



Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

METODIKA



Měření kvality ovzduší senzoricou
jednotkou enviSENS v místech
s vysokou dopravní zátěží



CENTRUM
DOPRAVNÍHO
VÝZKUMU



Měření kvality ovzduší senzorickou jednotkou enviSENS v místech s vysokou dopravní zátěží

certifikovaná metodika

2020

Metodika byla vytvořena se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu Epsilon v rámci řešení projektu TH03030278 „Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními“ na výzkumné infrastruktuře pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

Odpovědný řešitel: Mgr. Roman Ličbínský, Ph.D.

Spoluřešitelé: RNDr. Jiří Huzlík, Ph.D., Karel Effenberger, Mgr. Pavel Chaloupecký, Ondřej Ambroz, Jiří Hadrava, Ing. Zbyněk Novák

Recenzenti: Ing. Petra Bauerová, Ph.D., vedoucí Observatoře Tušimice, Český hydrometeorologický ústav
Mgr. Jiří Bílek, Institut enviromentálních technologií, Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava

Metodika schválená Ministerstvem dopravy pod č. j. MD-634/2021-710/7

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

Anotace

Certifikovaná metodika

Autoři:

Mgr. Roman Ličbinský, RNDr. Jiří Huzlík, Ph.D., Mgr. Pavel Chaloupecký, Ing. Ondřej Ambroz, Jiří Hadrava, Ing. Zbyněk Novák

Název:

Měření kvality ovzduší senzorickou jednotkou enviSENS v místech s vysokou dopravní zátěží

Abstrakt:

Měření kvality ovzduší za účelem rozhodnutí, zda jsou dodržovány legislativou stanovené imisní limity by měla být vždy realizována legislativou definovanými postupy. Ale v případě, kdy je cílem porovnání dvou stavů vůči sobě navzájem či vyhodnocení trendu, pak se jeví jako velmi výhodné využít levnějších alternativ měření, jako jsou např. nízkonákladové senzory. Obecně je nízkonákladovým senzorům v posledních letech věnována značná pozornost, a to jak autoritami zajišťujícími měření kvality ovzduší v souladu s legislativními předpisy, tak v podobě vědeckých studií univerzitních týmů či výzkumných center. Vzhledem k diferenciálnímu chování senzorů různých výrobců v reálném prostředí a k složitosti problematiky okolo kontroly kvality dat a udržitelnosti měření senzory žádná z výše uvedených autorit či institucí zatím nedefinovala jednotné metodické postupy pro nakládání s touto technologií.

Tento cíl si neklade ani předkládaná metodika. Ta byla pojata jako seznámení uživatele se správnou aplikací a manipulací se senzorickou jednotkou enviSENS, vyvinutou v rámci řešení projektu TH03030278 „Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními“ včetně popisu základních principů fungování, vyhodnocování dat a doporučených aplikací.

Klíčová slova:**Certifikační orgán:**

ČR, Ministerstvo dopravy, Odbor kosmických aktivit a ITS.

Annotation

Certified Method

Authors:

Mgr. Roman Ličbínský, RNDr. Jiří Huzlík, Ph.D., Karel Effenberger, Mgr. Pavel Chaloupecký, Ing. Ondřej Ambroz, Jiří Hadrava, Ing. Zbyněk Novák

Title:

Measurement of air quality using sensor unit enviSENS in areas with high traffic load.

Abstract:

The implementation of air quality measurements to determine compliance with air quality limits should always be carried out in accordance with procedures defined by legislation. However, in the case where the aim is to compare two conditions with each other or to evaluate the trend, then it seems very advantageous to use cheaper measurement alternatives, such as low-cost sensors. In general, low-cost sensors have received considerable attention in recent years, both by the authorities ensuring the measurement of air quality in accordance with legislative regulations and in the form of scientific studies of university teams or research centers. Due to the differential behavior of sensors from different manufacturers in the real environment and the complexity of the issue of data quality control and sustainability of sensor measurements, none of the above authorities or institutions have yet defined uniform methodological guideline for dealing with this technology.

The presented methodology does not achieve this goal either. This was conceived as guideline for users for correct application and handling of the enviSENS sensor unit, developed within the project TH03030278 "Application of low-cost sensors for measuring air quality in connection with traffic measures", including a description of basic operating principles, data evaluation and recommended applications.

Keywords:**Certification Authority:**

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

Předmluva

Doprava je jedním z faktorů, který významně ovlivňuje kvalitu ovzduší zejména v městských oblastech. Příčinou je produkce emisí škodlivin do volného ovzduší zejména v podobě výfukových plynů vznikajících při spalování pohonných hmot. Důsledkem toho je pětina městské populace v EU vystavena znečištěnému ovzduší, které překračuje imisní limity definované legislativou EU (EEA, 2017). Městské správy a samosprávy tak přijímají různá opatření k regulaci dopravy na svých územích za účelem zlepšení kvality ovzduší. Bohužel v případě nových dopravně technických opatření (např. stavba obchvatu) jsou dopady odhadovány před jejich zavedením v rámci procesu EIA pouze různými modelovými nástroji, ale nejsou ověřovány reálnými měřeními v terénu. Argumentem proti je většinou nákladnost realizace měření kvality ovzduší.

Metodika byla vypracována právě jako reakce na tento stav a doporučuje, jakým způsobem je možné realizovat orientační měření kvality ovzduší v souvislosti se zamýšlenými či plánovanými dopravními opatřeními alternativními a levnějšími postupy se zařízením využívajícím k měření nízkonákladové senzory, konkrétně senzorickou jednotou enviSENS. Metodika rovněž obsahuje zásady vyhodnocení a interpretace dat naměřených zařízením tohoto typu tak, aby byla vždy jasně definována nejistota dané metody měření. Metodika vznikla v rámci řešení projektu TH03030278 „Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními“, jehož cílem bylo vyvinout zařízení na bázi nízkonákladových senzorů, které bude možné využít k monitoringu kvality ovzduší s odpovídající kvalitou produkovaných dat, reprodukovatelností měření a robustností celého systému. Je tedy primárně zaměřena na využití vyvinutého zařízení.

Obsah

1. Cíl metodiky	9
2. Úvod	10
3. Metodická část	13
3.1. Přístroj a jeho funkce	14
3.1.1. Technické parametry	15
3.1.2. Popis přístroje	16
3.1.3. Specifikace jednotlivých komponent jednotky enviSENS	17
3.2. Princip měření	22
3.2.1. Plynové senzory	22
3.2.2. Prachové senzory	23
3.3. Postup měření	23
3.3.1. Zásady výběru měřicí lokality	23
3.3.2. Měření senzorickou jednotkou enviSENS	24
3.4. Vyhodnocení naměřených dat	26
3.5. Interpretace výsledků	29
3.5.1. Příklad porovnání výsledků měření referenčními metodami a senzory umístěnými ve funkčním vzorku	30
Oxid dusičitý	31
Oxid uhelnatý	33
Pevné částice PM ₁	36
Pevné částice PM _{2,5}	39
Pevné částice PM ₁₀	41
4. Srovnání novosti postupů	44
5. Popis uplatnění certifikované metodiky	46
6. Ekonomické aspekty	48
7. Použitá literatura	49
8. Seznam publikací, které předcházely metodice	51
8.1.1. Články ve sborníku	51
8.1.2. Vystoupení na konferencích a seminářích	51
9. Seznam použitých zkratk	53

1. Cíl metodiky

Cílem metodiky je předložit v uceleném dokumentu doporučení pro realizaci měření, vyhodnocení a interpretaci dat získaných použitím přístroje enviSENS pracujícím na bázi nízkonákladových senzorů, které byly získány při vývoji tohoto zařízení a jsou uvedeny jako konkrétní příklady. Současně se vymezuje vůči legislativou definovaným požadavkům na sledování kvality ovzduší, aby byl lépe vnímán význam využívání takovýchto zařízení.

2. Úvod

Požadavek sledování a hodnocení kvality ovzduší je 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 měření, 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). Detailněji se této problematice věnuje již dříve zpracovaná metodika „Monitorování kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží“ (Ličbinský a kol., 2017).

Nelze pochybovat o tom, že měření kvality ovzduší za účelem rozhodnutí, zda jsou dodržovány legislativou stanovené imisní limity musí být realizována legislativou definovanými postupy. Ale v případě, kdy je cílem prorovnání dvou stavů vůči sobě navzájem (např. právě kvalita ovzduší v daném místě před zavedením dopravního omezení a po jeho zavedení) a jedná-li se zejména o jednorázové orientační ověření, pak se jeví jako velmi výhodné využít levnějších alternativ měření, jako jsou např. nízkonákladové senzory.

V posledních letech se právě jako možná levnější alternativa pro měření kvality ovzduší jeví různé typy senzorů, nejčastěji 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 kapalný elektrolyt nahrazen tuhou látkou s iontovou vodivostí (tuhým elektrolytem). Velká skupina senzorů je založena na měření změn elektronové vodivosti určitých materiálů v přítomnosti některých plyných látek. Jde o tzv. metaloxidové senzory a chemirezistory. Změn teploty při chemických reakcích, především při katalytické oxidaci plyných látek, 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. Třetí skupinou jsou senzory s pevným elektrolytem, kterým je nejčastěji keramická destička z oxidu zirkoničitého nebo oxidu yttria krytá z obou stran platinou.

Paralelní použití jednotlivých senzorů vyráběných desítkami společností po celém světě z různých zemí (Čína, Velká Británie, Kanada, Nový Zéland, Francie, Španělsko apod.) není bohužel v podstatě technicky možné, jelikož vyžadují připojení dalších systémů pro sjednocení měření minimálně v postupu stažení nebo přenosu dat. Z tohoto důvodu je na trhu dostupná také celá řada kompaktnějších zařízení, která mají již tento problém vyřešen (viz. kap. 4).

Používání zařízení využívajících k měření výše uvedené typy senzorů má svá omezení a skýtá řadu úskalí. Jedním z nich je odolnost, resp. krátká doba životnosti, která se pohybuje v rozmezí od cca. 6 měsíců po několik málo let (Kumar et al., 2015), což v podstatě prokázala i měření realizovaná v rámci řešení projektu TH03030278 (viz. např. Chaloupecký a kol, 2019 nebo Ličbinský, 2020). Dalším 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). Tyto nedostatky je však do určité míry možné eliminovat optimalizací umístění samotných senzorů v zařízení, úpravou průtoku vzorkované vzdušnině a dalšími opatřeními, jak bylo prokázáno v rámci řešení už zmíněného projektu (Chaloupecký a kol, 2019, Ličbinský, 2020, Ličbinský 2021).

Nespornou výhodou elektrochemických senzorů je jejich nízká pořizovací cena a provozní náklady z pohledu využití pro krátkodobé (jednorázové) měřicí kampaně. Nejjednodušší senzory, resp. senzorové 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 počtu měřených škodlivin. Uvedené částky jsou sice stále řádově níže, než je tomu v případě kompletně vybavené stacionární stanice nebo mobilní stanice pro měření kvality ovzduší vybavené jednotlivými analyzátory, které pracují na principech referenčních (certifikovaných) metod měření, ale již je nelze považovat za nízkonákladové. Roční provozní náklady jsou pak 3 až 5 krát nižší v porovnání s klasickými stanicemi monitoringu kvality ovzduší (Kumar et al., 2015). V závislosti na požadované délce měřicí kampaně a hustotě měřicí sítě se pak ovšem s ohledem na omezenou životnost senzorů a potřebu kompletní obnovy zařízení po uplynutí doporučené doby provozu tyto provozní náklady několikanásobně navyšují.

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. Doprava emituje oxidy dusíku, pevné částice, resp. ultrajemné částice, benzen, benzo[a]pyren a platinové kovy.

S ohledem na náročnost měření, resp. stanovení koncentrací benzo[a]pyrenu a platinových kovů a s tím spojené dostupnosti nízkonákladových senzorů pro tyto látky byl vývoj senzorické jednotky v rámci uvedeného projektu a s tím spojené zpracování této metodiky zaměřen pouze na oxidy dusíku, pevné částice a těkavé organické látky. Doplnkově je měřen oxid uhelnatý, který je emitován do ovzduší vysokoteplotním spalováním organických látek, tedy jak dopravou, tak stacionárními zdroji znečištění.

3. Metodická část

Před samotným sestavením senzorické jednotky jejíž použití je popisováno v rámci této metodiky, proběhl v rámci řešení projektu TH03030278 „Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními“ výběr senzorů vhodných pro měření kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží. Sensory byly vybírány na základě těchto definovaných kritérií:

1. Primární měřicí senzorické jednotky – od každého typu ve světě nejčastěji používaných primárních senzorů byl vybrán jen 1 produkt, a to buď přímo od výrobce, nebo od některého z aplikátorů, který k interpretaci dat prokazatelně nepoužívá žádné přepočtové rovnice (důvodem je zjednodušení systému sběru a zpracování naměřených dat)
2. Cena senzoru – vzhledem k finančnímu rámci projektu a především vzhledem k plánovanému využití senzorických jednotek jako nízkonákladového řešení měření kvality ovzduší byl kladen důraz na nízkou nebo alespoň akceptovatelnou cenovou hladinu poptávaných produktů
3. Měřené látky – vzhledem k charakteru projektu, který cílí především na látky primárně emitované z dopravy, byly poptány pouze jednotky monitorující následující znečišťující látky: prachové částice (frakce PM₁₀, PM_{2,5}), CO, NO, NO₂ a suma těkavých organických látek.
4. Hodnocení kvality měření jednotlivých senzorů na základě rešerší již provedených zahraničních studií – hlavním důvodem zařazení tohoto kritéria je potenciální skutečnost, aby nedošlo k opomenutí některého z nejlépe hodnocených výrobců.
5. Za senzory použitelné k měření kvality ovzduší byly považovány ty, jimiž naměřená data koncentrací škodlivin vykazují větší než 50 % shodu s měřidlem použitým k porovnávání, tj. takové senzory, jejichž koeficient determinace R² při statistickém porovnání výsledků měření získaných senzorem s výsledky dosaženými referenční nebo ekvivalentní metodou měření je větší než 0,5.

V rámci testovacích měření realizovaných v rámci zmíněného projektu po dobu cca. jednoho roku byly ověřovány senzory uvedené v tab. 1.

Tab. 1 Seznam testovaných senzorů

Název senzoru	Měřené látky	Rozsah měření
ENVEA Cairsens NO ₂	NO ₂	0,02 - 0,25 ppm
ENVEA Cairsens NM VOC	Suma těkavých organických látek (VOC)	0,01 – 16 ppm
ENVEA Cairsens CO	CO	0,05 – 20 ppm
Alphasense B43F	NO ₂	do 20 ppm
Alphasense B4	NO	do 20 ppm
Alphasense PID-AH2	Suma těkavých organických látek (VOC)	do 50 ppm

Název senzoru	Měřené látky	Rozsah měření
Alphasense B4	CO	do 1000 ppm
Alphasense OPC-N2	Prašné částice – frakce PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁	0,38 - 17 µm
Winsen ME3-NO2	NO ₂	0,1 – 20 ppm
Winsen ZP01-MP503	Suma těkavých organických látek (VOC), po dodání zjištěno, že uvedený senzor je nevhodný pro požadovanou aplikaci	nevhodný
Winsen ME3-CO	CO	0,5 – 1000 ppm
Plantower	Prašné částice – frakce PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁	0,3 - 10 µm
Aeroqual AQY	O ₃ , NO ₂ , PM _{2.5} , meteorologie	O ₃ 0,1 – 200 ppb
		NO ₂ : 0,1 – 500 ppb
		PM 0 - 1000 µg/m ³

Na základě těchto dlouhodobých testovacích měření realizovaných v rámci řešení zmíněného projektu, která probíhala na dvou lokalitách po dobu cca. 8 měsíců, byly vybrány senzory ENVEA Cairclip NO₂, ENVEA Cairclip CO a Plantower PMS5003, které byly podrobeny dalšímu testování jejich vhodnosti k využití pro měření kvality ovzduší. Na základě těchto měření pak byla sestavena senzorická jednotka enviSENS. Předkládaná metodika se nevěnuje detailně výběru senzorů, protože jejím cílem není přinést návod, jak vybrat vhodný senzor pro měření kvality ovzduší. Detailnější informace lze nalézt v odborných zprávách za jednotlivé roky řešení zmíněného projektu (Ličbínský 2019, Ličbínský, 2020, Ličbínský 2021).

Metodická část byla pojata jako seznámení uživatele se správnou aplikací a manipulací se senzorickou jednotkou enviSENS, vyvinutou v rámci řešení projektu TH03030278 „Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními“ včetně popisu základních principů fungování, vyhodnocování dat a doporučených aplikací.

3.1. *Přístroj a jeho funkce*

Senzorická jednotka enviSENS je určena k měření jednotlivých složek kvality venkovního ovzduší, a to především na dopravních lokalitách (ideálně v městských aglomeracích). Tato jednotka je koncipována jako modulární a je možné ji výrobcem přizpůsobit požadavkům koncového uživatele v návaznosti na jeho potřebách – měřené látky, komunikace s nadřazenou jednotkou, způsob napájení, možnosti zobrazování a prezentace naměřených dat.

Pro relevantní vyhodnocení naměřených dat je nezbytné monitorovat také základní meteorologické parametry – minimálně v rozsahu rychlost a směr větru, teplota a vlhkost vzduchu.

3.1.1. Technické parametry

U plynových senzorů byla nejkvalitnější data v rámci realizace projektu opakovaně naměřena pomocí senzorů od francouzské společnosti ENVEA Cairpol, u prachových senzorů pak byla nejlepší kombinace kvality dat a nízkonákladovosti zjištěna u čínských optických senzorů Plantower. Senzory VOC kvůli nemožnosti relevantního posouzení kvality dat, a především vysoké pořizovací ceně senzoru nesplňující podmínku nízkonákladovosti zařízení nejsou v rámci této metodiky doporučeny k používání pro účel senzorických měření.

Jednotka enviSENS proto obsahuje následující senzory:

- Senzor NO₂ - ENVEA Cairclip NO₂
- Senzor CO - ENVEA Cairclip CO
- Senzor PM_x - Plantower PMS5003

Vzhledem k vybraným typům senzorů není potřeba řešit přívod vzorku k senzorům, jelikož všechny vybrané senzory disponují aktivním nasáváním vzorku pomocí vestavných mikroventilátorů. V rámci projektu bylo testováno i použití centrálního nasávání se sušením vzorku i bez něj a bylo zjištěno, že vybrané senzory ENVEA Cairpol i Plantower PMS5003, které disponují vlastním nasávacím systémem, poskytovaly s tímto systémem méně kvalitní data než bez něj (především díky potížím s průtokem). Centrální nasávání s manifoldem tak není pro přívod vzorku třeba

Technická specifikace jednotky enviSENS:

- Zařízení určené pro monitoring kvality venkovního ovzduší
- Měřené látky: NO₂, CO, prašný aerosol – frakce PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁
- Přenos dat: GSM rozhraní
- Možnost vzdáleného ovládání: pomocí SW envitechMULTISENSE
- Odběr: 5 W
- Ideální provozní podmínky dle specifikace výrobce: -10°C až +40°C; 10% až 90% RH
- Rozměry: 231 x 125 x 90 mm (V x Š x H)
- Konfigurační, ovládací a zobrazovací software: envitechMULTISENSE (výrobce ENVitech Bohemia s.r.o.). Tento software byl vyvinutý v rámci realizace projektu.
- Ukládání do databáze: MySQL
- Variabilní možnost instalace (např. na sloupy, zábradlí, zeď, apod.)
- Napájení: ze sítě (230 V, 50 Hz).

3.1.2. Popis přístroje

Rozměry standardní jednotky enviSENS jsou 231 x 125 x 90 mm. Při využití verze pouze pro monitoring prachových částic je možné použít verzi o rozměrech 151 x 125 x 90 mm.

Základní stavební jednotkou jednotky je průmyslový minipočítač Raspberry Pi 4 Model B – 2 GB RAM + na míru vyvinutá rozšiřující deska Multisens, jež umožňuje jednoduše připojit různý hardware určený pro komunikaci s nadřazenou jednotkou – GSM, LORA, WI-FI, apod a umožňuje rozšíření standartní konektorové výbavy Raspberry Pi. Senzory jsou připojeny k řídící jednotce pomocí analogového rozhraní (senzory ENVEA Cairpol), či pomocí digitálního rozhraní UART (senzor Plantower).

Důležitou součástí systému je konfigurační, ovládací a komunikační software envitechMULTISENSE. Tento software umožňuje řádně vyškolenému operátorovi nakonfigurovat jednotku dle potřeb operátora – přidávat či odebírat senzory (včetně senzorů od jiných výrobců, které jsou v softwaru naprogramovány), nastavit způsob komunikace s nadřazenou jednotkou, vkládat korekční koeficienty na základě souměření s referenční jednotkou, provádět časovou synchronizaci, nastavení průměrování hodnot, apod. Software také umožňuje zobrazení všech naměřených dat i metadat (včetně automatické zobrazení aktuální polohy díky integrovanému modulu GPS) v tabelární i jednoduché grafické podobě (software není určen pro prezentaci dat veřejnosti).

Systém ukládá data do multiplatformní databáze MySQL, která je otevřená pod bezplatnou licenci GPL. Tato databáze se nainstaluje na centrální server či počítač, kam si uživatel přeje zasílat naměřená data.

Jednotka enviSENS vyvinutá v rámci projektu je koncipována pro napájení ze sítě (230 V, 50 Hz), a to především z důvodu poměrně vysoké spotřeby zvoleného průmyslového minipočítače a GSM a GPS modulů. Jednotka využívá komponenty náročnější na odběr elektrické energie, které byly upřednostněny kvůli potřebné funkčnosti systému (průměrování dat z více měření – trvalé zapnutí, automatické zjišťování aktuální polohy), kvůli použití robustního SW a komunikačním možnostem (komunikace pomocí LoRa či jiných IoT má pro účely imisního monitoringu mnohá úskalí).

Konfigurace standardizované jednotky enviSENS:

- měřicí box (krabice) o rozměrech 231 x 125 x 90 mm
- senzor NO₂ - ENVEA Cairclip NO₂
- senzor CO - ENVEA Cairclip CO
- senzor PM_x - Plantower PMS5003
- GSM modul pro komunikaci s nadřazenou jednotkou
- napájení ze sítě (230 V, 50 Hz)
- externí zařízení na monitoring základních meteorologických parametrů

3.1.3. Specifikace jednotlivých komponent jednotky enviSENS

1. Senzor NO₂ - ENVEA Cairclip NO₂

Měřicí rozsah: 0 – 0,25 ppm

Detekční limit: 0,02 ppm

Rozlišení: 1 ppb

Provozní rozsah teploty vzduchu: -20°C až +40°C

Provozní rozsah relativní vlhkosti vzduchu: 10% až 90%

Typ senzoru: Elektrochemický

Nasávání pomocí interního řízeného mikroventilátoru

LCD displej zobrazující základní údaje o měřené koncentraci a dalších parametrech senzoru

Řídící deska: interní mikroprocesor umožňující základní zpracování dat

Interní paměť: 20 dní minutových dat

Napájení a odběr: 5V DC / 500 mA (napájení pomocí USB portu)

Rozměry: 63 x 32 mm (V x Š)

Prachový filtr na vstupu vzorku

Více informací na webových stránkách výrobce: <https://www.envea.global/s/ambient-en/micro-sensors-a/cairsens-no2/>

2. Senzor CO - ENVEA Cairclip CO

Měřicí rozsah: 0 – 20 ppm

Detekční limit: 0,05 ppm

Rozlišení: 1 ppb

Provozní rozsah teploty vzduchu: -20°C až +50°C

Provozní rozsah relativní vlhkosti vzduchu: 10 % až 90 %

Typ senzoru: Elektrochemický

Nasávání pomocí interního řízeného mikroventilátoru

LCD displej zobrazující základní údaje o měřené koncentraci a dalších parametrech senzoru

Řídící deska: interní mikroprocesor umožňující základní zpracování dat

Interní paměť: 20 dní minutových dat

Napájení a odběr: 5 V DC / 500 mA (napájení pomocí USB portu)

Rozměry: 63 x 32 mm (V x Š)

Prachový filtr na vstupu vzorku

Více informací na webových stránkách výrobce: <https://www.envea.global/s/ambient-en/micro-sensors-a/cairsens-co/>

3. *Senzor PM_x - Plantower PMS5003*

Měřené frakce: PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁

Velikostní rozsah měřených částic: 0,3 – 10 μm

Účinnost detekce: 50 % pro 0,3 μm; 98 % pro 0,5 μm

Měřicí rozsah (hmotnostní koncentrace): 0 – 500 μg/m³

Detekční limit: 1 μg/m³

Rozlišení: 1 μg/m³

Ideální provozní rozsah teploty vzduchu dle specifikace výrobce: -10°C až +60°C

Provozní rozsah relativní vlhkosti vzduchu: 0 % až 99 %

Typ senzoru: Optický – rozptýl laserových paprsků (6 velikostních kanálů)

Nasávání pomocí interního řízeného mikroventilátoru

Řídící deska: interní mikroprocesor umožňující základní zpracování dat

Napájení a odběr: 5 V DC / 100 mA

Rozměry: 50 x 38 x 21 mm

Více informací na webových stránkách výrobce:

<http://www.plantower.com/en/content/?108.html>

<https://rpishop.cz/doplňky/2027-senzor-kvality-ovzdusi-pms5003.html>

4. *Box pro umístění senzorů Bopla Bocube*

Rozměry: 231 x 125 x 90 mm (V x Š x H)

Třída krytí: IP 66

Barva: světle šedá

Materiál: Polykarbonát UL 94 V0

Více informací na webových stránkách výrobce:

<https://www.bopla.de/en/enclosure-technology/product/bocube/polycarbonate/b-221309-pc-v0-7035.html>

5. *Průmyslový minipočítač Raspberry Pi 4 Model B - 2GB RAM*

+ *paměťová média Kingston MicroSDHC 16GB Class 10 UHS-I Industrial Temp + SanDisk Ultra Fit USB 3.1 32GB*

Model procesoru: Broadcom BCM2711

Počet jader: 4

Frekvence: 1500 MHz

Velikost operační paměti: 2000 MB

Adresní prostor: 64 bit

Architektura: ARM v8

Jádro: Cortex-A72

Paměť: LPDDR4

Konektivita: 2,4 GHz a 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac Wi-Fi; Bluetooth 5.0 (BLE); Gigabit Ethernet (1000 Mbit/s); 2 x USB 2.0 konektor; 2 x USB 3.0 konektor

Více informací na webových stránkách výrobce:

<https://rpishop.cz/raspberry-pi-4b/1599-RPI402-765756931175.html>

6. *Rozšiřující deska Multisens*

Rozšiřující karta je určena pro Raspberry Pi 4 Model B a umožňuje rozšířit / přepínat následující komunikační rozhraní:

- 8x externí UART (přepínání z 2 fyzických UART interface na 8, přepínání přes GPIO piny)
- 4x analogový vstup (12 bitové ADC s měřeným rozsahem 0 – 5V, přes I2C sběrnici)
- 2x SPI
- 1x UART pro LTE miniPCIE modem Quectel EC25-E MINIPICIE (AT příkazy)
- 1x UART pro komunikační kartu Murata LoRa WAN (AT příkazy)
- 1x I2C sběrnice (EXT I2C) – externí I2C sběrnice pro napojení dalších I2C externích senzorů
- 1x I2C sběrnice (INT I2C) – složí pro interní komunikaci s dalšími komponentami, např. battery pack

- 1x I2C slot pro GPS (volitelně)
- 2x I2C I/O Port Expander MCP23017

Rozšiřující karta řeší přímo napájení Raspberry prostřednictvím rozšiřujícího I/O expanderu, proto již nepřipojujte USB napájení přímo do Raspberry!

Rozšiřující karta umožňuje rozšíření standartní konektorové výbavy Raspberry Pi. Díky tomuto kusu hardware bylo docíleno toho, že jednotka umožňuje připojení několika různých typů senzorů s různými typy sběrnic ve větším počtu, než je základní výbava (SPI, UART, I2C, analogové senzory). Tato rozšiřující deska zároveň může komunikovat s potenciálním systémem napájení pomocí battery packu s řídicí jednotkou a možností napájení jednotky pomocí solárních panelů.

7. *Zdroj napájení - Spínaný zdroj MEAN WELL RS-25-5*

Vstupní napětí: 230 V

Výstupní napětí: 5 V – 5 A

Včetně gumového pláště pro venkovní použití

Více informací na webových stránkách výrobce:

<http://www.farnell.com/datasheets/2547985.pdf>

8. *GSM Komunikační modem Quectel EC25-EFA*

Typ: LTE Cat 4

LTE antény: 2x W032 RSMA

SIM: datová / veřejná síť internet / statická IP

Více informací na webových stránkách výrobce:

<https://www.soselectronic.cz/products/quectel/ec25efa-minipcie-217992>

9. *Software envitechMULTISENSE (výrobce ENVitech Bohemia s.r.o.)*

Základní softwarovou platformou jednotky je operační systém linux pro procesory založené na architektuře ARM. Z důvodu zvýšení spolehlivosti a stability systému je v co nejmenší míře využíváno paměťových karet microSD, které v jednotce slouží pouze jako bootloader a veškerý další software včetně operačního systému je umístěn na USB 3.1 paměti.

Software umožňující samotné měření a zpracování dat se skládá z několika modulů:

- a) MĚŘÍCÍ MODUL

Naprogramován v programovacím jazyku PYTHON3, který se automaticky spouští při startu stanice. Tento modul zároveň obsahuje ovladače senzorů, které je možné upravovat na míru dané stanice a ve spolupráci s databází MySQL ze které si načítá nastavení a naopak zpět ukládá data. Měřicí modul zpracovává pouze surová data, která se načítají v 5s intervalech a v databázi zůstávají uložena pouze po dobu jednoho měsíce.

b) MODUL ZPRACOVÁNÍ DAT

Tento modul je naprogramován v jazyce PHP a je součástí open source www serveru apache2, díky kterému je také možné jednotku vzdáleně spravovat. Tento modul načítá v nastavených intervalech surová data pořízená měřicím modulem a vytváří průměry měřených hodnot. V základním nastavení se jedná o 10min. a 60min. průměry. Tyto jsou ukládány v databázi jednotky a je možné je zobrazovat nebo exportovat pomocí www rozhraní.

c) ZOBRAZOVACÍ MODUL

Tento modul je naprogramován v jazyce PHP. Modul umožňuje vzdálenou správu jednotky a zobrazování naměřených dat. Vzdálenou správou jednotky je myšleno nastavování měřicích koeficientů, výběr senzorů, komunikačních parametrů a kalibrace jednotky dle referenčních zdrojů.

d) KOMUNIKAČNÍ MODUL

Tento modul je naprogramován v jazyce PYTHON3 a obstarává odesílání dat na nastavený server či dostatečně výkonný a stabilní počítač. Jednotka aktuálně umožňuje komunikaci pomocí technologie LoRa, GSM, WI-FI a LAN. Skrze technologii LoRa je jednotka schopna odesílat poslední naměřený průměr jednou za 10 min. Skrze ostatní způsoby komunikace vysílá jednotka též poslední 10 min. průměr, ovšem při výpadku komunikace dokáže po jejím opětovném připojení doposlat veškerá zatím neodeslaná data což u technologie LoRa vzhledem k jejím přenosovým limitům není možné. Data se v případě GSM, LAN, WI-FI odesílají jako UDP paket na cílový server. Do budoucna bude systém doplněn o protokol MODBUS a ENVILAN. Součástí komunikačního modulu je zároveň script pro zjištění aktuální pozice skrze GPS, která se načte vždy při startu zařízení a následně se odesílá s daty.

10. Měření základních meteorologických parametrů - enviMET

Pro měření základních meteorologických parametrů je možné použít standardní meteorologické sety splňující kvalitativní požadavky WMO.

V rámci zachování jednotnosti systému sběru a zpracování dat je ideální použití jednotky enviMET (výrobce ENVitech Bohemia s.r.o.), který využívá totožný systém sběru dat jako enviSENS, v následující konfiguraci:

Rozměry: 231 x 125 x 90 mm (V x Š x H)

Použitý multisenzor: AIRMAR 110WXS

Rychlost větru: 0 až 40 m/s (přesnost 5%)

Směr větru: 0 až 360° (přesnost $\pm 3^\circ$)

Teplota vzduchu: -40 to 80°C (přesnost $\pm 0,3^\circ\text{C}$)

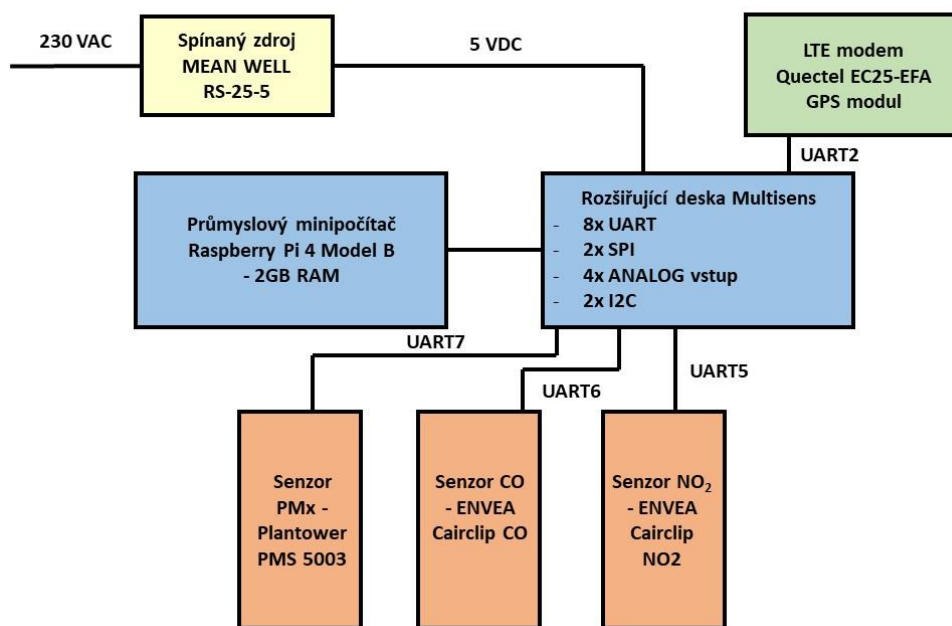
Relativní vlhkost vzduchu: 0 až 100% RH (přesnost $\pm 3\%$)

Tlak vzduchu: 300 až 1100 hPa (přesnost $\pm 0,5$ hPa)

3.2. Princip měření

Princip fungování vyvinutého zařízení je znázorněn na schématu na obr. 1.

Obr. 1. Princip fungování zařízení



Jednotka enviSENS obsahuje plynové senzory pro monitoring NO₂ a CO a prachový senzor pro monitoring frakcí PM₁₀, PM_{2.5} a PM₁.

3.2.1. Plynové senzory

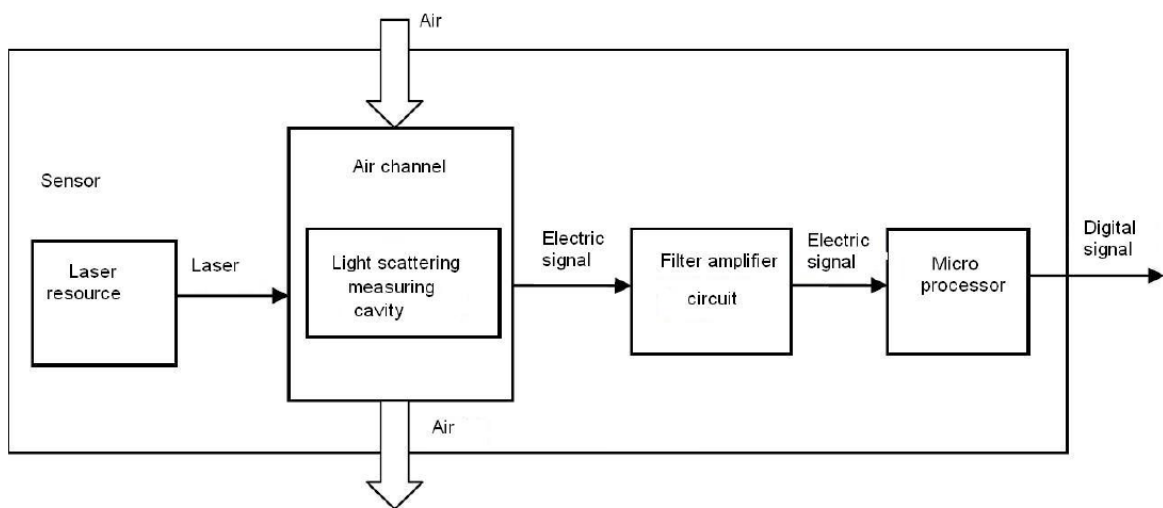
Oba použité senzory od společnosti ENVEA Cairpol používají pro monitoring elektrochemický princip měření: Senzory Cairpol používají amperometrickou technologii skládající se ze tří elektrod: pracovní elektroda (anoda), protielektroda (katoda) a referenční

elektroda. Plyn, který má být analyzován, se pomocí difuze dostává přes permeační membránu k citlivé elektrodě. Plyny fungují tak, že oxidační reakce probíhá na anodě a redukční reakce na katodě. Elektrický signál vygenerovaný mezi oběma elektrodami je úměrný koncentraci. Výrazně vyšší přesnosti měření je dosaženo omezením účinku interference teploty a vlhkosti vzduchu pomocí specifického a patentovaného vstupního filtru v kombinaci s dynamickým vzorkováním a eliminační rovnicí. U senzorů od společnosti ENVEA Cairpol je omezení účinku interference teploty a vlhkosti vzduchu prováděna interně a není tak potřeba aplikovat dodatečný přepoččet v řídicím systému jednotky enviSENS. Sensory od společnosti ENVEA Cairpol disponují interním čidlem na měření teploty a vlhkosti vzduchu, které poskytuje relevantní data, nezbytná pro umožnění aplikace požadovaných přepočtů.

3.2.2. Prachové senzory

Prachový senzor Plantower používá pro monitoring optický princip měření. Plantower používá princip rozptylu laseru, tj. rozptyl vyzařovaných laserových paprsků pomocí suspendovaných částic v ovzduší. Rozptýlené světlo je pak detekováno pod určitým úhlem, z čehož je nakonec získána křivka změn rozptýleného světla v čase. Nakonec je pomocí mikroprocesoru vypočítán ekvivalentní průměr částic a počet částic s různým průměrem na jednotku objemu dle teorie MIE. Na obrázku 2 níže je zobrazeno funkční schéma snímače.

Obr. 2 Funkční schéma snímače



3.3. Postup měření

3.3.1. Zásady výběru měřicí lokality

Základní umístění automatizovaných imisních monitorovacích stanic je obecně definováno ve Vyhlášce Ministerstva životního prostředí č. 330/2012 Sb., 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 (za tímto účelem bylo popisované zařízení vyvinuto), 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. Pro jeho naplnění je potřebné v některých případech požadavky na umístění měřící techniky stanovené uvedenou Vyhláškou upravit dle lokálních podmínek a potřeb. Lokalizace konkrétního měřícího místa pro potřeby měření senzorickou jednotkou enviSENS 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 měřícího 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 měřícího 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.

3.3.2. Měření senzorickou jednotkou enviSENS

Provoz senzorické jednotky enviSENS je uživatelsky nenáročný, s výjimkou každodenní práce s naměřenými daty. Veškeré konfigurační úkony jsou připravené na míru z výroby a jednotku tak stačí připevnit např. na sloup, zábradlí, či zeď v místě měření a připojit ji k elektřině. Jednotka začne automaticky data zasílat do databáze MySQL v předem stanovených spočtených průměrech. Databáze bude nainstalována na vybraném serveru či výkonném počítači provozovatele systému.

Vzhledem ke zjištěným skutečnostem, že některé senzory sice poskytují poměrně kvalitní data, co se týká trendu a korelace s referenčními jednotkami, ale celá křivka je posunuta výše či níže oproti referenčním hodnotám (tzn. buď přeměřují nebo podměřují), vychází již z výroby jednotka „nakalibrovaná“, a to vložením korekčních koeficientů do řídicího softwaru envitechMULTISENSE, vypočtených na základě dvoudenního souměření s referenční (plynové senzory) či ekvivalentní (prachový senzor) jednotkou, které jsou pravidelně kalibrovány v akreditované kalibrační laboratoři, podle požadavků na autorizovaná měření kvality ovzduší specifikovaných Ministerstvem životního prostředí. Souměření nezbytné pro ověření senzorické jednotky enviSENS může provádět pouze osoba autorizovaná k měření imisí od MŽP (seznam autorizovaných subjektů viz. <https://www.mzp.cz/cz/autorizace>). Jedná

se o velmi důležitý úkon, protože v některých případech může docházet i k výraznému přeměřování a tím ke zkreslení výsledků. Vzhledem k potenciální interferenci teploty a vlhkosti vzduchu je potřeba provádět „kalibraci“ ve venkovních podmínkách. Bez provedení souměření s referenční či ekvivalentní jednotkou není vhodné nasadit žádnou senzorickou jednotku od kteréhokoliv výrobce.

Během provozu je třeba pravidelně kontrolovat a verifikovat naměřená data (označení a případné odstranění podezřelých či zjevně nesprávných hodnot, porovnání senzorů nasazených v síti navzájem mezi sebou, apod.). Minimálně 2x ročně (ideálně ovšem průběžně - kontinuálně) je potřeba provádět průběžné mezikalibrační ověření jednotky enviSENS. Ta probíhá stejným způsobem jako ověření před prvotním nasazením jednotky, tj. vložením korekčních koeficientů do řídicího softwaru envitechMULTISENSE, vypočtených na základě souměření s referenčními a ekvivalentními jednotkami. Ideální variantou je paralelní umístění alespoň jedné referenční automatizované imisní monitorovací stanice do navržené senzorové sítě na dané lokalitě, případně využití již existující stanice v lokalitě, tak aby mohlo být prováděno kontinuálně nastavení korekčních koeficientů pro mezikalibrační ověření senzorických jednotek enviSENS i v průběhu měřicí kampaně. Pokud není takový způsob možný např. z finančních důvodů, je třeba dopravit k senzorické jednotce referenční či ekvivalentní měřicí techniku (např. formou imisního měřicího vozu, aby mohlo být provedeno souměření, případně naopak senzorické jednotky dopravit k imisní monitorovací stanici a provést souměření zde (lepší je provádět souměření přímo v lokalitě měření vzhledem ke specifickým podmínkám znečištění ovzduší v každé lokalitě). Pro nastavení koeficientu je nutné provést minimálně 2-denní souměření. Tento postup je třeba aplikovat minimálně před každým novým nasazením jednotek enviSENS a při kontinuálním provozu alespoň 2x ročně. Tato průběžná kalibrace je důležitá především kvůli postupnému oslabování laserových zdrojů u prachových senzorů a průběžně se snižující citlivosti u elektrochemických senzorů, což může postupně či skokově ovlivňovat kvalitu měření. Uvedená fakta mohou mít za následek, že se jednotlivé korekční koeficienty mění v čase.

Minimálně 1x ročně (ideálně 2x ročně) je třeba provést zevrubnou profylaktickou kontrolu a servis senzorické jednotky enviSENS, kterou provádí výrobce systému nebo osoba řádně vyškolená výrobcem systému. Profylaktická kontrola a servis senzorické jednotky zahrnují především kontrolu funkčnosti všech součástí systému, výměnu senzorů po životnosti (přibližně 1 rok), kontrolu průchodnosti datových cest, výměnu prachových filtrů a důkladné vyčištění všech součástí jednotky, především pak měřících senzorů (např. pavučina může výrazně ovlivnit výsledky měření).

Životnost jednotlivých součástí jednotky vychází z doporučení výrobců jednotlivých senzorů. Plynové senzory ENVEA Cairpol mají životnost 12 měsíců kontinuálního měření, přičemž jednotka přestane po uplynutí této doby poskytovat naměřená data. Životnost prachových senzorů Plantower je výrobcem udávána 2 – 3 roky, ovšem ani po delší době nepřestane měřit. Řádně vyškolený pracovník výrobce je pak kvalifikovaný k tomu, aby

rozhodl o tom, zda daný senzor stále měří správně, nebo zda je třeba provést jeho výměnu. U ostatních komponentů není jejich životnost dopředu omezena.

Při práci s naměřenými daty je vhodné postupovat obezřetně a nastavovat různé kontrolní mechanismy nad rámec standardního vyhodnocení (např. prohození senzorických jednotek při podezřele vysokých či nízkých hodnotách u některé z nich apod.). Je třeba důsledně provádět verifikaci naměřených dat, jelikož neobvyklé či zjevně nesprávné hodnoty se u těchto jednotek objevují mnohem častěji nežli u referenčních či k nim ekvivalentních zařízení. Naměřená data není vhodné porovnávat s imisními limity (jsou pouze pro orientační informaci). Senzorické jednotky jsou vhodné především pro indikativní měření, identifikaci „hotspotů“ znečištění ovzduší, detekci úniků znečišťujících látek v rámci průmyslové výroby, zvýšené dopravní zátěži během dopravních špiček apod. Čím je síť senzorických jednotek hustší, tím jsou poskytnuté informace přesnější a detailnější a uživatel s nimi může lépe nakládat (s vyšší hustotou sítě se zvyšuje pravděpodobnost pro odhalení vadných jednotek, či nežádoucích extrémních odchylek v koncentracích měřených dílčími jednotkami, ale také se zvyšuje pravděpodobnost a rychlost nalezení lokálního zdroje znečištění). Použití senzorického měření v sítích o např. 2 až 3 senzorických jednotkách není vhodné a v rámci této metodiky není takovéto využití v žádném případě podporováno.

3.4. Vyhodnocení naměřených dat

Data stažená ze senzorů jsou ve formátu CSV. Pro další zpracování je třeba převést tato data na formát vhodný k dalšímu zpracování tabulkovým procesorem, jako je např. MS Excel. Pro tento software se data převedou do formátu XLSX nebo u starších verzí Excelu do formátu XLS.

Obr. 3 Část datového souboru staženého ze senzorů pro měření koncentrací PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ a CO

	A	B	C	D	E	F	G
1	date	pm01	pm25	pm10	no2	co	Kontrola
8499	30.10.2020 0:20	15.1081	21.4054	22.5676	11.5135	0.287222	=A8500-A8499
8500	30.10.2020 0:30	18.973	26.8108	28.1622	12.8	0.376167	=A8501-A8500
8501	30.10.2020 0:40	21.0833	30	31.5833	13.4571	0.40697	=A8502-A8501
8502	30.10.2020 0:50	16.1351	23.2973	24.8919	10.0588	0.335314	=A8503-A8502
8503	30.10.2020 1:00	15.8378	22.5676	24.1081	13.3514	0.343	0.006944444
8504	30.10.2020 1:10	15.8333	22.4444	24.0278	10.6176	0.354086	0.006944444
8505	30.10.2020 1:20	15.5405	22.2973	23.4054	10.4054	0.335472	0.006944444
8506	30.10.2020 1:30	15.75	22.4167	23.5833	12.6176	0.336206	0.006944444
8507	30.10.2020 1:40	16.0556	22.3611	23.5833	13.2571	0.343714	0.006944444

Následně se provede kontrola kompletnosti datových řad naměřených hodnot tím způsobem, že do volného sloupce za sloupci výsledků měření se vloží vzorce pro difference časů sousedních řádků, jak ukazuje Obr. 3 sloupec „Kontrola“.

Pomocí automatického filtru se ve sloupci „Date“ provede kontrola, jestli nejsou časové intervaly větší, než stanovené (pro Obr. 4 je to 10 minut). Pokud k takovému případu dojde, místo chybějících dat se vloží prázdné řádky, do sloupce „Date“ se doplní chybějící údaje a do sloupce „Kontrola“ se vloží vzorce pro diferenci dvou sousedních řádků, jak ukazuje Obr. 4 s chybějícími daty 30. 10. 2020 21:30. Kromě toho je nutné opravit ve sloupci „Kontrola“ původní vzorec, který indikoval chybějící řádky a po vložení nových řádků má nesprávný tvar (neukazuje diferenci dvou sousedních řádků). V příkladu (Obr. 4) to je vzorec v buňce G8625, který ukazuje již správnou hodnotu 0,006944444 místo původní hodnoty 0,013888888 indikující dvacetiminutový interval měření místo desetiminutového.

Obr. 4 Část datového souboru s chybějícími daty

	A	B	C	D	E	F	G
1	date	pm01	pm25	pm10	no2	co	Kontrola
8623	30.10.2020 21:00	4.89189	6.62162	7	12.5833	0.317735	0.006944444
8624	30.10.2020 21:10	5.58333	7.52778	7.80556	10.4444	0.330323	0.006944444
8625	30.10.2020 21:20	4.18919	5.81081	6.16216	10.4688	0.289176	0.006944444
8626	30.10.2020 21:30						0.006944444
8627	30.10.2020 21:40	3.97297	5.48649	5.83784	10	0.288912	0.006944444
8628	30.10.2020 21:50	4.19444	5.72222	5.97222	9.85294	0.309067	0.006944444

Pro udržení reprezentativnosti naměřených dat by měly být ze souboru dat odstraněny extrémní hodnoty pro dodržování metodických postupů pro eliminaci výskytu náhodných chyb měření, což je v souladu se závěry uvedenými v Bauerová a Keder (2019) a Bauerová a kol. (2020). Jedná se o odstranění očividně nesmyslných dat:

- výrazné záporné píky (hodnoty, které zůstávají záporné i po přepočtu s využitím přepočtených koeficientů),
- nulové hodnoty opakující se více než 3x po sobě (pravděpodobný výpadek dat)
- „náběhy“ a „propady“ dat po anebo před výpadkem měřidla. Jedná se o odstranění dat při jejich strmém vzrůstu nebo poklesu souvisejícím s průběhem před dosažením stabilního chodu, případně při nestabilitě před výpadkem. Tento zásah je zatížen určitým vlivem subjektivity a pokud je to možné, je třeba využít porovnání těchto dat s ostatními daty v síti.

Pokud se jedná o výrazné kladné píky, je problematické stanovit, kdy se jedná o poruchu a kdy o příspěvek emise z blízkého emisního zdroje (např. studený start v bezprostřední blízkosti měřidla za nepříznivých povětrnostních podmínek). Takovéto hodnoty se odstraňovat nedoporučuje, uživatel ale musí s možností zkreslení dat počítat. K posouzení vlivu těchto hodnot na celkové průměry je možné využít výpočet celkového mediánu a jeho porovnání s průměrem. Pokud se medián výrazně liší od průměru je zapotřebí zkontrolovat maximální a minimální hodnoty v datasetu a posoudit jejich okolnosti vzniku, zda se nejedná o náhodnou chybu.

Poslední věcí, kterou je nutno mít na paměti, je časové pásmo, ve kterém jsou stažena data uvedena. Jedná se o čas UTC (Coordinated Universal Time) a při interpretaci dat je třeba v případě potřeby provést příslušný převod na CET, tj. UTC+1:00 (v zimním období) a jako UTC+2:00 v období letního času.

3.5. Interpretace výsledků

V prvé řadě je nesmírně důležité uvědomit si, že na naměřená data nelze v žádném případě pohlížet jako na přesně změřené koncentrace polutantů (nejedná se o certifikovaná referenční čidla) (Bauerová, Keder, 2019). Data nelze využívat pro vyhodnocování plnění požadavků vyplývajících z environmentální legislativy ani jako podkladů pro rozhodnutí, která by zasahovala do života občanů a případně omezovala jejich práva, jakož i v případech, kdy by taková rozhodnutí měla za následek výrazné ekonomické náklady nebo ztráty. Data jsou obecně spíše využitelná pouze pro detekci trendů (tj. změn) v ovzduší, případně hrubě odhadnutých škál koncentrací podle dobře uvažovaného indexu kvality ovzduší (např. špatné, střední, dobré, aj.; takovýto index ovšem pro senzory zatím nebyl stanoven) (Bauerová, Keder, 2019). Ze srovnávacích a testovacích měření, která se realizovala v ČR i v zahraničí (ČHMÚ, US EPA, JRC EC, NILU, WHO, WMO) vyplývá, že nízkonákladové senzory:

- mají ve srovnání s používanými metodami vyšší detekční prahy a nižší citlivost měření (mimo jiné důsledek miniaturizace technologie),
- projevuje se u nich výrazná interference s jinými znečišťujícími látkami
- jsou značně citlivé na meteorologické podmínky, zejména na teplotu a vlhkost vzduchu
- u některých výrobců se vyskytují významné rozdíly v měření mezi různými kusy stejného typu čidla
- cenová výhodnost může být pouze zdánlivá; průměrná reálná doba životnosti většiny senzorů aplikovaných pro venkovní měření je jeden rok (některými výrobci uváděné maximum životnosti je až 3 roky)
- nejsou zpracována pravidla metrologické návaznosti mikrosenzorů na referenční metody a postupy jejich kontroly před nasazením do měřicích sítí a průběžných kontrol kvality dat. (Bauerová, Keder, 2019).

Takto formulovaná doporučení jsou ve shodě s informacemi ze studií realizovaných v zahraničí a publikovaných v prestižních impaktovaných časopisech, např. Castell et al. (2017).

Z dlouhodobých testovacích měření realizovaných CDV a Envitech Bohemia s.r.o. v rámci projektu TH03030278 „Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními“, která probíhala na dvou lokalitách po celkovou dobu 16 měsíců během 3 let, však vyplývá a je patrné i z příkladu v kap. 3.5.1, že je možné sestavit zařízení, které poskytuje relevantní data v porovnání s referenčními jednotkami. Nicméně i tak jsou doporučení této metodiky v případě využívání senzorové jednotky enviSENS ve shodě s výše uvedeným. Sensorická jednotka enviSENS si neklade za cíl nahradit referenční měřicí jednotky pro dlouhodobý monitoring kvality ovzduší, ale co nejpresněji poskytovat data o kvalitě ovzduší např. při srovnávání stavů před a po zavedení určitého dopravního opatření realizovaného za účelem zlepšení kvality ovzduší. Pro dodržení kontroly

kvality měření uvedené v této metodice je nezbytná alespoň občasná paralelní přítomnost referenční monitorovací stanice v lokalitách měření.

3.5.1. Příklad porovnání výsledků měření referenčními metodami a senzory umístěnými ve funkčním vzorku

Jako příklad aplikace metodiky je uvedeno porovnání výsledků měření funkčních vzorků EN2018-002 a EN2018-004 s výsledky měření referenčními metodami (NO₂ a CO) a ekvivalentními metodami (PM₁, PM_{2,5} a PM₁₀) na lokalitě Brno-Úvoz. Základní charakteristiky lokality uvádí Tab. 2 a metody používané k měření koncentrací příslušných škodlivin Tab. 3. Umístění jednotek enviSENS a porovnávacích měřidel na lokalitě znázorňuje Obr. 5. Závěrečné souměření bylo realizováno v období 30. 9. 2020 až 6. 11. 2020.

Tab. 2. Základní charakteristiky stanice AIM Brno-Úvoz (hot spot).

Kód lokality:	BBNV
Název:	Brno-Úvoz (hot spot)
Vlastník:	Český hydrometeorologický ústav
EOI - typ stanice:	Dopravní
EOI - typ zóny:	Městská
EOI - charakteristika zóny:	Obytná
Zeměpisné souřadnice:	49° 11' 53.123" sš 16° 35' 37.115" vd
Nadmožská výška:	235 m

Tab. 3. Požívané přístroje a metody měření na lokalitě Brno-Úvoz (hot spot).

Měřená veličina:	NO	NO ₂	NO _x	CO	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₁₀
Jednotka:	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
Přístroj:	TAPI T200	TAPI T200	TAPI T200	TAPI T300	FIDAS 200	FIDAS 200	FIDAS 200
Metoda analýzy:	CHLM	CHLM	CHLM	IRABS	OPEL	OPEL	OPEL
Interval měření:	1 h	1 h	1 h	1 h	1 h	1 h	1 h

Legenda: CHLM chemiluminiscence, OPEL optoelektronická metoda, IRABS IR-korelační absorpční spektrometrie

Obr. 5 Stanice imisního monitoringu Brno-Úvoz (hot spot) vlevo, detail senzorké jednotky enviSENS

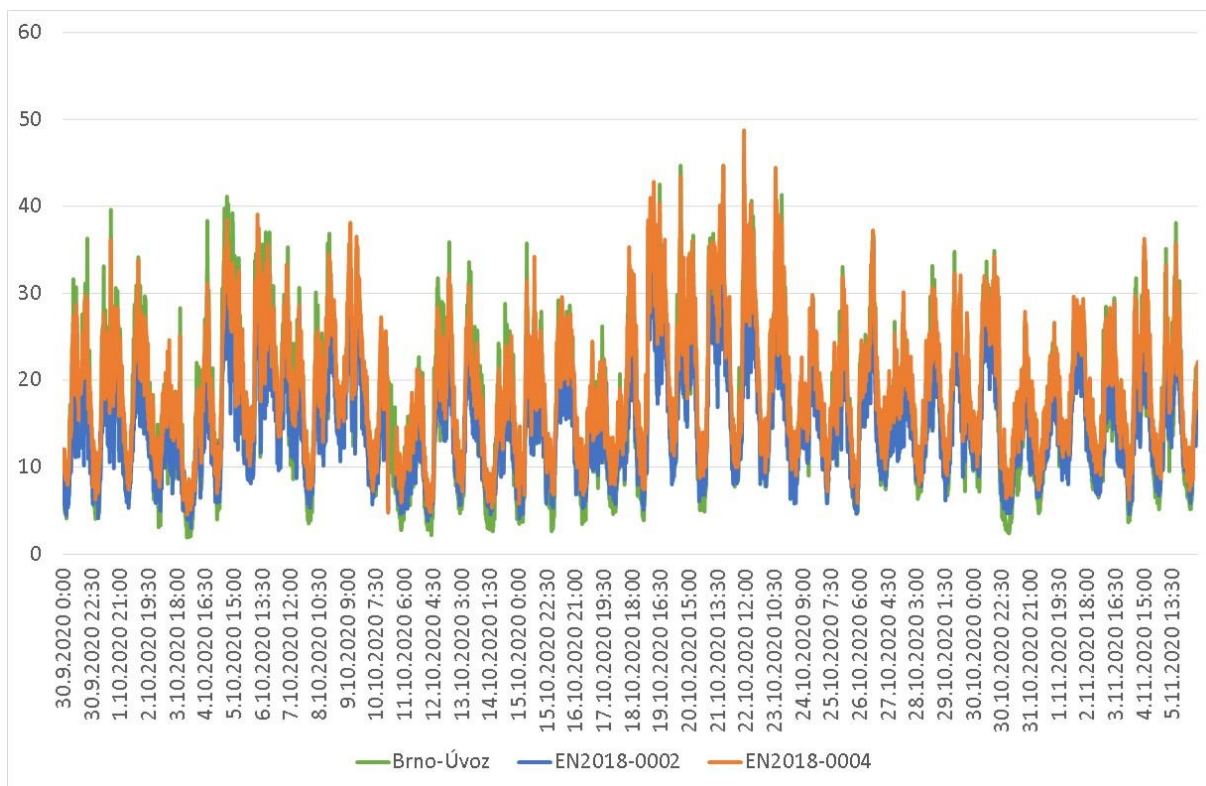


Oxid dusičitý

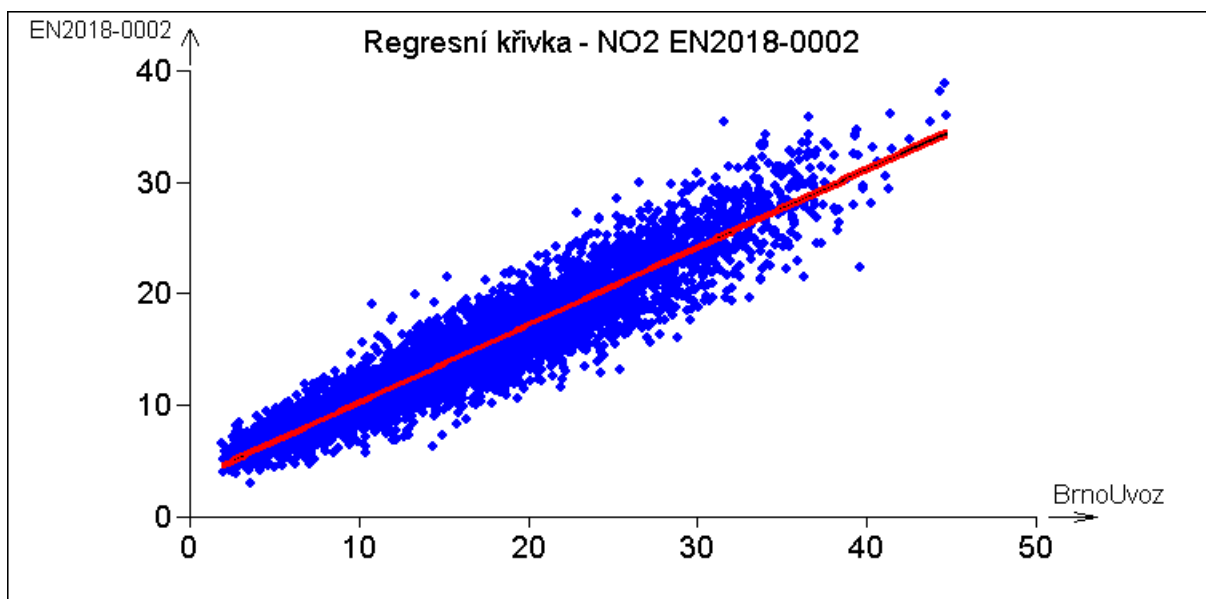
Grafické znázornění časového průběhu koncentrací NO_2 ukazuje Obr. 6.

Porovnání věrohodnosti výsledků měření bylo provedeno lineární regresí. Její grafické vyjádření ukazuje Obr. 7 a Obr. 8.

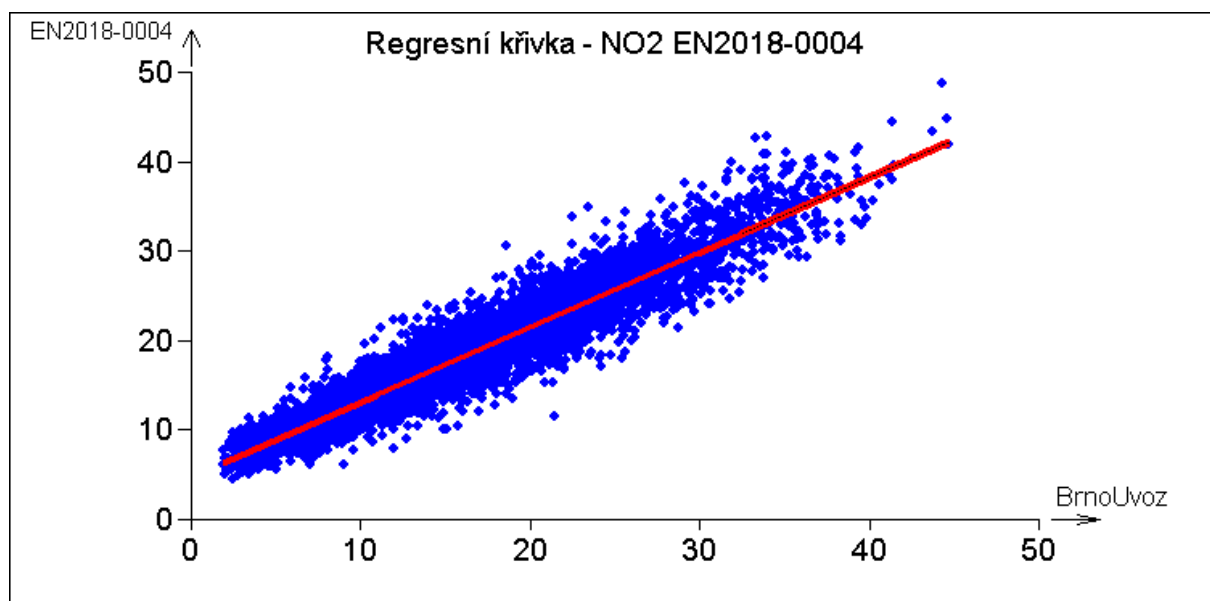
Obr. 6 Průběh koncentrací NO_2 měřený referenčním měřidlem (Brno-Úvoz) a funkčními senzorovými vzorky EN2018-0002 a EN2018-0004.



Obr. 7 Lineární regrese mezi koncentracemi NO_2 měřenými funkčním vzorkem EN2018-0002 a referenčním měřidlem (chemiluminiscence).



Obr. 8 Lineární regrese mezi koncentracemi NO₂ měřenými funkčním vzorkem EN2018-0004 a referenčním měřidlem (chemiluminiscence).



Výsledky regrese ukazuje Tab. 4. K přepočtu výsledků naměřených senzory na výsledky odpovídající referenčnímu měřidlu se pak použijí výsledky s použitím inverzního modelu lineární regrese (Tab. 5).

Tab. 4 Statistické hodnocení regresní závislosti výsledků měření koncentrací NO₂ senzory na výsledcích měření koncentrací NO₂ referenčním měřidlem.

Data	Model regrese	p1	p2	Koeficient determinace R ²
Všechna	[EN2018-0002] ~ p1*[BrnoUvoz]+p2	0.6969	3.310	0.8863
Všechna	[EN2018-0004] ~ p1*[BrnoUvoz]+p2	0.8391	4.703	0.8996

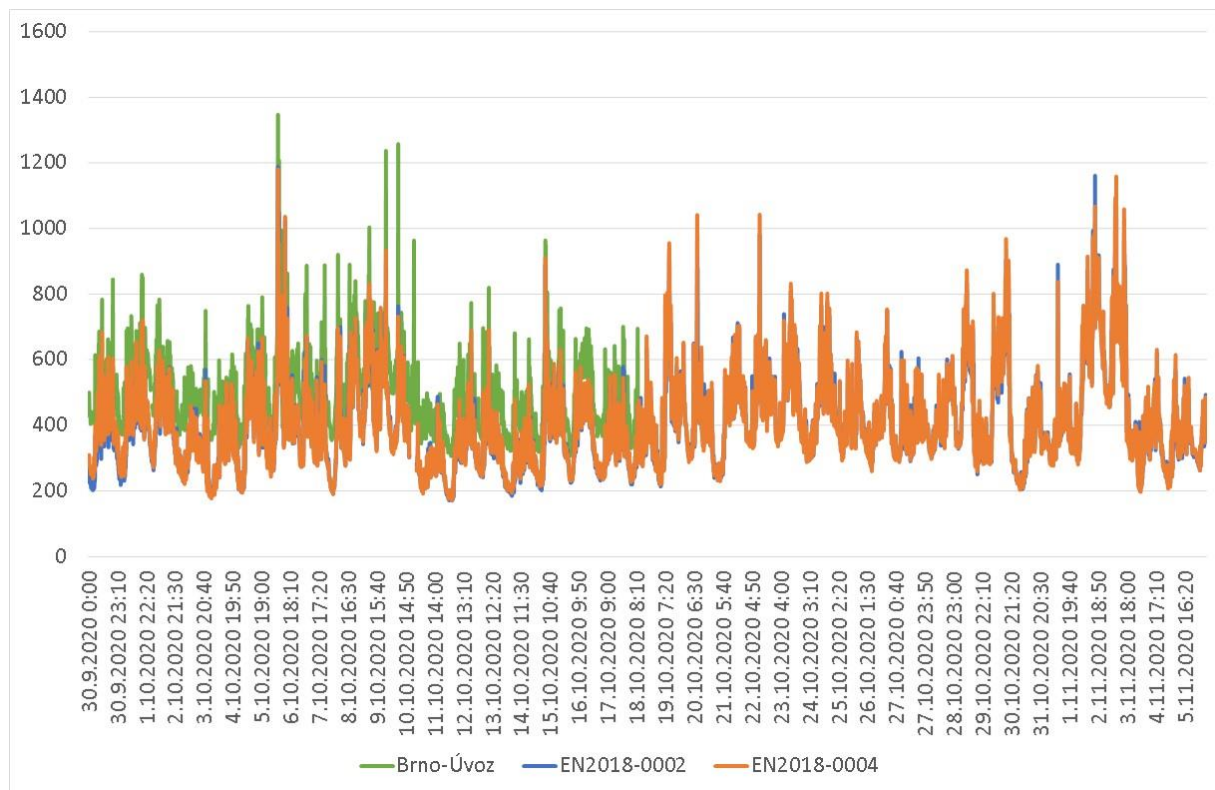
Tab. 5 Parametry pro přepočet hodnot koncentrací NO₂ naměřených senzory na hodnoty odpovídající referenčnímu měření.

Data	Inverzní model regrese	P1	P2
Všechna	[BrnoUvoz] ~ P1*[EN2018-0002]+P2	1.2718	-2.284
Všechna	[BrnoUvoz] ~ P1*[EN2018-0004]+P2	1.0720	-3.340

Oxid uhelnatý

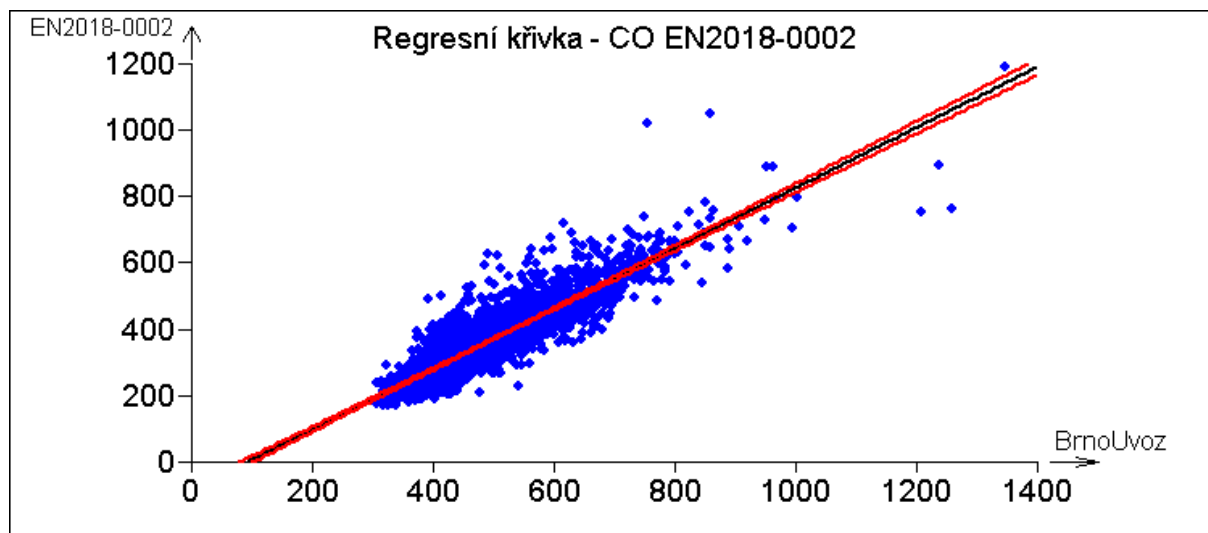
Grafické znázornění časového průběhu koncentrací CO ukazuje Obr. 9.

Obr. 9 Průběh koncentrací CO měřený referenčním měřidlem (Brno-Úvoz) a funkčními senzorovými vzorky EN2018-0002 a EN2018-0004.



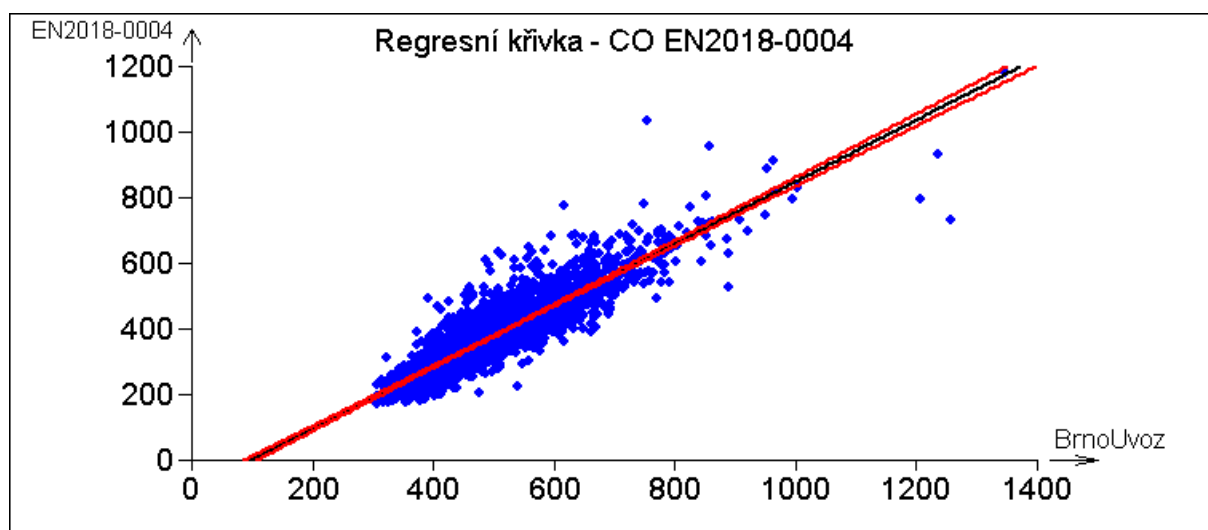
Poznámka: V období po 18.10.2020 9:00:00 nejsou do grafu zahrnuty výsledky získané referenčním měřidlem z důvodu jeho poruchy

Obr. 10 Lineární regrese mezi koncentracemi CO měřenými funkčním vzorkem EN2018-0002 a referenčním měřidlem 30.9.2020 0:00 - 18.10.2020 9:00:00 (IR-korelační absorpční spektrometrie).



Porovnání věrohodnosti výsledků měření bylo provedeno lineární regresí. Její grafické vyjádření pro zařízení EN2018-0002 ukazuje Obr. 10. Pro zařízení EN2018-0004 bylo grafické vyjádření regrese obdobné. To ukazuje Obr. 11.

Obr. 11 Lineární regrese mezi koncentracemi CO měřenými funkčním vzorkem EN2018-0004 a referenčním měřidlem (30.9.2020 0:00 - 18.10.2020 9:00:00).



Výsledky regrese ukazuje Tab. 6. K přepočtu výsledků naměřených senzory na výsledky odpovídající referenčnímu měřidlu se pak použijí výsledky s použitím inverzního modelu lineární regrese (Tab. 7).

Tab. 6 Statistické hodnocení regresní závislosti výsledků měření koncentrací CO senzory na výsledcích měření koncentrací CO referenčním měřidlem.

Data	Model regrese	p1	p2	Koeficient determinace R ²
30.9.2020 0:00 - 18.10.2020 9:00:00	[EN2018-0002] ~ p1*[BrnoUvoz]+p2	0.9095	-82.4	0.7892
30.9.2020 0:00 - 18.10.2020 9:00:00	[EN2018-0004] ~ p1*[BrnoUvoz]+p2	0.9407	-91.1	0.8044

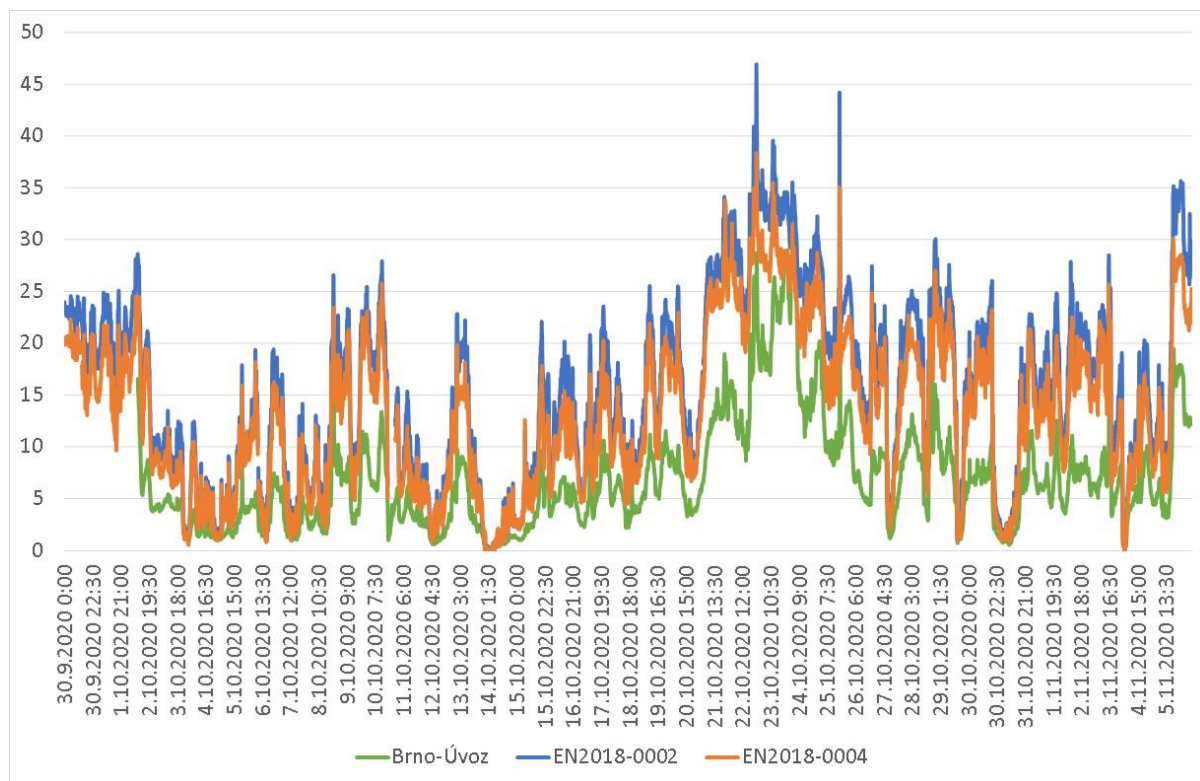
Tab. 7 Parametry pro přepočet hodnot koncentrací CO naměřených senzory na hodnoty odpovídající referenčnímu měření.

Data	Inverzní model regrese	P1	P2
30.9.2020 0:00 - 18.10.2020 9:00:00	[BrnoUvoz] ~ P1*[EN2018-0002]+P2	0.8677	175.3
30.9.2020 0:00 - 18.10.2020 9:00:00	[BrnoUvoz] ~ P1*[EN2018-0004]+P2	0.8552	174.1

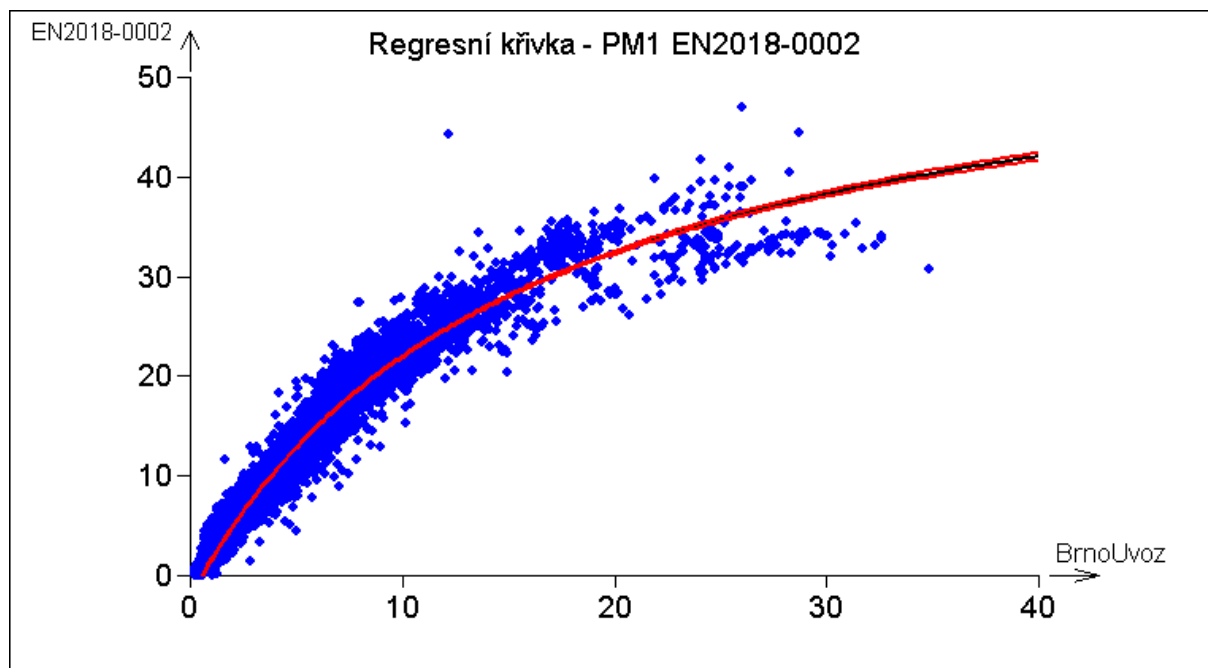
Pevné částice PM₁

Grafické znázornění časového průběhu koncentrací PM₁ ukazuje Obr. 12. Porovnání věrohodnosti výsledků měření bylo provedeno nelineární regresí. Její grafické vyjádření ukazují Obr. 13 a 14.

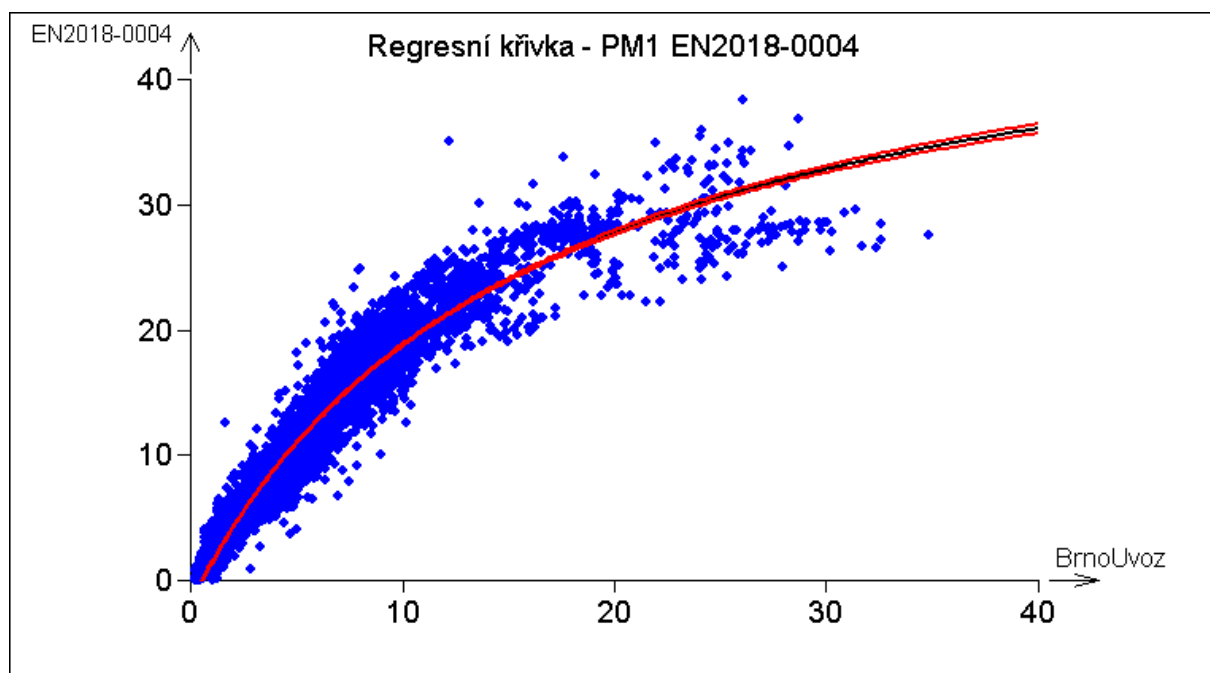
Obr. 12 Průběh koncentrací PM_{10} měřený metodou nefelometrie (ekvivalentní metoda k referenční metodě) (Brno-Úvoz) a funkčními vzorky EN2018-0002 a EN2018-0004.



Obr. 13 Nelineární regrese mezi koncentracemi PM_{10} měřenými funkčním vzorkem EN2018-0002 a měřidlem ekvivalentní referenční metodě (optoelektronická metoda).



Obr. 14 Nelineární regrese mezi koncentracemi PM₁ měřenými funkčním vzorkem EN2018-0004 a ekvivalentním měřidlem (optoelektronická metoda).



Tab. 8 Statistické hodnocení regresní závislosti výsledků měření koncentrací PM₁ senzory na výsledcích měření koncentrací PM₁ ekvivalentním měřidlem.

Data	Model regrese	p1	p2	p3	Koeficient determinace R ²
Všechna	$[EN2018-0002] \sim p1 * [BrnoUvoz] / (p2 + [BrnoUvoz]) + p3$	61.14	15.379	-2.0968	0.9508
Všechna	$[EN2018-0004] \sim p1 * [BrnoUvoz] / (p2 + [BrnoUvoz]) + p3$	52.53	15.563	-1.7287	0.9351

Výsledky regrese ukazuje Tab. 8. K přepočtu výsledků naměřených senzory na výsledky odpovídající měřidlu se pak použijí výsledky s použitím inverzního modelu nelineární regrese (Tab. 9).

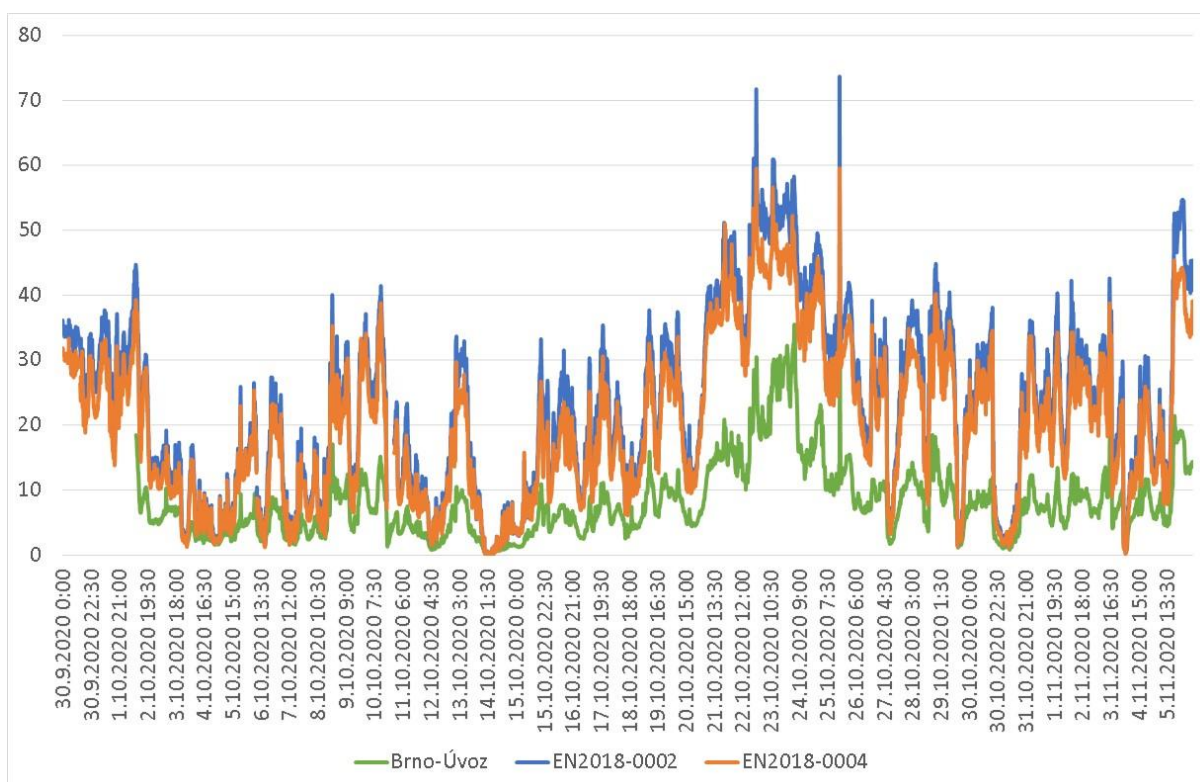
Tab. 9 Parametry pro přepočet hodnot koncentrací PM₁ naměřených senzory na hodnoty odpovídající referenčnímu měření zabezpečeným ekvivalentní metodou.

Data	Inverzní model regrese	P1	P2	P3
Všechna	$[BrnoUvoz] \sim P1 * (P2 - [EN2018-0002]) / ([EN2018-0002] - P3)$	21.807	-1.233	72.1
Všechna	$[BrnoUvoz] \sim P1 * (P2 - [EN2018-0004]) / ([EN2018-0004] - P3)$	20.521	-1.564	60.7

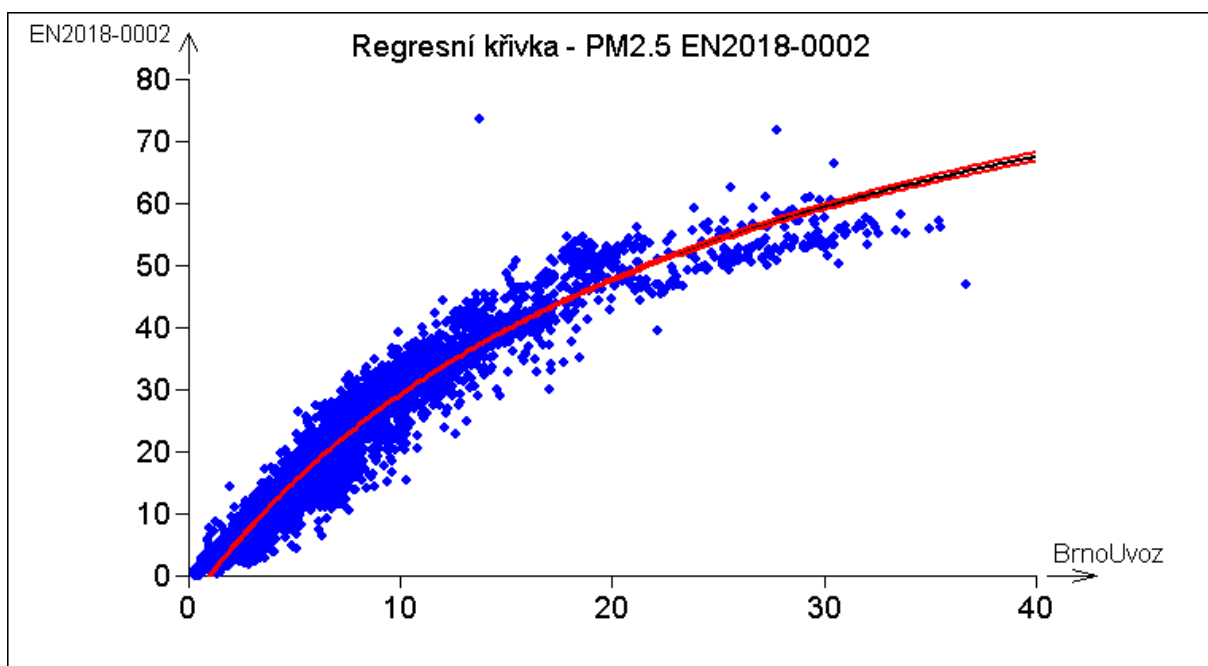
Pevné částice PM_{2.5}

Grafické znázornění časového průběhu koncentrací PM_{2.5} ukazuje Obr. 15. Porovnání věrohodnosti výsledků měření bylo provedeno nelineární regresí. Její grafické vyjádření ukazují Obr. 16 a 17.

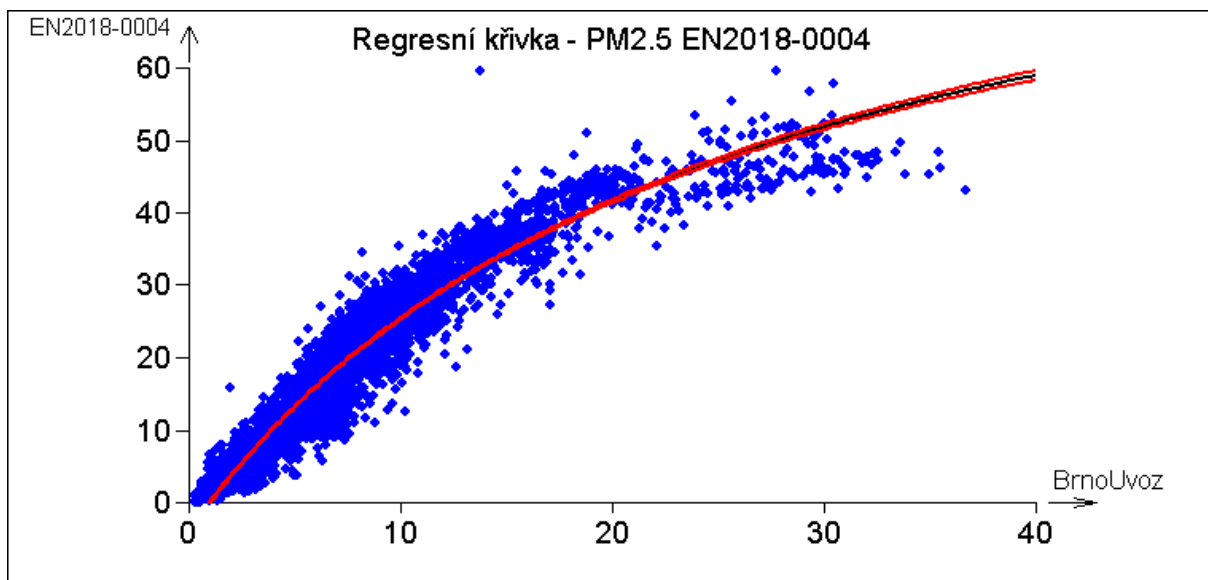
Obr. 15 Průběh koncentrací PM_{2.5} měřené ekvivaletním měřidlem (Brno-Úvoz) a funkčními vzorky EN2018-0002 a EN2018-0004.



Obr. 16 Nelineární regrese mezi koncentracemi $PM_{2.5}$ měřenými funkčním vzorkem EN2018-0002 a ekvivalentním měřidlem (optoelektronická metoda).



Obr. 17 Nelineární regrese mezi koncentracemi $PM_{2.5}$ měřenými funkčním vzorkem EN2018-0004 a ekvivalentním měřidlem (optoelektronická metoda).



Výsledky regrese ukazuje Tab. 10. K přepočtu výsledků naměřených senzory na výsledky odpovídající ekvivalentnímu měřidlu se pak použijí výsledky s použitím inverzního modelu nelineární regrese (Tab. 11).

Tab. 10 Statistické hodnocení regresní závislosti výsledků měření koncentrací PM_{2.5} senzory na výsledcích měření koncentrací PM_{2.5} optickým měřidlem.

Data	Model regrese	p1	p2	p3	Koeficient determinace R ²
Všechna	$[EN2018-0002] \sim p1 * [BrnoUvoz] / (p2 + [BrnoUvoz]) + p3$	116.00	24.454	-4.3945	0.9384
Všechna	$[EN2018-0004] \sim p1 * [BrnoUvoz] / (p2 + [BrnoUvoz]) + p3$	101.57	24.727	-3.7362	0.9321

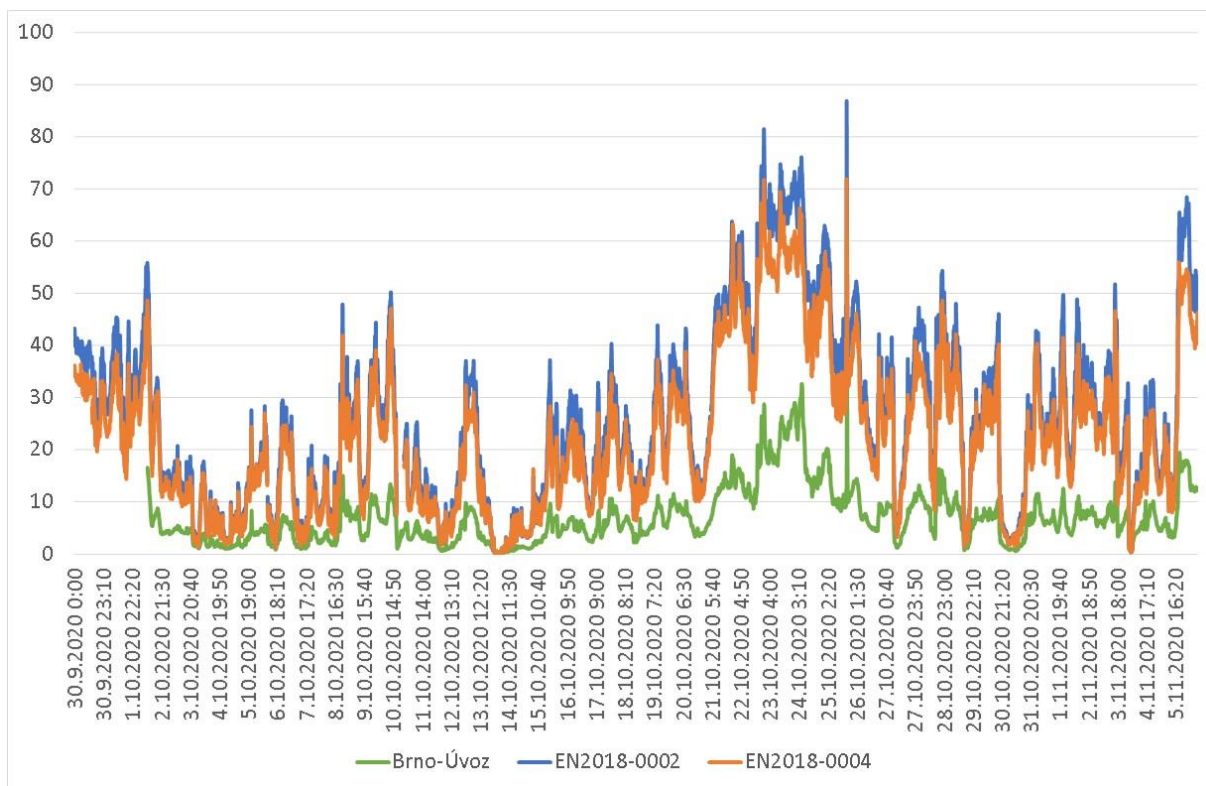
Tab. 11 Parametry pro přepočet hodnot koncentrací PM_{2.5} naměřených senzory na hodnoty odpovídající ekvivalentnímu měření.

Data	Inverzní model regrese	P1	P2	P3
Všechna	$[BrnoUvoz] \sim P1 * (P2 - [EN2018-0002]) / ([EN2018-0002] - P3)$	24.734	-5.851	117.0
Všechna	$[BrnoUvoz] \sim P1 * (P2 - [EN2018-0004]) / ([EN2018-0004] - P3)$	21.509	-6.261	95.4

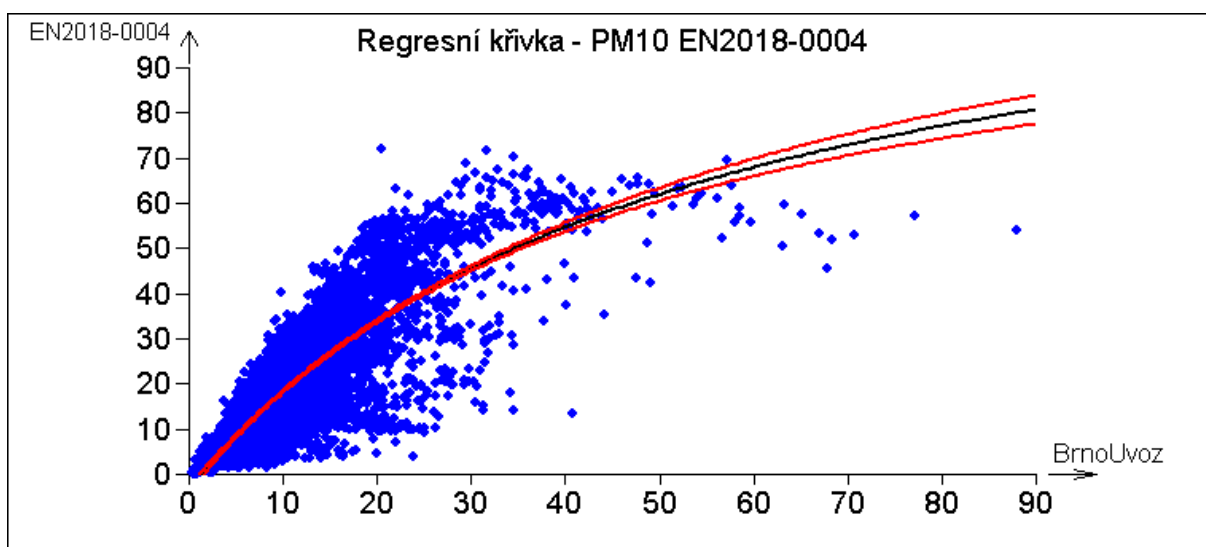
Pevné částice PM₁₀

Grafické znázornění časového průběhu koncentrací PM₁₀ ukazuje Obr. 18. Porovnání věrohodnosti výsledků měření bylo provedeno nelineární regresí. Její grafické vyjádření ukazuje Obr. 19 a 20.

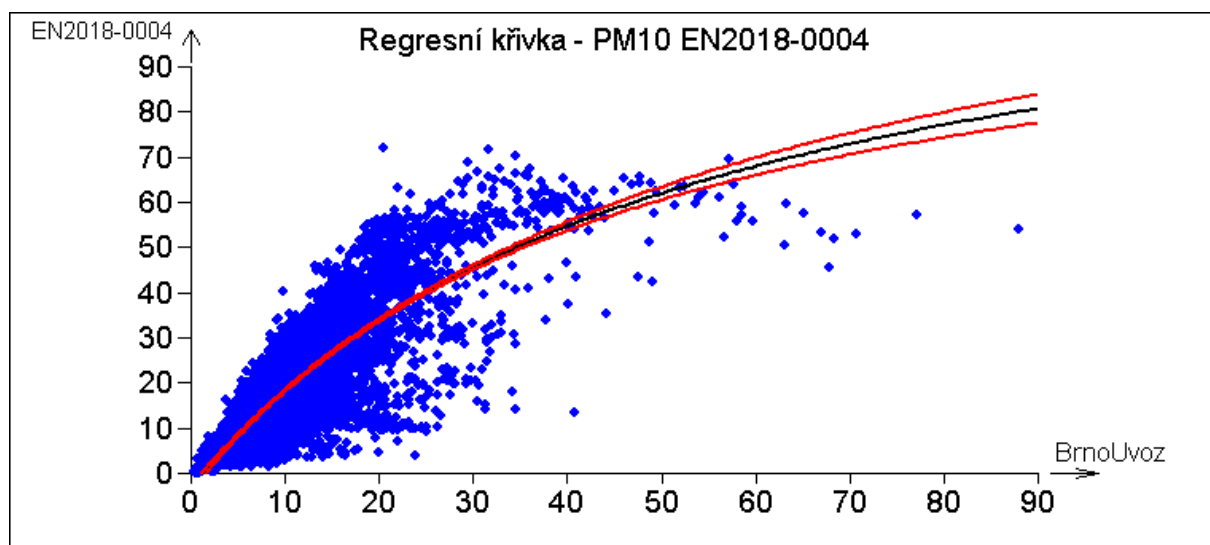
Obr. 18 Průběh koncentrací PM_{10} měřený ekvivalentním měřidlem (Brno-Úvoz) a funkčními vzorky EN2018-0002 a EN2018-0004.



Obr. 19 Nelineární regrese mezi koncentracemi PM_{10} měřenými funkčním vzorkem EN2018-0002 a ekvivalentním měřidlem (optoelektronická metoda).



Obr. 20 Nelineární regrese mezi koncentracemi PM₁₀ měřenými funkčním vzorkem EN2018-0004 a ekvivalentním měřidlem (optoelektronická metoda).



Výsledky regrese ukazuje Tab. 12. K přepočtu výsledků naměřených senzory na výsledky odpovídající ekvivalentnímu měřidlu se pak použijí výsledky s použitím inverzního modelu nelineární regrese (Tab. 13).

Tab. 12 Statistické hodnocení regresní závislosti výsledků měření koncentrací PM₁₀ senzory na výsledcích měření koncentrací PM₁₀ ekvivalentním měřidlem.

Data	Model regrese	p1	p2	p3	Koeficient determinace R ²
Všechna	$[EN2018-0002] \sim p1 * [BrnoUvoz] / (p2 + [BrnoUvoz]) + p3$	130.81	50.056	-3.3155	0.6761
Všechna	$[EN2018-0004] \sim p1 * [BrnoUvoz] / (p2 + [BrnoUvoz]) + p3$	146.68	47.309	-4.2156	0.6755

Tab. 13 Parametry pro přepočet hodnot koncentrací PM₁₀ naměřených senzory na hodnoty odpovídající měření ekvivalentním měřidlem.

Data	Inverzní model regrese	P1	P2	P3
Všechna	$[BrnoUvoz] \sim P1 * (P2 - [EN2018-0002]) / ([EN2018-0002] - P3)$	48.548	-18.793	201.0
Všechna	$[BrnoUvoz] \sim P1 * (P2 - [EN2018-0004]) / ([EN2018-0004] - P3)$	43.228	-17.363	161.9

4. Srovnání novosti postupů

Obecně je nízkonákladovým senzorům v posledních letech věnována značná pozornost, a to jak autoritami zajišťujícími měření kvality ovzduší v souladu s legislativními předpisy, např. Českým hydrometeorologickým ústavem (Bauerová a Keder, 2019, Bauerová a kol., 2020), tak v podobě vědeckých studií univerzitních týmů jako např. Wong et al. (2019) nebo Munir et al. (2019) či výzkumných center (např. Spinelle et al., 2015). Vzhledem k diferenciálnímu chování senzorů různých výrobců v reálném prostředí a k složitosti problematiky okolo kontroly kvality dat a udržitelnosti měření senzory žádná z výše uvedených autorit či institucí zatím nedefinovala jednotné metodické postupy pro nakládání s touto technologií.

V důsledku toho a v souvislosti s poptávkou o co největší množství informací o kvalitě ovzduší, často v rámci koncepcí Smart Cities, se v posledních letech objevuje celá řada levnějších přístrojů pro měření koncentrací škodlivin v ovzduší. Tyto přístroje jsou většinou složeny z 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, nicméně je nutné být obezřetný vzhledem ke kvalitě poskytovaných dat.

Do stejné skupiny přístrojů spadá i v této metodice využívaná senzorická jednotka enviSENS, která byla vyvinuta za účelem sledování trendů v kvalitě ovzduší na dopravně zatížených lokalitách či hodnocení reálných přínosů dopravních opatření ke zlepšení kvality ovzduší. Novost senzorické jednotky enviSENS spočívá zejména v jedinečném uspořádání jednotlivých senzorů tak, aby bylo zachováno optimální proudění vzduchu k jednotlivým senzorům, což vede společně s nastavením základního zpracování dat přímo v komunikační jednotce k velmi dobré přesnosti měření. Další výhodou je uživatelská přívětivost na jedné straně, kdy jednotka nevyžaduje žádná další nastavení a je připravena k okamžitému měření, ale současně je umožněno uživateli nastavovat různé procesy a stahovat data přímo z jednotky. Vyvinutý systém envitechMULTISENS umožňuje vzdálenou kontrolu zařízení, přidávání či odebrání senzorických jednotek v síti, GPS zaměření senzorických jednotek. Velkou výhodou jednotky enviSENS je její modularita spočívající ve velké variabilitě v přizpůsobení se požadavkům zákazníků (lze použít jen některé typy senzorů stejným způsobem jako kompletní jednotku). Výhodou je rovněž kontinuální měření koncentrací škodlivin, z něhož jsou generovány 10minutové průměry, což zajišťuje větší přesnost měření než princip využívaný konkurenčními zařízeními, která povětšinou změří jednu hodnotu v průběhu nastaveného časového intervalu, kterou vydávají za průměr. Tento přístup senzorické jednotky enviSENS k měření je sice energeticky náročnější oproti konkurenci, ale produkuje relevantnější informace. Je to patrné např. ze srovnání senzorických jednotek Smart Cities a Smart Environment firmy Libelium Comunicaciones Distribuidas S. L. (Španělsko), které jsou, co se týká velikosti vlastní jednotky koncipovány obdobně jako námi vyvinutá jednotka enviSENS,

s referenčními nebo ekvivalentními přístroji, ale poskytují velmi nepřesná data (viz. např. Huzlík a Ličbínský 2018 nebo Chaloupecký a kol., 2019).

5. Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodika je výsledkem nezávislého výzkumu a vývoje technologií, které mohou být spojovány s koncepcemi „chytré dopravy“ a „chytrých měst“, které se budou v blízké budoucnosti instalovat a využívat. Nicméně do situace, kdy budou tyto trendy a technologie užívány v běžné praxi, je nutné poskytovat ucelené a ověřené informace a rady, jak k těmto technologiím přistupovat a nakládat s naměřenými daty.

Metodika nalezne primárně uplatnění u subjektů realizujících měření kvality ovzduší jako komplexní návod pro práci se sensorickou jednotkou enviSENS. Primárně byla sensorická jednotka enviSENS vyvinuta za účelem sledování trendů v kvalitě ovzduší na dopravně zatížených lokalitách či hodnocení reálných přínosů dopravních opatření ke zlepšení kvality ovzduší.

V rámci sledování trendů ve kvalitě ovzduší může být jednotka součástí inteligentních dopravních systémů, kdy v případě umístění na více těchto systémů mohou poskytovaná data současně pomoci v hodnocení vlivu dopravních kongescí na kvalitu ovzduší v porovnání s plynulým provozem včetně přechodů mezi těmito stavy. Tento postup se může uplatnit především na dálnicích a silnicích I. třídy. V případě městského prostředí a umístění sensorické jednotky na vhodné místo je možné sledovat vliv kongescí i zde, zejména v ulicích, kde se často tyto stavy střídají. Současně může být sledována kvalita ovzduší v případě uzavírek ulic ve městech a obcích, kdy dojde k přesunu dopravy do jiných ulic v jiné části města, zda a jakým způsobem dojde ke změně v kvalitě ovzduší na obou místech. Tím by se jednotky mohly stát součástí systému řízení dopravy ve městech z pohledu kvality ovzduší, kdy by řídicí organizace měla reálná data o kvalitě ovzduší a v případě zhoršujícího se stavu mohla upravit dopravní toky v určitém území (zejména na základě koncentrací oxidu dusičitého). Podobné uplatnění sensorických jednotek je rovněž možné v rámci cílené parkovací politiky měst, kdy na základě kvality ovzduší může docházet k ovlivňování poptávky po parkování v centrálních oblastech měst v případě propojení se systémem obsazenosti parkování.

Další využití sensorických jednotek enviSENS spatřujeme v hodnocení reálných přínosů dopravně infrastrukturních opatření v rámci procesu EIA, kdy by nasazení těchto nízkonákladových jednotek velmi pomohlo realizovat měření kvality ovzduší zejména před stavbou (např. obchvatu obce) a po uvedení dopravní stavby do provozu, aby se prokázal reálný přínos stavby pro dotčenou obec. Jednalo by se tak o srovnání dvou stavů kvality ovzduší vůči sobě, tedy stanovení určitého trendu. Takováto měření nejsou v současné době realizována, resp. jsou realizována jen velmi omezeně. Nasazení sensorických jednotek by významně snížilo náklady na měření, anebo za stejné finanční prostředky by rozšířilo možnou monitorovací síť na sledovaném území.

Nicméně je nutné ještě jednou zdůraznit, že data poskytovaná sensorickou jednotkou nelze využívat pro vyhodnocování plnění požadavků vyplývajících z environmentální legislativy ani jako podkladů pro rozhodnutí, která by zasahovala do života občanů a případně

omezovala jejich práva, jakož i v případech, kdy by taková rozhodnutí měla za následek výrazné ekonomické náklady nebo ztráty.

Metodika může zároveň 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, za předpokladu využití nízkonákladových senzorů jako doplňku stávající monitorovací sítě a detekci trendů vývoje.

Metodika přispěje také k prohloubení znalostí zaměstnanců všech zmíněných institucí.

6. Ekonomické aspekty

Ekonomické aspekty této metodiky lze nalézt zejména při využití doporučených postupů při realizaci měření kvality ovzduší. Realizace měření kvality ovzduší senzorickou jednotkou enviSENS v případě, že je jejich cílem detekce trendů (tj. změn) v kvalitě ovzduší na určité lokalitě nebo identifikace předpokládaných zdrojů znečištění, přináší zcela zásadní úsporu financí. Senzorická jednotka má z krátkodobého hlediska (cca 1 rok) velmi nízké náklady na provoz a rovněž z hlediska obsluhy je nenáročná, s výjimkou každodenní práce s naměřenými daty. Na realizaci 14denního měření oxidů dusíku, oxidu uhelnatého a pevných částic, což je dle našeho názoru minimální doba k postihnutí meteorologických změn na lokalitě, přístroji pracujícími na principu referenčních metod je nutné plánovat přibližně 100 tis. Kč (cena se samozřejmě liší dle konkrétních požadavků na měření), zatímco měření senzorickou jednotkou dosahuje max. 10 tis Kč. Nemalé finanční prostředky lze rovněž ušetřit samotným nákupem senzorické jednotky enviSENS v porovnání s nákupem přístrojů pracujících na principu referenčních metod měření. Senzorická jednotka je nabízena zákazníkům v rozsahu od 30 tis do 80 tis Kč bez započtení dodatkových služeb a servisu (detailně viz tab. 14), což je podstatně méně, než jiná na trhu dostupná zařízení pracující na bázi nízkonákladových senzorů (např. zmíněný AQM 65 je nabízen za cca. 450 až 800 tis., ATMO 7 za cca. 400 tis.) a naprosto zanedbatelné vůči zařízením pracujícím na principu referenčních metod (cca. 1,5 až 2 mil Kč).

Tab. 14 Prodejní ceny jednotky enviSENS v roce 2020, včetně provozních nákladů

Název položky	Množství	Jednotková cena v Kč bez DPH	Celková cena v Kč bez DPH
Senzorická jednotka enviSENS – bez ceny senzorů	1	18.500,-	18.500,-
Senzor NO ₂ - ENVEA Cairclip NO2	1	29.700,-	29.700,-
Senzor CO - ENVEA Cairclip CO	1	29.700,-	29.700,-
Senzor PM _x - Plantower PMS5003	1	1.500,-	1.500,-
Instalace jednotky enviSENS (bez dopravních nákladů)	1 senzor	2.950,-	2.950,-
Každodenní kontrola a správa naměřených dat, včetně verifikace	1 rok	55.000,-	55.000,-
Profylaktická kontrola (bez dopravních nákladů) – cena za jednotku	2 (za rok)	1.600,-	3.200,-
Kalibrace senzorických jednotky (cena za měřící lokalitu – např. obec, bez dopravních nákladů), včetně výpočtu a nastavení korekčních faktorů	4 dny / rok	5.900,-	23.600,-
Dopravní náklady	1 km	15,-	15,-
Meteorologická jednotka enviMET	1	37.900,-	37.900,-

7. Použitá literatura

- BAUEROVÁ, P., KEDER, J. 2019. Hodnocení testovacího měření různých typů malých senzorů kvality ovzduší na observatoři Tušimice: Cairclip (Cairpol, FR), PMS7003 (Plantower, CHN). Praha : Český hydrometeorologický ústav, 45 s. Dostupné na: <https://www.chmi.cz/informace-pro-vas/tiskove-zpravy/2019>
- BAUEROVÁ, P., ŠINDELÁŘOVÁ, A., RYCHLÍK, Š., NOVÁK, Z., Keder, J. 2020. Low-Cost Air Quality Sensors: One-Year Field Comparative Measurement of Different Gas Sensors and Particle Counters with Reference Monitors at Tušimice Observatory. *Atmosphere*, 11(5), 492. <https://doi.org/10.3390/atmos11050492>
- CASTELL, N., DAUGE, F.R., SCHNEIDER, P., VOGT, M., LERNER, U., FISHBAIN, B., BRADAY, D., BARTONOVA, A. 2017. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, p. 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- EEA, 2017 *Air quality in Europe — 2017 report*. Dostupné na: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>
- HUZLÍK, J., LIČBINSKÝ, R. 2018. Výhody a nevýhody měření kvality ovzduší s využitím senzorů. *city:one*, vol. 1, s. 68 – 69.
- CHALOUPECKÝ, P., LIČBINSKÝ, R., HUZLÍK, J. 2019. Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními. In *Ovzduší 2019*, Brno, 16. - 17. 4. 2019. Brno : RECETOX, Masarykova univerzita, s. 106 -111. ISBN 978-80-210-9242-6.
- CHALOUPECKÝ, P., LIČBINSKÝ, R., HUZLÍK, J. 2019. Způsoby využití nízkonákladových senzorů pro monitoring kvality ovzduší. In *Ochrana ovzduší ve státní správě, teorie a praxe XIV*, Litomyšl, 13. - 15. 11. 2019. Chrudim: EKOMONITOR spol. s r.o., s. 79 – 84. ISBN 978-80-88238-17-1
- LIČBINSKÝ, R., HUZLÍK, J., HEGROVÁ, J. 2017. *Monitorování kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží : Certifikovaná metodika*. Brno : Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 48 s. ISBN 978-80-88074-55-7.
- LIČBINSKÝ, R. 2019. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2018, příloha k průběžné zprávě za rok 2018 projektu TH03030278 Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními*. Brno : Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 32 s.
- LIČBINSKÝ, R. 2020. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2019, příloha k průběžné zprávě za rok 2019 projektu TH03030278 Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními*. Brno : Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 32 s.
- LIČBINSKÝ, R. 2021. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2020, příloha k závěrečné zprávě za rok 2020 projektu TH03030278 Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními*. Brno : Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 30 s.
- MUNIR, S., MAYFIELD, M., COCA, D., JUBB, S.A. 2019. Structuring an Integrated Air Quality Monitoring Network in Large Urban Areas – Discussing the Purpose, Criteria

and Deployment Strategy, Atmospheric Environment: X,
<https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100027>

SPINELLE, L., GERBOLES, M., VILLANI, M.G., ALEIXANDRE, M., BONAVIDACOLA, F. 2015. Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for airquality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 215, p. 249-257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2015.03.031>

ŠTULÍK, BAREK (eds.). 2007. *Senzory Praha: Vysoká škola chemicko-technologická*, 223 s. ISBN 978-80-86238-20-3.

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. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>

WONG, P.P.Y., POH-CHIN LAI, ALLEND, R., CHENG, W., LEE, M., TSUI, A., TANGF, R., THUAN-QUOC THACH, TIANF, L., BRAUER, M., BARRATT, B. 2019. Vertical monitoring of traffic-related air pollution (TRAP) in urban street canyons of Hong Kong. *Science of the Total Environment* 670, p. 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.224>

8. Seznam publikací, které předcházely metodice

8.1.1. Články ve sborníku

- LIČBINSKÝ, Roman a Jiří HUZLÍK. Využití low-cost senzorů pro monitorování kvality ovzduší In *Ochrana ovzduší*, Štrbské Pleso, Vysoké Tatry, 22. – 24. 11. 2017, 2017, s. 195-202. ISBN 978-80-89565-28-3.
- HUZLÍK, Jiří a Roman LIČBINSKÝ. Výhody a nevýhody měření kvality ovzduší s využitím senzorů. *city:one*, 2018, vol. 1, s. 68 – 69.
- LIČBINSKÝ, Roman a Jiří HUZLÍK. Výhody a nevýhody měření kvality ovzduší s využitím senzorů. In *Doprava, zdraví a životní prostředí : sborník příspěvků*, Brno, 19. - 20. 11. 2018. Brno : Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., 2018, s. 9-14. ISBN 978-80-88074-62-5.
- CHALOUPECKÝ Pavel a Roman LIČBINSKÝ. Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními. In *Doprava, zdraví a životní prostředí : sborník příspěvků*, Brno, 19. - 20. 11. 2018. Brno : Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., 2018, s. 15. ISBN 978-80-88074-62-5.
- CHALOUPECKÝ Pavel, Roman LIČBINSKÝ, Jiří HUZLÍK Aplikace nízkonákladových senzorů pro měření kvality ovzduší v souvislosti s dopravními opatřeními. In *Ovzduší 2019*, Brno, 16. - 17. 4. 2019. Brno : RECETOX, Masarykova univerzita, 2019, s. 106 - 111. ISBN 978-80-210-9242-6.
- CHALOUPECKÝ, Pavel, Roman LIČBINSKÝ, Jiří HUZLÍK. Způsoby využití nízkonákladových senzorů pro monitoring kvality ovzduší. In *Ochrana ovzduší ve státní správě, teorie a praxe XIV*, Litomyšl, 13. - 15. 11. 2019. Chrudim: EKOMONITOR spol. s r.o., 2019, s. 79 – 84. ISBN 978-80-88238-17-1

8.1.2. Vystoupení na konferencích a seminářích

Seznam vystoupení členů řešitelského týmu na konferencích a seminářích, jejichž výstupem nebyl příspěvek ve sborníku, pouze byla přednášena prezentace.

Veletrh URBIS, 24. -29. 4. 2017, Brno.

15. setkání v čistém ovzduší, 4. – 5. 10. 2018, Plzeň – 2 orální prezentace.

16. setkání v čistém ovzduší, 3. – 4. 10. 2019 Tábor.

Chytrá řešení zvyšují kvalitu života, 17. 1. 2019, Brno – 2 orální prezentace.

Chytré město v praxi, 15. 5. 2019, Kolín.

Porada pracovníků obecních úřadů obcí s rozšířenou působností Jihomoravského kraje, kteří působí v oblasti ochrany ovzduší podle zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, krajský úřad Jihomoravského kraje, odbor životního prostředí, 27. – 28. 11. 2018, Kyjov.

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, 20. 5. 2019.

Kvalita ovzduší v Brně a vůbec, hvězdárna Brno, 25. 11. 2019.

9. Seznam použitých zkratek

CDV	Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
CO	oxid uhelnatý
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
MD	Ministerstvo dopravy ČR
MŽP	Ministerstvo životního prostředí ČR
NO	oxid dusnatý
NO_x	oxidy dusíku
NO₂	oxid dusičitý
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
PM₁	pevné částice s aerodynamickým průměrem menším než 1 µm
SW	software
TAČR	Technologická agentura České republiky
VOC	těkavé organické látky

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

