. Chemisorpce je adsorpce, při které vzniká mezi molekulami analyzátoru a měřené látky chemická vazba. Vazba však může vzniknout jen mezi určitými molekulami a za určitých podmínek. A právě toto je hlavní limitující faktor jejich využití (tzn. nutnost zajistit konstantní podmínky pro činnost senzorů). Elektrochemických principů je využíváno v membránových senzorech s kapalným elektrolytem či v tzv. elektrochemických solid-state senzorech, v nichž je kapalným elektrolytem nahrazen tuhým elektrolytem (tuhým elektrolytem). Velká skupina senzorů je založena na měření změn elektronové vodivosti určitých materiálů v přítomnosti některých plynů. Jde o tzv. metaloxidové senzory a chemirezistory. Změn teploty při chemických reakcích, především při katalytické oxidaci plynů, je využíváno v senzorech založených na měření teploty, jako jsou pelistory či pyroelektrické senzory. Změna hmotnosti piezoelektrik způsobená absorpcí či adsorpcí stanovovaných plynů vede ke změně jejich rezonanční frekvence. Na tomto principu jsou založeny senzory hmotnostní, tzv. křemenné mikrováhy, nebo senzory s povrchovou akustickou vlnou (Štulík, Barek, 2007).

Elektrochemické senzory je možné rozdělit do tří skupin. První jsou ampérometrické senzory založené na principu elektrolýzy, tedy měření proudu mezi elektrodami ponořenými v kapalině. Při přiložení stejnosměrného napětí na elektrody probíhá elektrochemická reakce (oxidace nebo redukce) a proud procházející elektrodami je přímo úměrný koncentraci měřeného vzorku. Druhou skupinou jsou galvanometrické senzory, kde jsou elektrody odizolovány od měřené látky mezistěnou, která může propouštět pouze plyny. Membrána je vyrobena nejčastěji z teflonu nebo polypropylenu. Katoda je vyrobena z ušlechtilého kovu a procházejícím proudem nutí plyn projít membránou. Za membránou je uložena nejčastěji olověná anoda, na které dochází k oxidaci. Senzor má jen omezenou životnost. Třetí skupinou jsou senzory s pevným elektrolytem, kterým je nejčastěji keramická destička z oxidu zirkoničitého nebo oxidu yttria krytá z obou stran platinou.

Nespornou výhodou elektrochemických senzorů je jejich pořizovací cena a nízké provozní náklady. Nejjednodušší senzory resp. sensorové systémy stojí tisíce korun, složitější přístroje pro kontinuální měření koncentrací většího množství škodlivin pak cca. 450 až 800 tisíc Kč v závislosti na jejich příslušenství i množství měřených škodlivin, což je stále řádově níže, než je tomu v případě kompletně vybavené stacionární stanice nebo mobilní stanice pro měření kvality ovzduší vybavené jednotlivými analyzátoři, které pracují na principu

referenčních metod měření. Provozní náklady jsou pak 3 až 5 krát nižší v porovnání s klasickými stanicemi monitoringu kvality ovzduší (Kumar et al., 2015).

Bohužel tyto senzory mají daleko více záporných vlastností, které velmi významně negativně ovlivňují jejich využití pro měření kvality vnějšího ovzduší. První z nich je odolnost, resp. krátká doba životnosti, která se pohybuje v rozmezí cca. 6 měsíců po několik málo let (Kumar et al., 2015). Podstatným negativem ve vztahu k dlouhodobému měření kvality ovzduší je nízká reprodukovatelnost měření, resp. nestálost při různých meteorologických podmínkách, a v některých případech je nedostatečná také jejich citlivost (Kumar et al., 2015). Většímu rozšíření elektrochemických senzorů a jejich systémů brání také fakt, že principy dlouhodobého měření koncentrací škodlivin ve vztahu k hodnocení kvality ovzduší pomocí limitních koncentrací (imisních limitů), resp. metody, které se používají k měření, jsou definovány legislativou v celé Evropské Unii a tím i v České republice. Platné zákony (viz úvod kapitoly 2) tak přímo definují, jaké metody se musí k dlouhodobému měření kvality ovzduší použít a elektrochemické senzory mezi ně nepatří. Je však nutné zmínit, že v případě splnění náročných požadavků příslušné legislativy mohou získat test ekvivalence a být tak pro měření kvality ovzduší využívány. Nicméně, dosud žádný tento systém tímto kritériem úspěšně neprošel.

2.2. Závazné předpisy, základní pojmy

Základní pojmy, veličiny a jejich jednotky, jež se vztahují k problematice znečištění ovzduší, jsou zavedené v příslušných právních předpisech a normách:

Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší ve znění pozdějších předpisů.

Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích.

Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe OJ 2008 L152/1

ČSN EN 12 341 Kvalita ovzduší - Referenční gravimetrická metoda stanovení hmotnostní koncentrace frakcí aerosolových částic PM₁₀ a PM_{2,5}

ČSN EN 14212 Kvalita ovzduší – normovaná metoda stanovení oxidu siřičitého na principu ultrafialové fluorescence.

ČSN EN 14211 Kvalita ovzduší – normovaná metoda stanovení oxidu dusičitého a oxidu dusnatého na principu chemiluminiscence.

ČSN EN 14626 Kvalita ovzduší – normovaná metoda stanovení oxidu uhelnatého na principu nedisperzní infračervené spektroskopie.

ČSN EN 14625 Kvalita ovzduší – normovaná metoda stanovení ozonu na principu ultrafialové fotometrie.

ČSN EN 14662 – 1 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení benzenu - Část 1: Odběr vzorku prosáváním sorpční trubici s následnou tepelnou desorpčí a analýzou plynovou chromatografií

- ČSN EN 14662 – 2 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení benzenu - Část 2: Odběr vzorku prosáváním sorpční trubicí s následnou desorpcí rozpouštědlem a analýzou plynovou chromatografií
- ČSN EN 14662 – 3 Kvalita ovzduší – Normovaná metoda stanovení benzenu - Část 3: Automatizovaný odběr vzorku prosáváním sorpční trubicí a analýza plynovou chromatografií.
- ČSN EN 15549 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení benzo[a]pyrenu ve venkovním ovzduší
- ČSN EN 14902 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení Pb, Cd, As a Ni ve frakci PM₁₀ aerosolových částic

3. Metodická část

Metodika přináší v uceleném dokumentu postupy měření kvality ovzduší v místech silně zatížených dopravou za účelem poskytování objektivních informací o skutečném stavu a vývoji kvality ovzduší.

3.1. Obecné požadavky na měření kvality ovzduší

Při návrhu měření kvality ovzduší je nutné respektovat požadavky právních předpisů v oblasti ochrany ovzduší, zejména Zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší a vyhlášky MŽP č. 330/2012 Sb. o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích, definující požadavky na metody měření, požadavky na umístění vzorkovacích míst, frekvenci a časové pokrytí měření, požadavky na nejistoty měření a požadavky příslušných norem na monitorování jednotlivých znečišťujících látek. V zájmu účelného vynaložení finančních prostředků a efektivnosti měření je nutné zvážit a stanovit rozsah monitorovaných znečišťujících látek na konkrétní měřicí lokalitě.

Monitoring kvality ovzduší v dlouhodobém měřítku zajišťuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) v rámci státní sítě imisního monitoringu (SSIM), která v roce 2016 čítala 196 monitorovacích stanic. Nicméně různé stanice měří různý počet limitovaných škodlivin v závislosti na tom, jaké prostředí má příslušná stanice charakterizovat (pozadí, městské pozadí, průmyslová zóna, dopravní zátěž). Z uvedeného počtu stanic bylo 33 označeno jako dopravní, tzn., že měřicí přístroje jsou v těchto případech v blízkosti komunikací a křižovatek s vysokou intenzitou dopravy, a za dominantní zdroj znečištění některými škodlivinami je na těchto lokalitách považována doprava (ČHMÚ, 2016). Z automatizovaných stanic monitorovací sítě kvality ovzduší jsou naměřená data posílána on-line přímo do centrální databáze Informační systém kvality ovzduší (ISKO). V imisní databázi jsou archivována data zhruba od r. 1970. Tato data tak mohou sloužit jako podkladová při přípravě vlastního měření kvality ovzduší na určité lokalitě. Kvalitu ovzduší ve vztahu ke zdraví obyvatel monitoruje také Státní zdravotní ústav (SZÚ) v rámci „Systému monitorování zdravotního stavu obyvatelstva ve vztahu k životnímu prostředí, subsystému I“. Součástí jsou informace o výskytu ošetřených akutních respiračních onemocnění pocházející od praktických lékařů pro děti a dorost ve vybraných ambulantních zdravotnických zařízeních. Měření koncentrací znečišťujících látek ve vnějším ovzduší je realizováno v síti manuálních a automatických stanic, které provozují zdravotní ústavy v monitorovaných městech a na vybraných měřicích stanicích, které spravuje Český hydrometeorologický ústav (stanice jsou zařazeny rovněž do výše uvedené databáze ISKO) (SZÚ, 2016, SZÚ, 2017). Kvalitu ovzduší mohou monitorovat i jiné organizace či instituce. Pokud však chtějí realizovat měření kvality ovzduší ve vztahu k příslušným imisním limitům, musí být k této aktivitě kompetentní. To znamená, že příslušná organizace musí být držitelem autorizace pro měření venkovního ovzduší, kterou vydává Ministerstvo životního prostředí ČR podle § 32 odst. 1 písm. b) zákona o ochraně ovzduší. Autorizace je udělena mimo jiné na základě úspěšného složení ústní zkoušky vybraného zástupce příslušné organizace před autorizační komisí, složené ze zástupců ministerstva a předních českých odborníků na měření kvality ovzduší. Uchazeč při zkoušce prokazuje znalosti z vlastního měření kvality ovzduší a platných legislativních předpisů. V současné době ministerstvo životního prostředí eviduje 16 držitelů autorizace, právnických či fyzických osob, (vč. Centra dopravního výzkumu, v. v. i.) (MŽP, 2017). V případě některých škodlivin, jako jsou polyaromatické uhlovodíky a těžké kovy je vhodné, aby

subjekt realizující stanovení koncentrací těchto škodlivin v ovzduší příslušnými analytickými metodami byl držitelem akreditace Českého institutu pro akreditaci, o.p.s. (ČIA).

K zajištění co nejvyšší kvality výsledků je vyžadována účast jednotlivých subjektů v programech zkoušení způsobilosti (tzv. mezilaboratorní porovnávací zkoušky). V případě měření kvality ovzduší mobilními systémy (měřicí vozy či přívěsné vozíky) se jedná o srovnávací měření na určité lokalitě po dobu minimálně 12 hodin, kdy výsledky jsou vyhodnoceny příslušnými statistickými postupy, a následně je subjektu udělen certifikát s příslušným hodnocením účasti. Realizace mezilaboratorních porovnávacích zkoušek pro stanovení koncentrací prvků a benzo[*a*]pyrenu spočívá v distribuci stejného vzorku pevných částic/prachových částic, případně extraktu z nich, do zúčastněných laboratoří, jeho analýza a následné statistické vyhodnocení výsledků distributorem.

Obecně platí, že přístroje by měly být pravidelně servisovány dle manuálu k příslušnému přístroji, zároveň by měl být realizován v pravidelném intervalu servis u výrobce resp. dodavatele a v pravidelném intervalu by měly být přístroje i kalibrovány v kalibrační laboratoři. Periody servisů a kalibrací si může každý subjekt realizující měření kvality ovzduší stanovit sám (v souladu s doporučením výrobce) v interním předpise (např. příručka kvality laboratoře), nicméně v případě delších intervalů (obvykle jeden rok) musí doložit (např. protokolem ze souměření s jinou laboratoří), že za danou dobu nedochází ke zhoršení kvality měření. Samozřejmostí je pravidelné ověřování správnosti měření v rozsahu minimálně nuly a jedné měřené hodnoty pomocí kalibračního plynu o známé koncentraci.

3.2. Měřené parametry

Znečištění ovzduší je způsobeno řadou látek pocházejících z celé řady zdrojů (viz příloha 1), přičemž doprava je jedním z významných zdrojů znečištění zejména v městských prostředích. Doprava do ovzduší rovněž emituje širokou škálu škodlivin, a to nejenom ze spalovacích procesů probíhajících v motorech automobilů či dalších vozidel, ale i tzv. nespalovací emise zahrnující zejména pevné částice vznikající obrusem povrchu vozovky, pneumatik, mechanicky namáhaných částí (brzdové destičky, spojkové obložení), ale i resuspenzí prachu deponovaného na komunikaci projíždějícími vozidly. Zároveň je však velmi obtížné jasně identifikovat zdroj příslušné škodliviny, jelikož může být do ovzduší emitována více zdroji.

Nicméně za škodliviny specifické pro dopravu je možné považovat:

oxidy dusíku,

pevné částice resp. ultrajemné částice

benzen

benzo[*a*]pyren a

platinové kovy.

Součástí měření koncentrací výše uvedených škodlivin v ovzduší by mělo být také měření meteorologických parametrů zahrnující teplotu, relativní vlhkost, směr a rychlost větru.

3.2.1. Oxidy dusíku

Oxidy dusíku (NO , NO_2 , NO_x) jsou do ovzduší emitovány všemi vysokoteplotními spalovacími procesy, kdy dochází ke spalování fosilních paliv za přístupu vzduchu za teplot vyšších než cca 1 300 °C. V městském prostředí je tak doprava dominantním zdrojem této skupiny škodlivin s výjimkou oblastí se specifickými průmyslovými procesy (např. zpracování kys. dusičné).

3.2.2. Pevné částice

Pevné částice (PM), na rozdíl od ostatních škodlivin, nejsou specifickou chemickou látkou, ale představují směs částic z různých zdrojů, různých velikostí, složení a vlastností. PM zahrnují částice pevného a kapalného materiálu o velikosti od 1 nm až po 100 μm , které setrvávají po určitou dobu v ovzduší (US EPA, 2004). V atmosféře se s nimi setkáváme v podobě složité heterogenní směsi z hlediska velikosti částic a jejich chemického složení. Suspendované pevné částice se vyznačují svými specifickými fyzikálními (tvar, velikost, elektrický náboj, povrch částic a rozpustnost) a chemickými vlastnostmi (anorganické a organické složky), které jsou předurčeny jejich zdrojem, mechanismem vzniku a dalšími podmínkami, které ovlivňují jejich vznik (vzdálenosti od zdrojů, meteorologické podmínky). Vše výše uvedené je příčinou složitosti měření koncentrací PM spočívající zejména v tom, že je nutné předem zvolit metodu měření koncentrací v závislosti na tom, jak velké částice jsou předmětem našeho zájmu a jaké charakteristiky částic chceme zjistit. V důsledku dopravního provozu vzniká celé velikostní spektrum částic, jak hrubá frakce $\text{PM}_{2.5-10}$ (zvíření prachu z vozovek a z okolního prostředí, ořez pneumatik, povrchu vozovky, částečně spalovací procesy), tak jemná frakce $\text{PM}_{2.5}$ (zejména spalování pohonných hmot, méně i ořez povrchu vozovky a pneumatik). Spalovací procesy v motorech automobilů produkují zejména ultrajemné částice (nanočástice) s rozměry pod 100 nm $\text{PM}_{0.1}$, které jsou dominantním zdrojem těchto částic v městském prostředí (Kumar et al., 2014). Pokrok v technologiích spalovacích motorů vedl k dokonalejšímu spalování paliva, ale současně významně poklesla velikost produkovaných částic sazí ve výfukových plynech z mikrometrových do nanometrových rozměrů (Morawska et al., 2009). Nicméně i tyto částice mohou vznikat koagulací z plynných prekurzorů v atmosféře (tzv. sekundární částice), a tím zvyšovat jejich měřené koncentrace.

3.2.3. Benzen

Benzen vzniká při spalování fosilních paliv, uvolňuje se těkáním z benzínu z palivové nádrže nebo během tankování. Také se uvolňuje nebo vzniká při specifických průmyslových procesech (rafinerie ropy a plynu, spalování paliv - uhlí, oleje). V běžném městském prostředí tak jsou jeho dominantním zdrojem spalovací procesy v motorech automobilů.

3.2.4. Benzo[a]pyren

Benzo[a]pyren (BaP) je jedním z polycyklických aromatických uhlovodíků (PAH), vznikající při nedokonalém spalování organických materiálů (při cca. 300 až 600 °C). Mezi hlavní antropogenní zdroje BaP patří především spalování fosilních paliv, je součástí emisí uhelných elektráren, ve výfukových plynech spalovacích motorů, v tabákovém kouři. V běžném městském prostředí jsou v letním období jeho dominantním zdrojem spalovací procesy v motorech automobilů, v zimním období se pak dominantním zdrojem stává lokální vytápění. Nicméně v letním období jsou koncentrace BaP na hraně stanovitelnosti

analytických metod, v zimním období jsou naopak koncentrace zvýšené. V ovzduší se BaP vyskytuje téměř výhradně navázaný na pevné částice zejména jemnější frakce.

3.2.5. Platinové kovy

Vybrané platinové kovy (platina Pt, rhodium Rh, palladium Pd) jsou aktivní součástí automobilových katalyzátorů a v důsledku jejich tepelného, mechanického i chemického namáhání jsou emitovány do ovzduší zejména v podobě pevných částic. Tyto částice primárně emitované do ovzduší se následně hromadí v pouličním prachu a půdě v okolí silničních komunikací, kde mohou být chemicky přeměněny do forem lépe dostupných pro organismy. Katalyzátory v automobilech jsou tak považovány za dominantní zdroj znečištění životního prostředí těmito kovy. Dalším zdrojem může být spalování specifického zdravotnického materiálu.

3.3. Metody měření

V případech, kdy jsou realizována dlouhodobá měření pro posuzování úrovně znečištění, resp. kvality ovzduší, ve smyslu Zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, je nutné dodržet postupy pro odběr vzorků a provádění analýz stanovené v části A přílohy č. 6 k vyhlášce MŽP č. 330/2012 Sb. o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích (tzv. referenční metody sledování kvality ovzduší). Nicméně je možné k měření použít i jiný postup nebo metodu, jestliže lze prokázat testem ekvivalence jejich těsnou statistickou vazbu ke stanovené referenční metodě. V následujícím textu jsou uvedeny metody měření jednotlivých škodlivin, které je vhodné sledovat v souvislosti se znečištěním pocházejícím z dopravy.

Výše uvedené legislativní předpisy definují rovněž požadavky na nejistoty měření, které jsou v případě orientačních měření, tzn. krátkodobých měření, pro zhodnocení aktuální situace na určité lokalitě v případě oxidů dusíku 25 %, benzenu 30 %, benzo[*a*]pyrenu 50 % a pevných částic taktéž 50 % (platí pro referenční metodu měření, kterou je gravimetrie). V případě dlouhodobých stacionárních měření jsou nejistoty měření definovány v případě oxidů dusíku 15 %, benzenu 25 %, benzo[*a*]pyrenu 50 % a pevných částic 25 % (platí pro referenční metodu měření, kterou je gravimetrie). V případě měření koncentrací pevných částic metodou nefelometrie a ostatními ekvivalentními metodami by měla v pravidelném intervalu probíhat validace této metody srovnáním jí poskytovaných výsledků s výsledky stanovenými referenční metodou podle ČSN EN 12341.

3.3.1. Oxidy dusíku

Měření koncentrací těchto škodlivin je metodicky velmi dobře definováno a zvládnuto a je relativně jednoduché. Referenční metodou pro měření koncentrací NO, NO₂ a NO_x je chemiluminiscence založená na excitaci molekul oxidu dusnatého ozonem (EN 14211 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení oxidu dusičitého a oxidu dusnatého chemiluminiscencí). Při přechodu molekul z excitovaného do základního energetického stavu dochází k uvolnění žlutozeleného chemiluminiscenčního záření, které je detekováno fotonásobičem. Takto lze měřit přímo koncentrace NO. Pokud se vede vzorek plynu přes molybdenový konvertor, ve kterém se NO₂ redukuje na NO, je výsledkem měření chemiluminiscence celková koncentrace NO_x. Z rozdílu koncentrací NO a NO_x se pak počítá

koncentrace NO_2 . Metoda umožňuje stanovení okamžitých koncentrací oxidů dusíku v ovzduší, je vysoce selektivní, neboť ostatní složky ovzduší nevykazují chemiluminiscenci při této vlnové délce. Intenzita záření je lineární funkcí koncentrace v širokém rozmezí několika řádů.

3.3.2. Pevné částice

Referenční metodou stanovení koncentrací pevných částic legislativou limitovaných frakcí PM_{10} a $\text{PM}_{2.5}$ je gravimetrická analýza, stanovení hmotnosti částic vážením po jejich záchytu na filtrační medium po určitém čase odběru. Tato metoda je definována ČSN EN 12341 Kvalita ovzduší - Referenční gravimetrická metoda stanovení hmotnostní koncentrace frakcí aerosolových částic PM_{10} a $\text{PM}_{2.5}$. Tato metoda je časově náročná a vyžaduje speciální vybavení na odběry vzorků pevných částic a zejména pro umístění filtračního média po definované dobu ve stálých definovaných podmínkách a dostatečně přesné mikrováhy. Nevýhodou této metody je ztráta okamžité informace o koncentracích částic, což je v případě sledování znečištění z dopravy velmi žádoucí.

V případě dlouhodobých měření na místech s předpokládaným vlivem dopravy je vhodné spojit měření koncentrací početních i hmotnostních, což umožňují přístroje na principu nefelometrie či jiné optické metody. Ty pracující na principu rozptylu světelného nebo laserového paprsku a umožňují měření početních koncentrací částic širokého velikostního spektra většinou v rozsahu velikostí od 150 nm po 32 μm (velikostní rozpětí se může lišit v závislosti na výrobci přístroje) včetně stanovení hmotnostních koncentrací frakcí nejčastěji PM_{10} , $\text{PM}_{4.0}$, $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{1.0}$. V případě měření koncentrací pevných částic metodou nefelometrie resp. obecně optickou metodou by měla v pravidelném intervalu probíhat validace této metody srovnáním jí poskytovaných výsledků s výsledky stanovenými referenční metodou definovanou v ČSN EN 12341.

Nicméně doprava produkuje zejména ultrajemné částice $\text{PM}_{0.1}$ pocházející ze spalovacích procesů v motorech automobilů, které se na hmotnostních koncentracích podílejí méně. Proto se v jejich případě měří početní koncentrace částic. K měření je nutné využít velmi sofistikovaná zařízení, jako jsou např. elektrický nízkotlaký impaktor ELPI^{TM} umožňující jak kontinuální měření velikostní distribuce (nano)částic v reálném čase, tak současně měření koncentrací v jednotlivých velikostních frakcích (od 6 nm do 10 μm) a navíc ještě současný odběr velikostně selektovaných vzorků (nano)částic (od 14 nm do 10 μm) pro následnou chemickou analýzu nebo přístroje na principu scanning mobility particle sizer (SMPS) měřící velikost částic a početní koncentraci v rozsahu 2,5 nm až 1 μm . Je nutné mít na paměti, že pro určení přesných charakteristik (nano)částic nejsou vhodné jednoduché přenosné přístroje.

3.3.3. Benzen

Ke stanovení benzenu v plynných směsích lze použít řadu metod založených na různých principech v závislosti na cílech analýzy a obsahu analytu v plynu. Postup odběru vzorků a analýzy benzenu ve volném ovzduší je založený na sorpci benzenu v sorpční trubici, tepelné desorpci a stanovení kapilární plynovou chromatografií (referenční metody stanovení benzenu ve venkovním ovzduší Evropské unie pro účely porovnání výsledků měření s určenými ročními limitními hodnotami) je uveden v evropské normě ČSN EN 14662. Tato evropská norma uvádí několik variant postupu. Pro dlouhodobý monitoring kvality ovzduší se zdá být nejvhodnější automatický odběr vzorku prosáváním sorpční trubici s následnou analýzou plynovou chromatografií (EN 14622-3), což je možné realizovat v rámci provozu jednoho přístroje.

3.3.4. Benzo[a]pyren

Vzhledem k tomu, že v ovzduší se benzo[a]pyren (BaP) vyskytuje téměř výhradně navázaný na pevné částice zejména jemnější frakce, je stanovení koncentrací BaP možné pouze diskontinuálně a je poměrně náročným procesem. Stanovení koncentrací předhází odběr vzorků pevných částic frakce PM₁₀ na filtrační médium, extrakce těchto vzorků a následné stanovení koncentrací plynovým chromatografem s hmotnostní detekcí (GC-MS). Přesně je metoda stanovení popsána v ČSN EN 15549 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení benzo[a]pyrenu ve venkovním ovzduší. Z hlediska rutinních měření tak není sledování této škodliviny z důvodu náročnosti vhodné, i když z hlediska závažných dopadů na zdraví člověka je měření žádoucí.

3.3.5. Platinové kovy

Stanovení koncentrací platinových kovů (PTK) je možné pouze diskontinuálně a je poměrně náročným procesem zahrnujícím odběr vzorků pevných částic na filtrační médium, rozklad těchto vzorků a následné stanovení koncentrací přístrojem ICP-MS. Postup stanovení vychází z normované metody ČSN EN 14902 Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení Pb, Cd, As a Ni ve frakci PM₁₀ aerosolových částic. Z hlediska rutinních měření není tak sledování této skupiny škodlivin vhodné.

3.3.6. Meteorologické podmínky

Nedílnou součástí při měření koncentrací škodlivin v ovzduší jsou měření meteorologických podmínek. Pro tato měření je možné využít celou řadu čidel, pracujících na principu metod uvedených v tabulce 2.2. Nutným předpokladem je možnost jejich kalibrace pro ověření správnosti měření.

3.4. Zásady návrhu měřící lokality

Základní umístění přístrojů a počet měřících bodů na základě rozlohy sledované oblasti resp. počtu obyvatel sledované zóny či aglomerace je definováno ve Vyhlášce Ministerstva životního prostředí č. 330/2012, o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích. V případě měření kvality ovzduší v místech s dopravní zátěží resp. v místech pro hodnocení vlivu dopravy na kvalitu ovzduší Vyhláška definuje, že body vzorkování by měly být 25 m od okraje velkých křižovatek a nejméně 4 m od středu nejbližšího dopravního pruhu, pro měření oxidu dusičitého a oxidu uhelnatého by měly být nejdále 5 m od okraje vozovky a měly by být umístěny tak, aby měření byla reprezentativní pro úroveň znečištění ovzduší v blízkosti linie obytné zástavby, ale nejdále 10 m od okraje vozovky.

Nicméně počet, lokalizace i přesné situování měřících bodů závisí na konkrétní situaci v trase silniční komunikace a samozřejmě vlastním účelu měření. Lokalizace konkrétního měřícího místa se provede tak, aby:

- Reprezentovalo vymezený prostor v dané lokalitě z hlediska popisu prostorového šíření znečištění ovzduší od silniční komunikace jako liniového zdroje znečištění.

- Případně spolu s ostatními body měření kvality ovzduší vhodně vyplňovalo širší územní prostor, který je sledován.

Postup a způsob lokalizace měřicího místa v předmětné lokalitě je vhodné dopředu konzultovat s odborníky ČHMÚ, kompetentními zástupci státní správy či samosprávy a zadavatelem vlastního měření kvality ovzduší. V případě umístění měřicího bodu na soukromém pozemku je nutné požadovat souhlas vlastníka. Současně je vhodné mít k dispozici informace o kvalitě ovzduší dopravně neovlivněného prostředí co nejbližší od posuzované lokality.

3.5. Hodnocení úrovně znečištění ovzduší

3.5.1. Obsah zpráv o měření

Průběžné, souhrnné a závěrečné zprávy z lokálního měření znečištění ovzduší v daném úseku silniční komunikace by měly být v souladu s přílohou 7 „Obsahové náležitosti protokolu o měření úrovně znečištění“ vyhlášky č. 330/2012 Sb. o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích ve znění pozdějších předpisů (změna 83/2017 Sb.). Nicméně s ohledem na charakteristiku měření kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží by měly zprávy obsahovat kromě bodů stanovených ve zmíněné vyhlášce také:

- Přesnou lokalizaci a označení měřících bodů v dané lokalitě ve vztahu k silniční síti (GPS souřadnice, vzdálenost od silniční komunikace, vzdálenosti od význačných bodů v terénu, aj.).
- Popis pozemních komunikací v blízkosti měřicího bodu a popis okolního terénu v okolí (přítomnost mostů, zářezů, šířka komunikace, popis vegetace vč. její výšky, šířky, aj.).
- Důkladná fotodokumentace místa měření a umístění měřících přístrojů.
- Popis lokality s důrazem na existující jiné zdroje znečištění ovzduší (Vzdálenosti a umístění jiných zdrojů znečištění ovzduší, vzdálenost od křižovatky aj.)
- Popis zástavby, vzdálenosti a souvislost přilehlé zástavby, či jiných staveb.
- Vyhodnocení měření a doporučení zahrnující porovnání naměřených hodnot s imisními limity definovanými zákonem č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší ve znění pozdějších předpisů resp. přílohou č. 1 tohoto zákona (viz tab. 3.1 až 3.3)

3.5.2. Hodnocení úrovně znečištění ovzduší

V rámci hodnocení úrovně znečištění ovzduší, tedy kvality ovzduší, je sledován vztah naměřených koncentrací různých škodlivin k příslušným imisním limitům a cílovým imisním limitům (viz tab. 3.1 až 3.3). Limity pro přítomnost znečišťujících látek v ovzduší a meze tolerance jsou stanoveny Zákonem č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, resp. v příloze č. 1 tohoto zákona. Tento zákon implementuje všechny platné směrnice EU v oblasti kvality ovzduší, tj. směrnic 99/30/EC, 2000/69/EC, 2002/3/EC a 2004/107/EC.

Tab. 3.1. Hodnoty imisních limitů platných v ČR pro vybrané škodliviny

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit	Maximální počet překročení
Oxid siřičitý	1 hodina	350 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	24
	24 hodin	125 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	3
Oxid dusičitý	1 hodina	200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	18
	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Oxid uhelnatý	maximální denní osmihodinový průměr ¹⁾	10 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0
	1 kalendářní rok	5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Benzen	24 hodin	50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	35
	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Částice PM ₁₀	1 kalendářní rok	25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Částice PM _{2,5}	1 kalendářní rok	0,5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Olovo	1 kalendářní rok		

Poznámka:

1) Maximální denní osmihodinová průměrná koncentrace se stanoví posouzením osmihodinových klouzavých průměrů počítaných z hodinových údajů a aktualizovaných každou hodinu. Každý osmihodinový průměr se přiřadí ke dni, ve kterém končí, tj. první výpočet je proveden z hodinových koncentrací během periody 17:00 předešlého dne a 01:00 daného dne. Poslední výpočet pro daný den se provede pro periodu od 16:00 do 24:00 hodin.

2) od roku 2020 bude imisní limit pro PM_{2,5} snížen na 20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Tab. 3.2. Imisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace

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

Poznámka:

1) Součet objemových poměrů (ppb) oxidu dusnatého a oxidu dusičitého vyjádřený v jednotkách hmotnostní koncentrace oxidu dusičitého.

Tab. 3.3. Cílové imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM₁₀ vyhlášené pro ochranu zdraví lidí

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit
Arsen	1 kalendářní rok	6 ng·m ⁻³
Kadmium	1 kalendářní rok	5 ng·m ⁻³
Nikl	1 kalendářní rok	20 ng·m ⁻³
Benzo[a]pyren	1 kalendářní rok	1 ng·m ⁻³

V případě nutného zjednodušení je možné hodnocení aktuální kvality ovzduší založit na indexech, které definuje Český hydrometeorologický ústav (viz tab. 3.4). Výpočet indexu kvality ovzduší, ve kterém je zohledněn možný vliv imisí na zdravotní stav obyvatelstva, je založen na vyhodnocení 1h koncentrací oxidu dusičitého (NO₂) a pevných částic (PM₁₀). Ve výpočtu jsou pro PM₁₀ použity 1h průměrné koncentrace, protože lépe vystihují aktuální stav (meze pro 1h koncentrace byly odvozeny na základě statistické analýzy mezi 24h a 1h koncentracemi) (ČHMÚ, 2017).

Tab. 3.4 Index kvality ovzduší a jednotlivé meze pro vybrané škodliviny

Index	Kvalita ovzduší	NO ₂ (μg·m ⁻³)	PM ₁₀ (μg·m ⁻³)
1	velmi dobrá	0 - 25	0 - 20
2	dobrá	> 25 - 50	> 20 - 40
3	uspokojivá	> 50 - 120	> 40 - 70
4	vyhovující	> 120 - 350	> 70 - 90
5	špatná	> 350 - 500	> 90 - 180
6	velmi špatná	> 500	> 180

Tabulka 3.5 zobrazuje index kvality ovzduší odhadnutý na základě ročních průměrných koncentrací benzenu a benzo[a]pyrenu. Na tyto indexy je nutné nahlížet jako na velmi orientační, jelikož nejsou podloženy žádnou statistikou, pouze zohledňují definované imisní limity.

Tab. 3.5 Index kvality ovzduší a jednotlivé meze pro vybrané škodliviny

Index	Kvalita ovzduší	Benzen (μg·m ⁻³)	Benzo[a]pyren (ng·m ⁻³)
1	velmi dobrá	0-3	0-0,3
2	dobrá	3-4	0,3-0,6
3	uspokojivá	4-5	0,6-0,9
4	vyhovující	5-6	0,9-1,2
5	špatná	6-7	1,2-1,5
6	velmi špatná	> 7	> 1,5

4. Srovnání novosti postupů

Metodika přináší v uceleném dokumentu postupy měření kvality ovzduší v místech silně zatížených dopravou za účelem poskytování objektivních informací o skutečném stavu a vývoji kvality ovzduší. Jejím předmětem není přinést nové postupy měření či hodnocení kvality ovzduší, ale jasně definovat postupy pro sběr přesných dat o kvalitě ovzduší na místech silně zatížených dopravou proto, aby nedocházelo k poskytování nepřesných dat při využití jiných měřících postupů, jak se tomu děje v současné době.

4.1. *Přístroje využívající referenční metody sledování kvality ovzduší*

Existuje několik firem vyrábějící přístroje pro měření kvality ovzduší využívající referenční a ekvivalentní metody sledování. Tyto přístroje jsou tak využívány zejména pro dlouhodobá měření kvality ovzduší a jsou rovněž součástí stanic automatizovaného imisního monitoringu ČHMU. Výsledky získané měřeními, resp. koncentrace škodlivin naměřené těmito přístroji, tak lze považovat za nejpřesnější, samozřejmě za předpokladu dodržení všech nezbytných postupů, jako jsou kalibrace, pravidelná ověřování správné funkčnosti na kalibračních plynech atd.

V naprosté většině je možné jedním typem přístroje/analyzátoru měřit jednu škodlivinu (např. oxid uhelnatý CO) případně více modifikací jedné škodliviny (např. oxidy dusíku NO_x). K získání informací o celkové kvalitě ovzduší je tak nutné vlastnit více analyzátorů. Ceny jednotlivých analyzátorů se pohybují v rozmezí cca od 300 tis. Kč po 1 mil. Kč, přičemž nejlevnější bývají analyzátory pro měřené koncentrací oxidu uhelnatého a ozónu, nejdražší pak pro měření koncentrací pevných částic a BTEX analyzátory. Zároveň je nutné zabezpečit tento typ analyzátorů před nepříznivými meteorologickými podmínkami, tzn. umístit je do klimatizovaných „kontejnerů“ či automobilů (nejčastěji dodávek nebo přívěsných vozíků). Výhodou umístění v dodávce či v přívěsném vozíku je mobilita měřicí stanice, kdy je možné celý systém v případě potřeby jednoduše přemístit na jinou lokalitu. Samozřejmostí je pak on-line spojení všech analyzátorů s uživatelem prostřednictvím internetu či jiného datového rozhraní.

Výrobci výše popsaných přístrojů/analyzátorů jsou francouzská firma Environment S. A., dodávající kompletní sortiment přístrojů pro měření kvality ovzduší. Podobně široký sortiment nabízejí také firmy Horriba (Japonsko), Thermo Scientific (USA), Teledyne API (USA) nebo Ecotech (Austrálie), což jsou obrovské nadnárodní korporace, v kterých přístroje na měření kvality ovzduší zahrnují pouze část portfolia výrobků. Dále existuje celá řada výrobců specializujících se jen na určitý typ analyzátorů jako např. AMA instruments (Německo), Chromatotec (Francie), Synspec (Holandsko) vyrábějící analyzátory těkavých organických látek nebo jiných plynů v ovzduší, GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG (Německo), Palas GmbH (Německo) nebo Comde-Derenda GmbH (Německo) vyrábějící výhradně analyzátory prašného aerosolu/pevných částic či Sven Leckel Ingenierbüro GmbH (Německo), Comde-Derenda GmbH (Německo), DIGITEL Elektronik AG (Německo), FAI Instruments (Itálie) vyrábějící vzorkovače pevných částic pro gravimetrickou analýzu PM. V případě zájmu je možné objednat kompletně vybavenou stanici k měření tzv. „na klíč“ zahrnující přístroje/analyzátory, „kontejner“/dodávku/přívěsný vozík a komunikační a ovládací software. Takovéto služby poskytuje např. firma Envitech Bohemia s.r.o.

Dalším typem přístroje jsou kompaktní systémy pro měření kvality ovzduší Airpointer firmy Recordum Messtechnik GmbH (Rakousko), jejichž vybavení je plně srovnatelné se stacionárními stanicemi či mobilními zařízeními, ale vnější rozměry jsou mnohem menší. Měření koncentrací jednotlivých škodlivin jsou rovněž založena na referenčních metodách stanovení, ale nezajišťují je jednotlivé přístroje, ale moduly, které v podstatě zahrnují pouze nejnужnější součásti pro měření. Tzn. zejména, že data a jejich základní zpracování není realizováno pro jednotlivé měřené škodliviny zvlášť, ale jedním ovládacím softwarem najednou a stejně tak ovládání je zajištěno jedním softwarem.

Podobný přístup zvolila také firma Environment S.A., která kromě výše popsaných analyzátorů nabízí také kompaktní systém. Nicméně v tomto případě umožňuje tento přístroj pouze měření koncentrací oxidu uhelnatého, oxidů dusíku a ozónu.

Výhodou těchto kompaktních systémů pro měření kvality ovzduší je kromě jejich jednodušší mobility také možnost připojení do klasické elektrické sítě na 220 V, zatímco stacionární stanice, dodávky i přívěsné vozíky vyžadují většinou připojení 380 V, což může být v případě některých lokalit problematické. Nicméně je korektní zmínit také nedostatky, a tím je nemožnost vzdáleného ověření správné funkčnosti systému pomocí kalibračního plynu, jelikož tlakové lahve nemohou být v důsledku nedostatku místa součástí systému, resp. součástí mohou být pouze malé tlakové lahve, jejichž objem je spotřebován pro jedno ověření a jejich používání je tak nepraktické jak z hlediska jejich nutné výměny, tak z ekonomické stránky.

U všech výše popsaných přístrojů resp. stacionárních stanic, měřících vozidel či měřících přívěsných vozíků či kompaktních systémů je samozřejmostí vzdálený přístup operátora do systému k jednotlivým informacím o činnosti přístroje či přístrojů, a k naměřeným datům. Možný je také přenos dat na další vzdálená zařízení a vytvoření informační sítě o kvalitě ovzduší v dané lokalitě.

Výhodou těchto přístrojů je rovněž fakt, že měření mají oporu v legislativě, resp. využívají postupy, které legislativa přímo stanovuje.

V rámci objektivitu zpracované studie je nutné zmínit také negativa přístrojů využívajících k měření referenční metody, a těmi jsou zejména vysoká pořizovací cena a také vysoké provozní náklady (pro stanice měřící všechny v ovzduší limitované škodliviny se pohybují v rozmezí 150 tis až 500 tis na rok provozu). Nutným předpokladem je také odborně vzdělaný obslužný personál.

4.2. Další přístroje pro měření kvality ovzduší

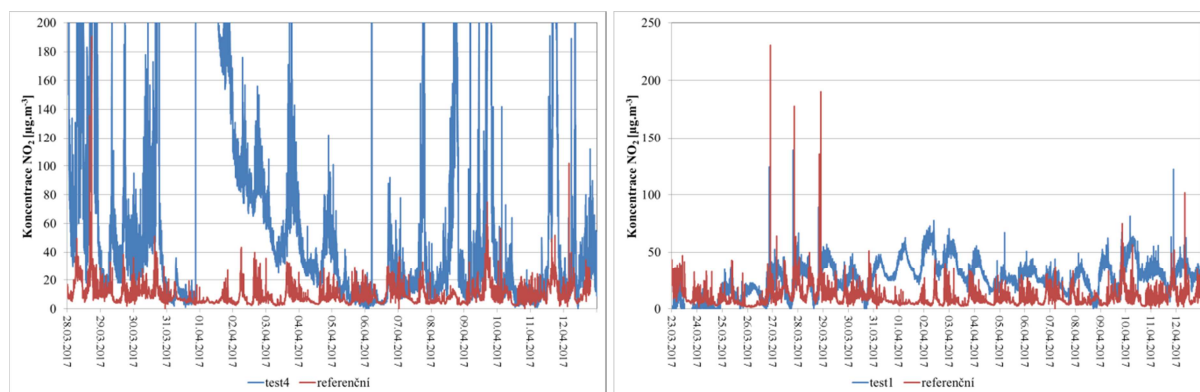
V posledních letech se v souvislosti se snahou o co největší množství informací o kvalitě ovzduší objevuje celá řada levnějších přístrojů pro měření koncentrací škodlivin v ovzduší. Bohužel nižší cena se velmi často projevuje na kvalitě naměřených dat. K měření jsou tak používány různé typy senzorů, nejčastěji pak senzory elektrochemické. Tyto přístroje jsou většinou složeny z jednoho či několika senzorů měřících na principu elektrochemických procesů.

Výhodou přístrojů založených na elektrochemických senzorech je jejich nízká pořizovací cena v porovnání s přístroji používající referenční metody měření. Bohužel tyto senzory mají daleko více záporných vlastností, které velmi významně negativně ovlivňují jejich využití pro

měření kvality vnějšího ovzduší. Zejména je to nestálost při změnách meteorologických podmínek.

Příkladem takového přístroje je AQM 65 firmy Aeroqual (Nový Zéland). Výrobce uvádí možnost současně měřit koncentrace až 20 různých plynů (zahrnující mimo jiné ozón, oxid uhličitý, oxid uhelnatý, oxid dusičitý, oxidy dusíku, oxid siřičitý, sirovodík, těkavé organické látky, nemetanové uhlovodíky) a pevných částic a meteorologických podmínek (vlhkost, teplotu, atmosférický tlak, množství srážek, směr a rychlost větru). Přístroje je možné vzájemně propojit a ovládat on-line. Výrobce označuje tento přístroj jako optimální vyvážení mezi cenou a výkonem, jelikož náklady na pořízení jsou 3 – 5 krát nižší v porovnání s klasickou stanicí vybavenou jednotlivými analyzátory. S tímto tvrzením je možné souhlasit, jelikož pořizovací cena se pohybuje, mezi 450 až 800 tis. Kč v závislosti na množství senzorů, kterými je přístroj osazen. Zkušenosti s tímto přístrojem jsou však spíše negativní, jelikož jsou osazeny pouze v jednoduchém plastovém opláštění bez jakékoliv možnosti regulovat resp. udržovat stále podmínky nutné pro správný provoz senzorů (viz kapitola o principu měření). V reálném provozu na lokalitě při měření kvality ovzduší je pak nutné přístroj nejméně jedenkrát za 24 hodin kalibrovat pro zajištění sběru kvalitních dat. Tento nedostatek byl částečně odstraněn v nové generaci přístroje, kdy jeho součástí může být tlaková lahev s kalibračním plynem umožňující on-line kalibraci senzorů. Nicméně, tlaková lahev může být opět pouze omezeného rozměru, tzn. s omezeným množstvím kalibračního plynu a navíc může být jen jedna, což v případě měření koncentrací většího počtu polutantů opět znemožňuje on-line kalibraci resp. je kalibrace se omezuje pouze malý počet škodlivin.

Obr. 4.1. Porovnání koncentrací NO₂ naměřené různými typy senzorů



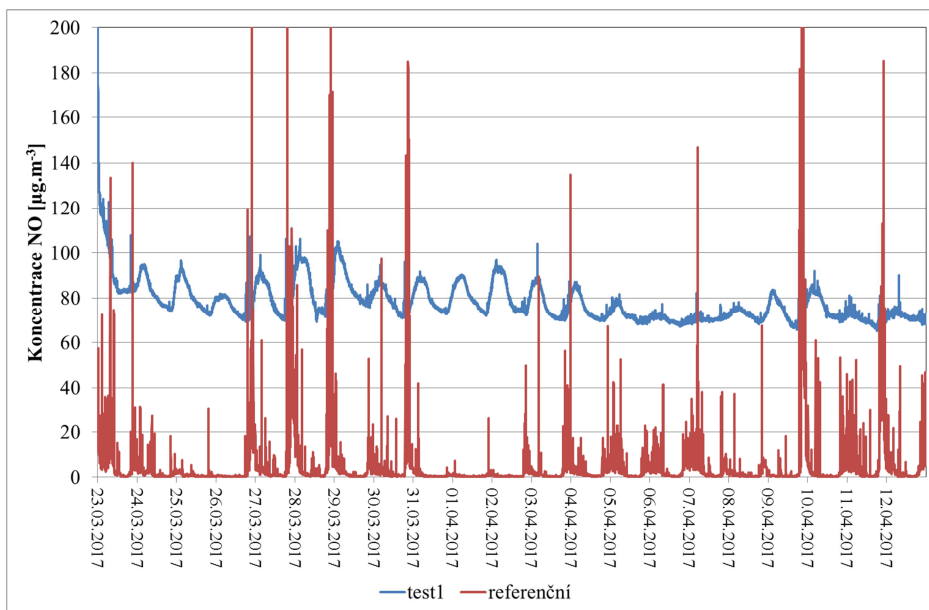
Podobným systémem je přístroj ATMO 7 firmy Nanosens (Polsko) označovaný jako integrovaná stanice pro měření kvality ovzduší, zahrnující měření koncentrací běžných plyných škodlivin a pevných částic v ovzduší. Nicméně k měřením jsou opět využívány elektrochemické sensory. V tomto případě se výrobce snažil zajistit konstantní podmínky pro správnou funkci senzorů tak, že jsou umístěny uvnitř tubusu, jehož stěny jsou vícevrstvé s vakuem mezi jednotlivými vrstvami, společně se zařízením, které umožňuje vyhřívání či chlazení podle aktuálních meteorologických podmínek. Cena tohoto přístroje je cca 400 tis. Kč.

Dále existuje celá řada firem, zabývajících se integrací jednotlivých elektrochemických senzorů pro měření koncentrací plynů a PM do různých zařízení vč. přenosu dat do vzdálených zařízení jako jsou chytré telefony. Příkladem takových produktů jsou systémy senzorů Smart Cities nebo Smart Environment firmy Libelium Comunicaciones Distribuidas S. L. (Španělsko). Bohužel tyto firmy se daleko více zabývají právě přenosem dat do dalších

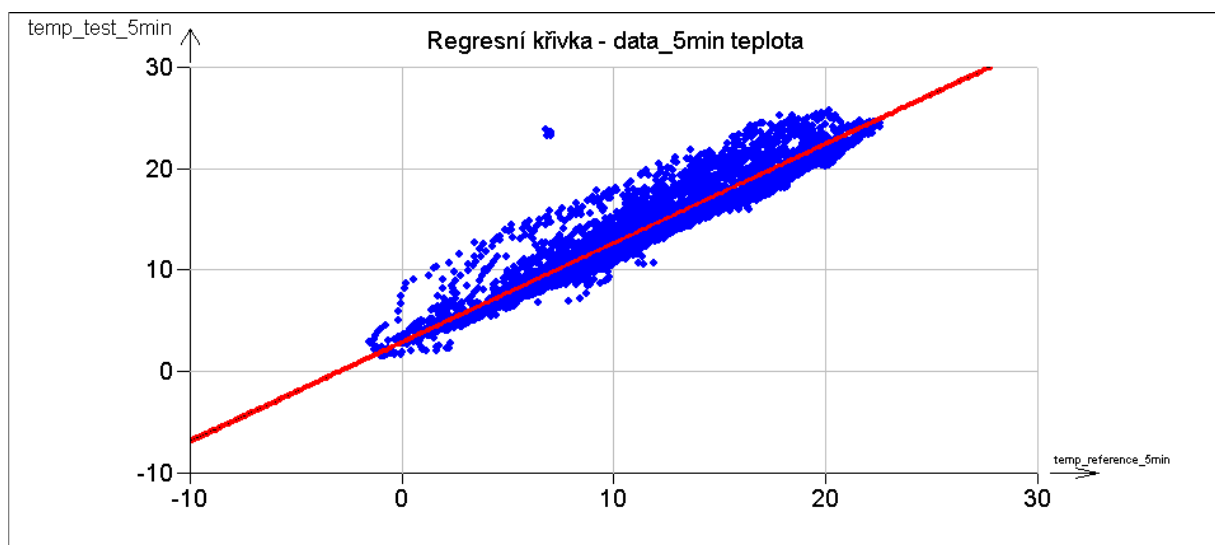
zařízení, ale vůbec ne kvalitou naměřených dat jako takových. Přesto jsou poměrně úspěšné v prodeji těchto senzorů.

V grafech na obr. 4.1 a 4.2 jsou znázorněny výsledky porovnávacího měření nízkonákladových senzorů a referenční metody při měření kvality ovzduší. Z grafů je patrné, že výsledky v případě měření základních plynných škodlivin jsou velmi špatné. Není to pouze otázka absolutních koncentrací škodliviny v ovzduší, které je možné statistickými metodami kalibrovat (v ideálním případě lineární regresí) na základě srovnání s referenční metodou, ale stabilitou měření. Z grafů je patrný velmi rozdílný trend zejména v období, kdy je znečištění ovzduší nižší, resp. dynamika změn znečištění je menší.

Obr. 4.2. Porovnání koncentrací NO ve vnějším ovzduší



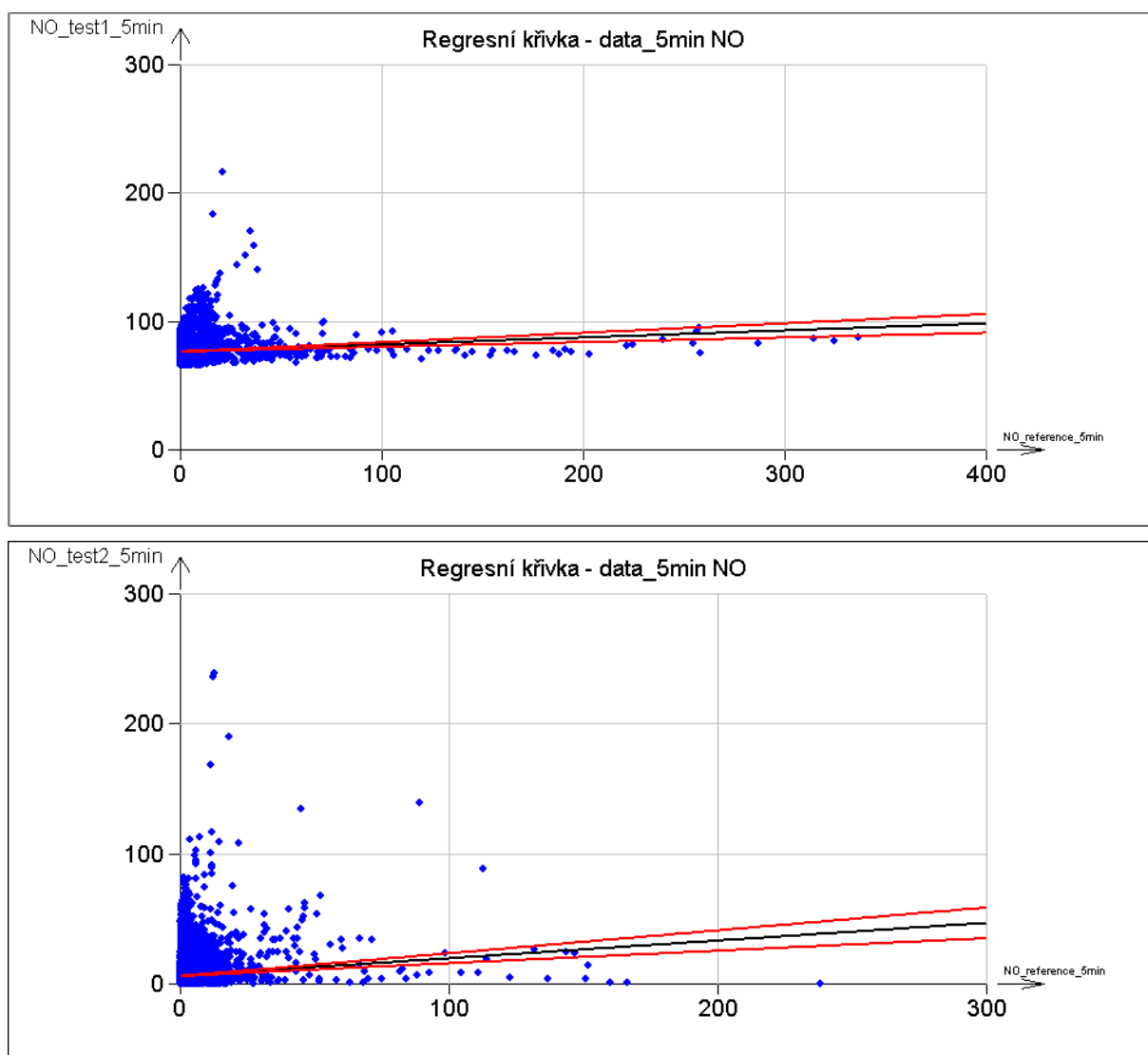
Obr. 4.3. Porovnání teplot ve vnějším ovzduší – lineární regrese



Tyto senzory zvládají vcelku úspěšně měření teploty a relativní vlhkosti ovzduší, jak ukazuje regrese znázorněná na obr. 4.3 pro jeden z testovaných senzorů, kde na ose x jsou hodnoty teplot naměřené referenčním měřicím zařízením, na ose y pak hodnoty teplot naměřené senzorem.

V případě měření koncentrací NO je situace mnohem horší, jak ukazuje obr. 4.4, na kterém jsou znázorněny regrese pro dva různé testované senzory. Na ose x jsou opět vyneseny hodnoty koncentrací NO naměřené referenčním přístrojem, na osách y koncentrace NO naměřené dvěma senzory různých cenových kategorií.

Obr. 4.4. Porovnání koncentrací NO ve vnějším ovzduší – lineární regrese



Pokud je třeba vyhodnotit úspěšnost regresních vztahů, je jedním z používaných kritérií koeficient determinace (R^2), což je druhá mocnina korelačního koeficientu. Pokud toto číslo vynásobíme stem, získáme procentické vyjádření vysvětlení skutečnosti regresním modelem. To znamená, že pokud je koeficient determinace roven jedné, regrese vyjadřuje beze zbytku skutečnost a porovnávané systémy nejsou zatíženy náhodnými chybami. Čím je tento koeficient nižší, tím je nižší procento objasněnosti vztahů testovaných a referenčních výsledků lineární regrese. K eliminaci náhodných výkyvů měření byly pro účely regrese

použity mediány pětiminutových a patnáctiminutových časových úseků měření. Celkové zhodnocení čtyř testovaných senzorů je uvedeno v tab 4.1. Z tabulky je patrné, že lineární regrese dává uspokojivé výsledky pro teplotu a relativní vlhkost, méně uspokojivé výsledky pro PM₁₀ a neuspokojivé pro oxidy dusíku.

Tab. 4.1. Výsledky hodnocení regresního porovnání měření senzorů a referenčního měřidla.

Měřená veličina	Porovnávaný senzor	R² * 100 (5min mediány)	R² * 100 (15min mediány)
NO ₂	test1	0.35	0.37
	test2	21.89	24.55
	test3	10.59	11.42
	test4	1.66	1.78
NO	test1	0.89	0.98
	test2	1.10	1.10
	test3	20.90	21.54
PM ₁₀	test1	60.53	61.96
	test2	9.64	10.38
	test3	60.53	47.53
Relativní vlhkost vzduchu	test1	93.67	93.64
	test3	92.20	92.11
	test4	85.24	85.03
Teplota vzduchu	test1	92.39	92.39
	test3	83.80	84.10
	test4	92.39	87.54

Z uvedeného hodnocení vyplývá, že použití senzorů současné kvality je nevhodné pro měření koncentrací oxidů dusíku. V případě pevných částic je nutné pečlivě vybírat vhodné přístroje a nenasazovat je bez patřičné pravidelné validace porovnáním s referenčním měřidlem. Je vždy nutno zvážit, k jakému účelu bude měřidel použito.

5. Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodika nalezne uplatnění u institucí realizujících měření kvality ovzduší jako ucelený dokument přinášející jasný postup pro realizaci měření kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží.

Zároveň může sloužit Ministerstvu dopravy, krajským a městským úřadům jako podkladový materiál při přípravě výběrových řízení pro realizaci měření kvality ovzduší, ale i jako efektivní nástroj pro kontrolu podaných nabídek a rovněž vlastního měření kvality ovzduší.

Metodika přispěje také k prohloubení znalostí zaměstnanců všech zmíněných institucí.

6. Ekonomické aspekty

Metodika se primárně zabývá problematikou získání relevantních dat o znečištění kvality ovzduší a přináší v uceleném dokumentu postupy měření kvality ovzduší v místech silně zatížených dopravou. Přesná data o kvalitě ovzduší jsou nutným předpokladem k přijímání následných opatření efektivních, a to jak z hlediska věcného, tak ekonomického. Pokud budou tato opatření přijímána na základě nepřesných nebo špatných dat, pravděpodobně budou neefektivní a tím dojde či bude opakovaně docházet ke zbytečnému utrácení finančních prostředků. Naopak v případě zjištění nadměrné zátěže ve sledovaném území bude možné aplikací adekvátních opatření předejít případným závažným dopadům na zdraví člověka projevujícím se z ekonomického pohledu na velmi vysokých nákladech v řádech milionů vydávaných na léčbu nemocných z důvodu expozice znečištěným ovzduším (Friedrich et al., 2001, Mayers et al., 2001, Watkiss et al., 2005, Watkiss et al., 2006, Van Essen et al., 2007).

7. Použitá literatura

- BRAATEN, D. A., PAW, U. K. T., SHAW, R. H. 1990. *Particle resuspension in a turbulent boundary layer observed and modelled*. Journal of Aerosol Science. 21, p. 613–628.
- CLAIBORN, C., MITRA, A., ADAMS, G., BAMESBERGER, L., ALLWINE, G., KANTAMANENI, R., LAMB, B., WESTBERG, H. 1995. *Evaluation of PM₁₀ emission rates from paved and unpaved roads using tracer techniques*. Atmospheric Environment. 29, p. 1075-1089.
- ČHMÚ, 2016. *Souhrnný tabelární přehled Znečištění ovzduší a atmosférická depozice v letech 1997–2014*. Dostupné na: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2016_enh/pdf/kom.pdf
- ČHMÚ, 2017. *Informace o kvalitě ovzduší v ČR*. Dostupné na: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/actual_hour_data_CZ.html
- EEA, 2017 *Air quality in Europe — 2017 report*. Dostupné na: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>
- FRIEDRICH, R., RABL, A., SPADARO, J. V. 2001 *Quantifying the Costs of Air Pollution: the ExternE Project of the EC*. Pollution Atmosphérique, p. 77 -104.
- KUMAR, P., MORAWSKA, L., BIRMILI, W., PAASONEN, P., HU, M., KULMALA, M., HARRISON, R. M., NORFORD, L., BRITTER, R. 2014. *Ultrafine particles in cities*. Environment International. 66, p. 1-10.
- KUMAR, P., MORAWSKA, L., MARTANI, C., BISKOS, G., NEOPHYTOU, M., Di SABATINO, S., BELL, M., NORFORD, L., BRITTER, R. 2015. *The rise of low cost sensing for managing air pollution in cities*. Environment International 75, p. 199–205. Online link: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>.
- LOUGH, G. C., SCHAUER, J. J., PARK, J. S., SHAFER, M. M., DEMINTER, J. T., WEINSTEIN, J. P. 2005. *Emissions of metals associated with motor vehicle roadways*. Environmental Science and Technology. 39, p. 826-836.
- MAYERES, I., PROOST, S., VANDERCRUYSSSEN, D., DE NOCKER, L., INT PANIS, L., WOUTERS, G. DE BORGER, B. 2001. *The External Costs of Transportation*, Center for Economic Studies, Leuven (Belgium): K. U. Leuven, 98 pp.
- MOLDOVAN, M. 2007. *Origin and fate of platinum group elements in the environment*. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 388 (3), p. 537-540.
- MORAWSKA, L., WANG, H., RISTOVSKI, Z., JAYARATNE, E. R., JOHNSON, G., CHEUNG, H. C., LING, X., He, C. 2009. *JEM Spotlight: Environmental monitoring of airborne nanoparticles*. Journal of Environmental Monitoring. 11 (10), p. 1758-1773.
- MŽP, 2017, *Seznam osob autorizovaných k měření úrovně znečištění ovzduší (imisi) - přehled k datu 1. 2. 2017*. Dostupné na: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/autorizovane_osoby_mereni_imisi/\\$FILE/000-Seznam_autorizacew_imise-20170202.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/autorizovane_osoby_mereni_imisi/$FILE/000-Seznam_autorizacew_imise-20170202.pdf)
- SZÚ, 2016. *Zdravotní důsledky a rizika znečištění ovzduší. Systém monitorování zdravotního stavu obyvatelstva ve vztahu k životnímu prostředí, Subsystém 1, Odborná zpráva za rok 2015*, Státní zdravotní ústav Praha, 105 s. Dostupné na: http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/odborne_zpravy/OZ_15/ovzdusi_2015.pdf

- SZÚ, 2017. *Systém monitorování zdravotního stavu obyvatelstva České republiky ve vztahu k životnímu prostředí. Souhrnná zpráva za rok 2016*, Státní zdravotní ústav, Praha, 96 s. ISBN 978-80-7071-365-5. Dostupné na: <http://www.szu.cz/publikace/monitoring-zdravi-a-zivotniho-prostredi>
- ŠTULÍK, BAREK (eds.) 2007. *Senzory*. Praha: Vysoká škola chemicko technologická, 223 s. ISBN 978-80-86238-20-3.
- US EPA, 2004. *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. Vol. 1, EPA/600/P-99/002aF, Research Triangle Park, NC, 900 p.
- VALLIUS, M., JANSSEN, N. H. N., HEINRICH, J., HOEK, G., RUUSKANEN, J., CYRYS, J., VAN GRIEKEN, R., DE HARTOG, J. J., KREALING, W. G., PEKKANEN, J. 2005. *Sources and elemental composition of ambient PM_{2.5} in three European cities*. Science of the Total Environment. 337, p. 147 – 162.
- Van ESSEN, H. P., BOON, B. H., MAIBACH, M., SCHREYER, C. 2007. *Methodologies for external cost estimates and internalisation scenarios*. CE Delft, INFRAS, Delft (Netherlands), 83 pp.
- WATKISS, P., PYE, S., HOLLAND, M. 2005. *CAFE CBA: Baseline analysis 2000 to 2020*. CAFE Programe. Oxon (United Kingdom): AEA Technology Environment, 112 pp.
- WATKISS, P., HOLLAND, M., HURLEY, F., PYE, S. 2006. *Damage Costs for Air Pollution*. Oxon (United Kingdom): AEA Technology Environment, 34 pp.

8. Seznam publikací, které předcházely metodice

- HUZLÍK, J., BOŽEK, F., PAWELCZYK, A. et al. *Identifying risk sources of air contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons*. Chemosphere, 2017, no. 183. p. 139-146, ISSN: 0045-6535.
- LIČBINSKÝ, R., HUZLÍK J., EFFENBERGER, K. *Ovlivňuje silniční tunel kvalitu ovzduší také v jiných částech města?* Doprava, zdraví a životní prostředí: sborník příspěvků, Brno, 7. - 8. 11. 2016. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2016, s. 13-20. ISBN 979-80-88074-42-7.
- BOŽEK, F., HUZLÍK, J., PAWELCZYK, A. et al. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Adsorption on Selected Solid Particulate Matter fractions*. Atmospheric Environment, 2016, no. 126, p. 128-135. ISSN 0010-0765.
- HUZLÍK, J., BOŽEK, F., LIČBINSKÝ, R. et al. *Kontaminace ovzduší polycyklickými aromatickými uhlovodíky*. Doprava, zdraví a životní prostředí: sborník příspěvků, Brno, 7. - 8. 11. 2016. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2016, s. 21. ISBN 979-80-88074-42-7.
- HEGROVÁ, J., KUREK, T., HUZLÍK, J. et al. *Hodnocení zdravotních rizik těžkých kovů z dopravy*. Ochrana ovzdušia, Štrbské Pleso, Vysoké Tatry, 25. - 27. 11. 2015, s. 118-122. ISBN 978-80-89565-22-1.
- HUZLÍK, J., POSPÍŠIL, J., JEDLIČKA, J. *Stanovení příspěvku dopravy k znečištění ovzduší v malých sídlech: metodika uplatnění výsledků výzkumu*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, 2015. 27 s., 1 příl. ISBN 978-80-88074-30-4.
- HEGROVÁ, J., LIČBINSKÝ, R., GOESSLER, W. *Využití ICP-QQQ pro přímé stanovení Pt, Rh a Pd v různých typech vzorků*. ChromAtoMol, 2015, č. 2, s. 4-6.
- POSPÍŠIL, J., HUZLÍK, J., LIČBINSKÝ, R., CHALOUPECKÝ, P. *Rozptyl znečišťujících látek z liniových zdrojů v malých sídlech*. Doprava, zdraví a životní prostředí, Brno, Česká republika, 10. - 11. 11. 2014. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2014, s. 31-38, ISBN 978-80-86502-85-4.
- LIČBINSKÝ, R., KŘIVÁNEK, V., HUZLÍK, J., JEDLIČKA, J. *Monitoring vlivu pozemních komunikací na životní prostředí*. Brno (Česká republika): Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2014. s. 36. ISBN 978-80-86502-95-3.
- HEGROVÁ, J., HUZLÍK, J., LIČBINSKÝ, R. et al. *Determination of plainum group elements in airborne particles and road dust with ICPMS*. European Symposium on Atomic Spectrometry ESAS 2014, Praha (Česká republika), 16. - 21. 3. 2014 [CD-ROM]. Spektroskopická společnost Jana Marka Marci, 2014.
- HUZLÍK, J., JEDLIČKA, J., ČERVINKA, O. et al. *Metodika pro stanovení emisních faktorů motorových vozidel v provozu*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2014. s. 33.
- POSPÍŠIL, J., LIČBINSKÝ, R., HUZLÍK, J. *Dispersion of Pollutants from Line Sources in Small Municipalities*. Transactions on Transport Sciences, 2014, vol. 7, no. 4, p. 161-168. ISSN 1802-971X.
- LIČBINSKÝ, R., HUZLÍK, J., FAIMON, J., KREISLOVÁ, K. *Traffic related aerosol: road tunnel case study*. NOSA Aerosol Symposium 2014 [CD-ROM], Stockholm (Sweden), 30. - 31. 1. 2014. Stockholm (Sweden): NOSA – Nordic Society for Aerosol Research, 2014.

- LIČBINSKÝ, R., HUZLÍK, J., FAIMON, J., KREISLOVÁ, K. *Chemical composition of traffic related aerosol*. International Aerosol Conference 2014 [CD-ROM], Busan (Korea), 28. 8. - 2. 9. 2014. Seoul (Korea): KAPAR – Korean Association for Particles and Aerosol Research, 2014.
- LIČBINSKÝ, R., HUZLÍK, J., FRÝBORT, A., JEDLIČKA, J., KREISLOVÁ, K. *Specific air pollution in road tunnel*. Transactions on Transport Sciences, 2013, vol. 6, no. 3, p. 107-116. ISSN 1802-971X.
- LIČBINSKÝ, R., HUZLÍK, J., FAIMON J. et al. *Characteristics of the particulate matter from road tunnel environment*. EAC 2013 Prague, Praha (Česká republika), 1. - 6. 9. 2013 [CD-ROM]. Praha, Česká aerosolová společnost, 2013.
- LIČBINSKÝ, R., ADAMEC, V. *The Unfavorable Influence of Transport on the Environment*. Transaction on Transport Sciences, 2011, vol. 4, no. 2, p. 91 - 112. ISSN 1802-971X.
- LIČBINSKÝ, R., DUFEK, J., JEDLIČKA, J., LIČBINSKÁ, M. *Legislation Framework*. Transaction on Transport Sciences, 2011, vol. 4, no. 3, p. 165 - 172. ISSN 1802-971X.
- LIČBINSKÝ, R., LIČBINSKÁ, M. *Transport Research*. Transaction on Transport Sciences, 2011, vol. 4, no. 3, p. 173 - 182. ISSN 1802-971X.
- ADAMEC, V., LIČBINSKÝ, R., CHOLAVA, R. *Transport and Health Risks of Transport*. Transaction on Transport Sciences, 2011, vol. 4, no. 3, p. 115 - 134. ISSN 1802-971X.
- ADAMEC, V., JEDLIČKA, J., LIČBINSKÝ, R. *The Possibilities for Mitigating Negative Effects of Transport*. Transaction on Transport Sciences, 2011, vol. 4, no. 3, p. 135 - 150. ISSN 1802-971X.
- HUZLÍK, J., LIČBINSKÝ, R., ĎURČANSKÁ, D. *Polychlorinated Dibenzodioxins and Dibenzofurans Emissions from Transportation*. Communications, 2011, vol. 13, no. 3, p. 41-47. ISSN 1335-4205.
- SIKOROVÁ, L., LIČBINSKÝ, R., ADAMEC, V. *Platinové kovy z automobilových katalyzátorů v životním prostředí*. Chemické listy, 2011, vol. 105, no. 5, p. 361-366. ISSN 0009-2770.

9. Seznam použitých zkratek

AAS	atomová absorpční spektrometrie
BTX	benzen, toluen, xyleny
CDV	Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
CESTI	Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu
CH₄	metan
CNG	Compressed Natural Gas = stlačený zemní plyn
CO	oxid uhelnatý
CO₂	oxid uhličitý
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
GC-FID	plynová chromatografie s plamenoionizační detekcí
GC-MS	plynová chromatografie s hmotnostní detekcí
GPS	The Global Positioning System = Globální polohový systém
ČR	Česká republika
EEA	European Environmental Agency = Evropská agentura pro životní prostředí
EHK	Ekonomická hospodářská komise
EHP	Evropský hospodářský prostor
EK	Evropská Komise
ES	Evropské společenství
EU	Evropská unie
HPLC	vysokotlaká kapalinová chromatografie
ICP-MS	hmotnostní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou
ISKO	informační systém kvality ovzduší
LPG	Liquefied Petrol Gas = zkapalněný ropný plyn
MD	Ministerstvo dopravy ČR
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
MZ	Ministerstvo zdravotnictví ČR
MŽP	Ministerstvo životního prostředí ČR
NO	oxid dusnatý
NO_x	oxidy dusíku
NO₂	oxid dusičitý
N₂O	oxid dusný
NM VOC	ne-metanové plynné uhlovodíky
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development = Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj

OSN	Organizace spojených národů
OZKO	oblasti se zhoršenou kvalitou ovzduší
PAH	polyaromatické uhlovodíky
PCB	polychlorované difenyly
PCDD/F	polychlorované dibenzodioxiny/furany
PM	particulate matter = pevné částice
PM₁₀	pevné částice s aerodynamickým průměrem menším než 10 μm
PM_{2.5}	pevné částice s aerodynamickým průměrem menším než 2,5 μm
POPs	persistentní organické polutanty
PTK	platinové kovy
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic
SO₂	osid siřičitý
SZÚ	Státní zdravotní ústav
TAČR	Technologická agentura České republiky
THE PEP	Transport, Health and Environment Pan European Programme = celoevropský programu „Doprava, zdraví a životní prostředí“
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe = Evropská hospodářská komise OSN (EHK OSN)
UNEP	United Nations Environment Programme = Program Organizace spojených národů pro životní prostředí
US EPA	U. S. Environmental Protection Agency = Agentura ochrany životního prostředí USA
VOC	těkavé organické látky

10. Příloha 1 - Zdroje a vlastnosti vybraných škodlivin v ovzduší

Zdroje a vlastnosti vybraných škodlivin v ovzduší (upraveno dle Adamec et al. 2008a, Adamec et al. 2008b)

Škodlivá látka	Zdroje znečištění	Způsob vzniku v dopravě	Zdravotní rizika
Oxid uhličitý (CO₂)	Je emitován všude tam, kde dochází ke spalovacím procesům uhlíkatých fosilních paliv – zemního plynu, ropných produktů, uhlí, koksu. Zdrojem emisí je samozřejmě i spalování paliv biologického původu – biomasy, dřeva, bionafty a bioplynu.	Spalováním pohonných hmot obsahujících uhlík. Benzínové osobní automobily vyprodukují spálením 1 kg paliva 3 183 g této škodliviny, stejně tak dieselové a nákladní.	Koncentrace 3 – 5 % ve vzduchu je životu nebezpečná po půlhodinovém pobytu, 8 – 10 % způsobuje rychlou ztrátu vědomí a smrt.
Oxid uhelnatý (CO)	Všechny procesy založené na spalování uhlíkatých paliv, fosilních i biologického původu, za nízké teploty a nedostatku spalovacího vzduchu (kyslíku), kdy nedochází k úplné oxidaci uhlovodíků.	Spalováním pohonných hmot obsahujících uhlík za nedostatečného přístupu vzduchu nebo za vysokých teplot. Benzínové osobní automobily produkují 18 až 168 g této škodliviny na kg paliva, dieselové 2,5 až 9 g.kg ⁻¹ paliva. Nákladní pak 7 až 221 g.kg ⁻¹ paliva. Vždy je to v závislosti na dodržovaném limitu EURO.	Toxikologický význam je prvořadý. Blokuje okysličení krve v plicích (tvorba karboxyhemoglobinu), způsobuje poruchy srdce, mozku, zrakové a sluchové potíže, žaludeční nevolnost, bolesti břicha. Při těžké otravě dochází k bezvědomí, smrt udušením nastává při koncentraci nad 750 mg.m ⁻³ .
Oxid siřičitý (SO₂)	Spalování paliv obsahujících síru v celé řadě průmyslových zařízení pro výrobu elektrické energie, výrobu tepelné energie, rafinerie ropy, v dopravě, zpracování kovů, chemický průmysl.	Spalováním pohonných hmot obsahujících síru, avšak v současné době je produkce vzhledem ke kvalitním palivům minimální.	Toxický pro živočichy i rostliny. Plyn s dráždivými účinky, způsobující dýchací potíže, změny plicní kapacity a plicních funkcí. Může reagovat s nukleovými kyselinami.
Oxidy dusíku (NO_x)	Zdrojem oxidů dusíku jsou obecně všechny vysokoteplotní spalovací procesy, kdy dochází ke spalování za přístupu vzduchu. Konkrétně patří mezi nejvýznamnější silniční dopravy, průmysl vč. chemického při zpracování kys. dusičné.	Spalováním směsi paliva a vzduchu oxidací vzdušného dusíku kyslíkem za vysokých teplot. Benzínové osobní automobily produkují 1 až 45 g této škodliviny na kg paliva, dieselové 4,3 až 18,3 g.kg ⁻¹ , nákladní pak 10 až 93,3 g.kg ⁻¹ paliva. NO_x (NO₂, NO) je možné považovat za indikátor znečištění z dopravy.	Dráždivé účinky, mírné až těžké záněty průdušek či plic (bronchitida, bronchopneumonii až akutní plicní edém).

Škodlivá látka	Zdroje znečištění	Způsob vzniku v dopravě	Zdravotní rizika
Oxid dusný (N₂O)	Hlavní antropogenní zdroje jsou zemědělská činnost (hlavně používání dusíkatých průmyslových hnojiv poskytujících zdroj dusíku pro nitrifikaci a denitrifikaci), chemický průmysl, spalovací procesy v energetice a dopravě.	Reakcí vzdušného dusíku se vzdušným kyslíkem, zejména za přítomnosti katalyzátorů ze skupiny platinových kovů. Benzínové osobní automobily produkují 0,3 až 1,1 g této škodliviny na kg paliva, dieselové 0,1 až 0,3 g.kg ⁻¹ a stejně tak nákladní.	Působí výraznější útlumy dechu a srdeční činnosti, případně bezvědomí s rizikem udušení. Při dlouhodobém působení způsobuje nervové poškození a poruchy tvorby krvinek (pravděpodobně s přítomným deficitem vitamínu B ₁₂), zhoršení psychomotorické funkce, kognitivní funkce, poruchy paměti.
Amoniak (NH₃)	Hlavní zdroj představuje rozklad lidských i zvířecích biologických odpadů. Ostatní antropogenní zdroje se podílejí na celkových emisích jen menším dílem a jsou to např. výroba kyseliny dusičné; výroba hnojiv, výbušnin, farmaceutický průmysl, splaškové odpadní vody, používání dusíkatých hnojiv, průmyslové chlazení, výroba ledu; rozklad rostlinného odpadu, odpadní vody ze zemědělských výrob.	Reakcí vzdušného dusíku s vodíkem obsaženým v palivu. Benzínové osobní automobily produkují až 1,4 g této škodliviny na kg paliva, dieselové a nákladní pak přibližně setiny g.kg ⁻¹ paliva.	Dráždivé účinky - nosní sliznice, ústa, hltan, způsobuje kašel a dýchací potíže (kašel, dušnost). Expozice vyšším koncentracím amoniaku může způsobit zavodnění plic (edém) a vážné dýchací potíže. V koncentraci vyšší než 0,5% obj. (asi 3,5 g.m ⁻³) je i krátkodobá expozice smrtelná.
Ozón (O₃)	Troposférický ozon vzniká složitými chemickými reakcemi oxidů dusíku s těkavými organickými sloučeninami za horkých letních dnů a bezvětří, a to především v městských a průmyslových oblastech.	Sekundárními řetězovými radikálovými reakcemi v přízemních vrstvách atmosféry z molekulárního kyslíku za přítomnosti složek výfukových plynů, oxidů dusíku a těkavých uhlovodíků vlivem slunečního záření.	Má dráždivý účinek na dýchací orgány a působí na centrální nervovou soustavu. Expozice O ₃ způsobuje buněčné a strukturální změny, přičemž celkový vliv spočívá ve snížené schopnosti plic vykonávat normální funkce.
Olovo (Pb)	Hlavním antropogenním zdrojem jsou spalovací procesy (spalování odpadů a dřívě olovnatého benzínu), k lokálnímu znečištění dochází i při těžbě a zpracování olova.	V minulosti především spalováním olovnatých benzínů, ve kterých bylo přítomno jako tetraethylolovo. Antidetonační na jeho bázi se od r. 2001 nepoužívají. Nyní jsou jeho zdroji např. vyvažovací tělíska pneumatik, maziva, oleje a částice z opotřebování ložisek.	Toxický kov, mající biochemický účinek na organismus. Otrava (chronická) se projevuje nechutenstvím, malátností, bolestmi hlavy a kloubů, žaludečními a střevními potížemi, křečemi v břiše, poškozením jater, plic, kostní dřeni a periferního popř. centrálního nervstva, může způsobovat neplodnost a ovlivňovat plod. Olovo také způsobuje problémy s chováním, nižší IQ a snižuje schopnost se soustředit. Může způsobovat vznik nádorů.

Škodlivá látka	Zdroje znečištění	Způsob vzniku v dopravě	Zdravotní rizika
Kadmium (Cd)	Do ovzduší se kadmium dostává při jeho těžbě, výrobě a zpracování. Významným zdrojem je také spalování fosilních paliv a komunálního a nemocničního odpadu.	Opotřebováváním různých součástí automobilu.	Toxický kov. Akutní otrava se projevuje zvracením, pálením, křečovými bolestmi v žaludeční krajině, průjmy, závratěmi až bezvědomím, může skončit smrtí (30 až 40 mg). Chronická otrava má dosti pestrý a neurčitý obraz. Bioakumulací se ukládá v játrech a ledvinách. Do organismu se dostává potravou, dýcháním, prostupuje placentou a je pravděpodobně karcinogenní.
Nikl (Ni)	Antropogenním zdrojem je těžba a zpracování niklu a spalování fosilních paliv a odpadů.	Obrusem brzdového obložení a různých namáhaných spojů.	Toxický kov, vyvolávající kontaktní alergie, akutní i chronické otravy. Možný karcinogen.
Chrom (Cr)	Do ovzduší je emitován v prachových částicích uvolňovaných při spalování fosilních paliv. Dalšími zdroji chromu jsou cementárny, spalovny komunálních odpadů, výfukové plyny z automobilů s katalyzátorem, emise z klimatizačních chladících věží používajících sloučeniny chromu jako inhibitory koroze a z opotřebovaných brzdových obložení automobilů.	Mechanicou separací z rotujících částí motoru a z brzdového obložení.	Toxický kov, zejména jeho šestimocné sloučeniny. Již 0,5 g oxidu chromitého usmrcuje člověka. Alergen, možný karcinogen.
Platinové kovy (platina Pt, rhodium -Rh, palladium - Pd)	Součást výfukových plynů z automobilů. Spalování zdravotnického materiálu.	Uvolňování z automobilových katalyzátorů. PTK je možné považovat za indikátor znečištění z dopravy.	Rhodium (Rh) - může způsobovat kožní alergie; platina (Pt) - nezpůsobuje takové obtíže, jako její sloučeniny, vzácně způsobuje vyrážku; paladium (Pd) - většinou považováno za toxikologicky bezvýznamné, jeho sloučeniny mohou mít hepatotoxický a nefrotoxický účinek, mohou způsobovat hemolýzu.

Škodlivá látka	Zdroje znečištění	Způsob vzniku v dopravě	Zdravotní rizika
Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH)	Vznikají v rámci spalovacích procesů jakýchkoli materiálů obsahujících uhlík, pokud není spalování dokonalé. Jedná se o spalování téměř všech druhů uhlíkatých paliv, dále koksárenství, rafinerie ropy, zplyňování a zkapalňování uhlí; výrobu hliníku, výroba barviv, syntetických vláken, plastů a některých chemikálií (rozpouštědla), výroba insekticidů.	Nedokonalé spalování pohonných hmot, případně obrusem povrchu vozovky. Dieselové a nákladní automobily produkují spálení 1kg paliva setiny gramu této skupiny škodlivin, benzínové přibližně tisícinu g.kg ⁻¹ paliva. Benzo[a]pyren jako zastupce PAH je možné považovat za indikátor znečištění z dopravy.	Mnohé sloučeniny z této skupiny mají prokazatelné mutagenní a karcinogenní účinky - benzo[a]pyren, který reaguje s nukleofilními částmi DNA, nitro PAHs. Jsou považovány za tzv. ultimativní karcinogeny. Toxikologické účinky - interakce s vnitřní biologickou strukturou.
Metan (CH₄)	Mezi antropogenní zdroje methanu patří chov domácích zvířat, emise z těžby a zpracování fosilních paliv, spalování biomasy, skládky odpadů, pěstování rýže, výroba látek jako acetylen, vodík, kyanidy a methanol, koksárenství, čistírny odpadních vod s anaerobní stabilizací kalu (vyhňívání, vznik bioplynu).	Nedokonalé spalování pohonných hmot. Benzínové osobní automobily produkují 0,1 až 0,9 g této škodliviny na kg paliva, dieselové setiny gramů a nákladní od 0.1 až 0,6 g.kg ⁻¹ paliva.	Přímé toxické působení methanu na zdraví člověka nebylo zaznamenáno. Krátkodobá expozice vůči vysokým koncentracím může vést k udušení z důvodu nedostatku kyslíku.
Těkavé organické látky (NM VOC)	Zdrojem je palování fosilních paliv, kde unikají při nedokonalém spálení paliva, jak v mobilních (silniční doprava), tak ve stacionárních spalovacích zařízeních. Dále výroba a aplikace barev a sprejů. Úniky mohou také nastávat při nejrůznějších průmyslových procesech, zejména čištění, odmašťování, využití rozpouštědel.	Spalováním pohonných hmot a odpařováním pohonných hmot z automobilů. Benzínové osobní automobily produkují 1,3 až 40 g této škodliviny na kg paliva, dieselové 0,6 až 2,3 g.kg ⁻¹ , nákladní pak 3 až 42 g.kg ⁻¹ paliva.	Viz níže u jednotlivých organických látek
Benzen (C₆H₆)	Hlavním zdrojem jsou výfukové plyny automobilů, dále těkání benzínu z palivové nádrže nebo během tankování. Další z chemického průmyslu, rafinerií ropy a plynu a ze spalování paliv (uhlí, oleje). Uvolňuje se při procesech v koksárenských pecích, těžbě a zpracování neželezných rud, zpracování dřeva, těžbě uhlí a výrobě textilu.	Spalováním pohonných hmot a vypařováním během jejich manipulace, distribuce a skladování. V Evropě je přítomen v automobilovém benzínu v podílu kolem 5 %, někdy i více než 10 %. Benzen je možné považovat za indikátor znečištění z dopravy.	Poškození nervového systému, jater, imunity, dýchacích cest, leukémie. Je prokázaný lidský karcinogen klasifikovaný ve skupině 1 IARC (látky karcinogenní pro člověka). Jako pro genotoxický karcinogen pro něj nelze stanovit teoreticky bezpečný limit v ovzduší.

Škodlivá látka	Zdroje znečištění	Způsob vzniku v dopravě	Zdravotní rizika
Toluen ($C_6H_5-CH_3$)	Zejména z benzínu. Uvolňuje se během jeho výroby, transportu a spalování i při nakládání s ostatními palivy. Vzniká také při výrobě koksu, styrenu a dalších chemikálií. Uvolňuje se při výrobě, používání a zneškodňování průmyslových i domácích produktů obsahujících toluen, jako jsou nátěry, ředidla, laky, pryskyřice, inhibitory koroze nebo lepidla. Do prostředí se toluen může dostat únikem ze zásobních tanků a ze skládek odpadů.	Spalováním pohonných hmot, v kterých je používán ve směsích s benzenem a xylenem jako příměs pro zvyšování oktanového čísla automobilových benzinů.	Inhalační experimenty na zvířatech prokázaly, že většina toluenu je distribuována do tukové tkáně, nadledvinek, ledvin a mozku. Byly prokázány vážné dysfunkce CNS a poškození chromozomů periferních lymfocytů.
Styren ($C_6H_5-CH=CH_2$)	Uvolňuje se do prostředí během jeho výroby, použití (jako rozpouštědlo) nebo zpracování (výroba plastů). Nejvýznamnějším zdrojem je chemický průmysl. Dále petrochemický průmysl (rafinerie ropy), výfukové plyny a cigaretový kouř. Uvolňuje se i při spalování odpadů.	Nedokonalé spalování pohonných hmot.	Toxické účinky styrenu na organismus člověka zahrnují poruchy funkce CNS (bolesti hlavy, malátnost, napětí, nevolnost, zvracení) a při expozici vysokým koncentracím (nad 420 mg.m ⁻³) bylo pozorováno akutní podráždění očních spojivek a sliznice horních partií respiračního traktu, zvýšení počtu chromozomálních aberací v periferních lymfocytech. Jeho velice reaktivní části mohou reagovat s DNA a působit mutace.
Formaldehyd ($H_2C=O$)	Je produktem nedokonalého spalování organických látek. Významným zdrojem jsou spalovací motory automobilů. Nachází se v cigaretovém kouři a v emisích ze spaloven odpadů, tepelných elektráren, tepláren a rafinerií ropy. Dostává se do ovzduší i během použití jako desinfekčního a sterilizačního činidla. Uvolňuje se také z výrobků obsahujících formaldehyd jako jsou překližky, koberce, papíry, čisticí prostředky, izolační materiály, nábytek, textilie a prostředky na konzervaci dřeva.	Nedokonalé spalování pohonných hmot.	Poruchy dýchání, dráždivé účinky sliznice (nos, oči), astma, kožní alergie, rakovina, leukémie. Možný karcinogen

Škodlivá látka	Zdroje znečištění	Způsob vzniku v dopravě	Zdravotní rizika
1,3-butadien (CH ₂ =CH- CH=CH ₂)	Nedokonalým spalováním pohonných hmot, zejména s vysokým obsahem olefinů.	Nedokonalým spalováním pohonných hmot, zejména s vysokým obsahem olefinů.	V nízkých koncentracích může způsobovat podráždění očí, nosu a krku. Akutní působení ve vysokých koncentracích může vyvolat poškození CNS, bolesti hlavy, snížení krevního tlaku až bezvědomí. Je to látka klasifikovaná jako karcinogen podezřelý z vyvolávání leukémie (skupina 2A IARC).
Polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany (PCDD/F)	Nekontrolované spalování rozličných materiálů, například odpadů ze zemědělství, veškerý další průmysl, kde probíhají spalovací procesy, jako jsou například ocelárny, železářny, teplárny, elektrárny, spalování odpadů, vznikají v průmyslu papíru a celulózy a při spalování paliv v motorových vozidlech.	Oxidací částic uhlíku ve spalinách při teplotách 250 – 350 °C za přítomnosti kyslíku, vodní páry a chlóru.	Jsou nebezpečné i ve stopových koncentracích. Dlouhodobé působení dioxinů vede k poškození imunitního a nervového systému, ke změnám endokrinního systému (zejména štítné žlázy) a reprodukčních funkcí. 2,3,7,8 tetrachlordibenzo-p-dioxin je klasifikován jako prokázaný karcinogen pro člověka.
Polychlorované bifenily (PCB)	Průmyslové procesy, např. elektrárny a zpracování železa a oceli.	Syntézou částic uhlíku, kyslíku, vodní páry za přítomnosti chlóru.	Akutní otravy způsobují bolest hlavy, ztrátu vlasů, bronchitidu. Chronické působení vede k poškození jater, krevního oběhu a problémům s reprodukčním cyklem i s hormonálním a imunitním systémem. Od roku 2013 jsou PCB považovány za lidské karcinogeny (1 dle IARC).

Škodlivá látka	Zdroje znečištění	Způsob vzniku v dopravě	Zdravotní rizika
Pevné částice (PM)	<p>Nejvýznamnějším antropogenním zdrojem jsou spalovací procesy, v automobilových motorech a elektrárnách a další vysokoteplotní procesy, jako je tavení rud a kovů nebo svařování. Vznikají také odnosem částic větrem ze stavebních ploch nebo v důsledku odstranění vegetačního pokryvu z půdy. Dalším zdrojem mohou být zemědělské operace, nezpevněné cesty, těžební činnost a jakékoliv procesy, při kterých se vyskytují částice o dané velikosti (např. výroba a použití cementu a vápna, lomy, povrchové doly).</p>	<p>PM_{2,5-10} (hrubá frakce) - převážně zvřením prachu z vozovek, oděrem pneumatik a při spalovacích procesech. Setrvává v blízkém okolí zdroje.</p> <p>PM_{2,5} (jemná frakce) - v důsledku chemických reakcí při spalování pohonných hmot.</p> <p>PM_{0,1} (nanočástice, ultrajemné částice) – spalováním pohonných hmot zejména v benzínových motorech, koagulací a akumulací z plynných emisí, mohou se přenášet i na velké vzdálenosti.</p> <p>Dieselové osobní automobily produkují 0,3 až 4,8 g této škodliviny na kg paliva, nákladní pak 0,4 až 6,3 g.kg⁻¹ paliva v závislosti na dodržovaném limitu EURO.</p> <p>Ultrajemné částice (nanočástice) je možné považovat za indikátor znečištění z dopravy.</p>	<p>Nebezpečnost PM nespočívá jen v jejich mechanických vlastnostech, ale i v obsahu řady rizikových organických a anorganických polutantů, které se na ně vážou. Dlouhodobé vystavení jejich účinkům zkracuje očekávanou délku života vlivem onemocnění srdce a plicními chorobami, poslední studie ukazují i na možný vznik zejména rakoviny plic. Nezanedbatelné jsou i změny v imunitním systému člověka, vyvolané také přítomností PM v ovzduší. V důsledku toho může docházet jak ke změnám ve smyslu navození imunodeficitu, tak i rozvoje autoimunity či alergické reakce. Pevné částice ve vnějším ovzduší jsou od roku 2016 zařazeny dle IARC mezi lidské karcinogeny ve skupině 1.</p>

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
Líšeňská 33a
636 00 Brno
www.cdv.cz

