

Doporučení pro nakládání s nízkonákladovými senzory pro monitoring znečištění venkovního ovzduší

Nízkonákladové senzory kvality ovzduší spadají primárně do kategorie tzv. indikativního měření. Kvalita naměřených hodnot je často ovlivněna změnami meteorologických podmínek a/nebo z důvodu zhoršené selektivity sensorových zařízení interferencí různých znečišťujících látek. Snížená přesnost a stabilita měření v čase jsou u nízkonákladových senzorů kvality ovzduší určitou daní za jejich malé rozměry, snadné provedení a nízkou pořizovací cenu. Tato zařízení ale mohou být přínosným doplňkovým systémem k získání vyšší prostorové variability údajů o kvalitě venkovního ovzduší. Musí být ovšem dodržována všeobecná doporučení pro zavádění těchto zařízení, dále pro kontrolu a ověřování kvality jejich dat, včetně zodpovědné interpretace takto získaných údajů. Cílem tohoto textu je formou doporučení shrnout základní znalosti a zkušenosti s aplikací sensorových zařízení ve venkovním prostředí.

Projekt: SS02030031: Integrovaný systém výzkumu, hodnocení a kontroly kvality ovzduší
Výsledek: SS02030031-V81 „Zpráva o zapojení nízkonákladových metod do měřících kampaní, včetně zpracování výsledků a možností interpretace“ v rámci dílčího cíle 5.4
Autoři: Ing. Petra Bauerová, Ph.D., Ing. Adriana Šindelářová, RNDr. Josef Keder, CSc., RNDr. Bohumil Kotlík, Ph.D., Mgr. Lenka Pekařová
Datum: 23. 12. 2024

Hlavním uživatelem výstupů tohoto projektu je
Ministerstvo životního prostředí

Ministerstvo životního prostředí

Manažerské shrnutí dokumentu

V posledních letech byl zaznamenán celkem výrazný nárůst nabídky, poptávky a celkového využití cenově dostupných, rozměrově malých a přenosných senzorů pro indikativní měření úrovně různých znečišťujících látek v ovzduší (tzv. nízkonákladové senzory neboli *low-cost sensors*). Tento typ senzorů lze obecně rozdělit do několika kategorií na základě principu měření a z něho plynoucích možností využití pro detekci určité znečišťující látky.

Tyto cenově nenáročné přístroje jsou perspektivním nástrojem pro dočasné cílené měřicí kampaně v doposud nepokrytých zájmových místech, kde zavedení a provozování velmi přesných, nicméně finančně nákladnějších monitorovacích metod používaných ve státní síti imisního monitoringu není technicky nebo finančně realizovatelné, případně je z dlouhodobého hlediska i neefektivní. Vzhledem k malým rozměrům senzorů a jejich nízké hmotnosti jsou tato zařízení v posledních letech rovněž využívána pro tzv. mobilní měření za použití automobilu, letadla nebo bezpilotních letových prostředků (dronů).

Z dosavadních zkušeností získaných při nasazení těchto senzorů v České republice i jiných zemích ovšem vyplynula řada problémů, které jsou s používáním nízkonákladových senzorů spojeny a se kterými je zapotřebí počítat jak při zpracování dat, tak při jejich interpretaci. Z výsledků řady testovacích a srovnávacích měření různých odborných institucí (ČHMÚ, US EPA, JRC EC, NILU, WHO, WMO) vyplývá, že nízkonákladové senzory (v závislosti na jejich typu):

- mají ve srovnání s používanými referenčními metodami celkově vyšší meze detekce a nižší citlivost měření,
- jsou náchylné na interferenci různých znečišťujících látek (zhoršená selektivita),
- jsou značně citlivé na změny meteorologických podmínek, zejména na teplotu a vlhkost vzduchu,
- často trpí zvýšenou mezipřístrojovou nejistotou (významné odchylky v měření, a to i v rámci šarží stejného typu čidla),
- vykazují nestabilitu kvality měření v čase i místě, což vyžaduje důslednou kontrolu dat, včetně realizace počátečního, průběžného a konečného srovnávacího měření s odpovídající referenční metodou ve venkovních podmínkách,
- mají poměrně nízkou dobu provozní životnosti ve venkovním prostředí (v průměru 1 až 2 roky, pouze některými výrobci uváděné maximum životnosti více jak 3 roky),
- většinou je nelze opravit, ale musí se nahradit za nové kusy (spotřební zboží), s čímž je potřeba počítat při odhadu celkové finanční náročnosti měřicí kampaně,
- jakožto orientační/indikativní měření nepodléhají legislativně stanoveným pravidlům pro ověřování metrologické návaznosti na referenční metody, existují pouze doporučené postupy pro vhodné zavádění zařízení, pro kontrolu kvality dat, včetně hodnocení a vhodné interpretace dat,
- nelze používat pro stanovování legislativně závazných stanovisek, pro hodnocení překročení imisních limitů nebo pro hodnocení zdravotních rizik.

Nízkonákladové senzory mohou být využity jako doplněk stávající státní monitorovací sítě, pro dočasné měřicí kampaně za účelem prvotního průzkumu nových potenciálně problémových lokalit (hotspotů), za účelem provádění diferenčního měření na různých lokalitách, včetně možnosti využití dat pro edukativní a výzkumné účely. Pro efektivní využití senzorů ke zmíněným účelům je ovšem vždy důležité dodržovat doporučené metodické postupy pro eliminaci výskytů náhodných či jiných systémových chyb v měření. S ohledem na nezbytnost provádění alespoň orientačního ověření kvality sensorového měření prostřednictvím srovnávacího měření ve venkovních podmínkách je důrazně doporučeno spolupracovat s některou z odborných institucí zabývajících se monitoringem kvality ovzduší v ČR.

Přes nepopiratelný postupný technický vývoj nízkonákladových senzorů nadále platí, a to jak za současného stavu poznání a legislativy, tak za předpokladu zohlednění plánovaných legislativních změn v blízké budoucnosti, následující závěry:

- **Data získaná z nízkonákladových senzorů nepředstavují rovnocennou alternativu měření ve státní síti monitoringu kvality ovzduší.**
- **Nadále platí, že sensorová měření nelze využívat pro vyhodnocování plnění požadavků vyplývajících z environmentální legislativy ani jako podklady pro hodnocení zdravotních dopadů nebo jiná rozhodnutí, která by zasahovala do života občanů a případně omezovala jejich práva, včetně případů, kdy by taková rozhodnutí měla za následek výrazné ekonomické náklady nebo ztráty.**

Obsah

1. Úvod	5
2. Základní typy senzorových zařízení, jejich specifikace a cenová dostupnost	6
2.1. Metal-oxidové senzory (pro monitoring plyných látek)	6
2.2. Elektrochemické senzory (pro monitoring plyných látek)	7
2.3. Optoelektronické senzory na bázi absorpce infračerveného záření (pro monitoring plyných látek)	8
2.4. Fotoionizační detektory (monitoring organických látek)	9
2.5. Optické čítače částic	9
2.6. Komplexní senzorové systémy	10
3. Známé faktory ovlivňující kvalitu měření senzorů	11
3.1. Parametry související s kvalitou měření	11
3.2. Vliv okolních podmínek na kvalitu měření senzorů	14
3.3. Vliv stárnutí/opotřebení senzorů	15
4. Důležité otázky k zodpovězení před pořízením senzorového zařízení	16
5. Výběr vhodné lokality a umístění senzorů na cílové lokalitě	19
5.1. Výběr vhodné lokality pro monitoring kvality ovzduší senzorovými zařízeními	19
5.2. Podmínky pro výběr místa instalace zařízení	19
6. Ověření výkonnosti senzorových zařízení	22
6.1. Doporučené postupy ověřování výkonnosti senzorových zařízení	23
6.2. Jak zajistit orientační srovnávací měření senzorů s referenční metodou měření?	24
6.3. Doporučené podmínky pro srovnávací měření	25
6.3.1. Opakované společné umístění všech senzorových jednotek	26
6.3.2. Nepřetržitě společné umístění alespoň jednoho senzoru	26
6.3.3. Společné umístění s mobilní referenční stanicí	26
6.3.4. Společné umístění s mobilní senzorovou jednotkou	26
6.4. Co když referenční metoda měření není k dispozici?	27
7. Metody kontroly senzorových dat a jejich matematických korekcí	27
7.1. Kontrola dat ze senzorového měření	27
7.2. Jednoduchá lineární regrese (metoda nejmenších čtverců) pro hodnocení výkonu senzorového měření	28
7.3. Další parametry popisující výkonnost senzorového zařízení	31
7.4. Pokročilejší metody regresních analýz pro popis variability v senzorových datech	32
7.5. Nejčastěji používané metody matematické korekce senzorových dat	34
7.6. Kontrola změn výkonnosti senzorových zařízení a datových posunů	36
8. Nejčastější způsoby interpretace senzorových dat, doporučení vhodných postupů	39
8.1. Prezentace naměřených koncentrací a vztahování vůči imisním limitům	39
8.2. Používání barevné škály pro stanovené rozsahy měřených koncentrací	41
8.3. Index kvality ovzduší	42
9. Závěr a doporučení	44
10. Zdroje	45
Příloha A1: Slovník nejčastěji používaných pojmů, včetně výkladu	48
Příloha A2: Minimální specifikace senzorů vhodných pro monitoring venkovního ovzduší	52

Příloha A3: Příprava senzorových dat pro zpracování, výpočet parametrů lineární regrese a reziduální chyby	53
A3.1 Sjednocení času měření a průměrování	53
A3.2 Očištění dat od chyb před průměrováním	53
A3.4 Metody průměrování.....	54
A3.5 Příklad výpočtu parametrů lineární regrese, koeficientu determinace, parametrů chyby měření	55

1. Úvod

Díky stále rostoucímu zájmu odborné i laické veřejnosti o kvalitu životního prostředí a tendenci, pokud možno co nejvíce minimalizovat negativní dopady různých lidských činností na životní prostředí, se do popředí všeobecného zájmu dostávají alternativní a méně finančně nákladné metody pro monitoring stavu různých složek prostředí (kvalita vody, venkovního i vnitřního ovzduší, výkyvy počasí, aj.). Nízkonákladová zařízení tak například umožňují díky svým malým rozměrům a nízké pořizovací ceně monitorovat chemické látky v prostředí v podrobnějším prostorovém měřítku, než je tomu u stávajících stacionárních sítí s referenčními metodami měření spravovaných odbornými institucemi dle platných legislativ a evropských standardů.

V České republice je za účelem monitoringu kvality ovzduší provozována Státní síť imisního monitoringu (SSIM) pod záštitou Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Síť je tvořena přibližně 200 automatickými, manuálními i kombinovanými stanicemi rozmístěnými napříč republikou dle tzv. konceptu sítě (zohledňujícího kategorizaci stanic s ohledem na účely měření). Do SSIM jsou zapojeny i monitorovací stanice jiných organizací či subjektů (např. zdravotní ústavy, další odborné instituce, města či firmy). Všechny stanice využívají výhradně zařízení odpovídající referenčním či uznaným ekvivalentním metodám měření a jejich provoz musí splňovat platné legislativní předpisy. Veškerá data, operativní i verifikovaná, jsou pak předávána do národního Informačního systému kvality ovzduší (ISKO), který je veřejně přístupný prostřednictvím ČHMÚ. Tato data slouží pro pravidelné hodnocení stavu ovzduší v porovnávání s platnými imisními limity, včetně využití pro stanovování indexu kvality ovzduší (*air quality index*) a pro provoz smogového varovného a regulačního systému (*smog warning and regulation system*).

V posledních letech jsou často poptávanými a používanými nástroji také **nízkonákladové senzory pro monitoring kvality venkovního ovzduší**. Tato zařízení jsou svými technickými vlastnostmi a danými provozními limity řazena dle platné legislativy (zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, platném znění a směrnice 2024/2881/ES, o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu) a souvisejících technických norem **do kategorie orientačních měření** (se stanovenou nejistotou měření obvykle vyšší než 25 až 30 %) či dle individuální kvality i **do kategorie objektivních odhadů** (stanovená nejistota měření vyšší než 75 %). Podmínky měření nízkonákladovými senzory ani data získaná z těchto měření nedosahují přesnosti, kterou požaduje legislativa pro tvorbu závazných stanovisek při hodnocení stavu ovzduší, posuzování překračování imisních limitů nebo pro hodnocení zdravotních rizik.

I přes vyšší nejistoty měření mohou být tato zařízení účelově **použita pro získání orientační informace o úrovni kvality venkovního ovzduší, avšak pouze za předpokladu, že budou zváženy a aplikovány doporučené postupy** vycházející nejen ze zkušeností odborníků v rámci ČR, ale i různých nadnárodních odborných institucí zabývajících se problematikou monitoringu kvality ovzduší (např. Joint Research Centre of European Commission, US Environmental Protection Agency, World Health Organisation, World Meteorological Organisation, aj.). **S ohledem na nutnost provádění alespoň orientačního ověření kvality sensorových dat srovnávacím měřením ve venkovních podmínkách s referenčními či ekvivalentními metodami měření je vždy doporučeno před zavedením senzorů spolupracovat s některou z odborných institucí přispívajících do SSIM a zajistit srovnávací měření v odpovídajících podmínkách.**

Cílem tohoto dokumentu je **shrnout nejdůležitější aktuální informace a poznatky týkající se nízkonákladových sensorových zařízení pro monitoring kvality ovzduší, jejich vhodného provozování, zpracování dat a v neposlední řadě upozornit na úskalí týkající se hodnocení dat a vhodné interpretace dat.**

Obsahem tohoto dokumentu jsou následující **témata**:

- základní typy senzorových zařízení, jejich specifikace a cenová dostupnost,
- známé faktory ovlivňující kvalitu senzorových měření,
- důležité otázky k zodpovězení před pořízením senzorového zařízení,
- výběr vhodné lokality a umístění senzorů na cílové lokalitě,
- ověření výkonnosti senzorových zařízení,
- metody kontroly senzorových dat a jejich matematických korekcí,
- nejčastější způsoby interpretace senzorových dat, doporučení vhodných postupů.

Důležitá poznámka: V Příloze A1 tohoto dokumentu je uveden slovník nejčastějších pojmů souvisejících se senzory pro měření kvality venkovního ovzduší, a to včetně jejich vysvětlení a používaných anglických ekvivalentů či zkratk.

2. Základní typy senzorových zařízení, jejich specifikace a cenová dostupnost

Senzorová zařízení/systémy/stanice pro monitoring kvality venkovního ovzduší mohou mít různé podoby provedení, nicméně vždy se skládají z těchto základních komponentů: primární nízkonákladový senzor (detekční jednotka), zdroj elektrického napájení a/nebo baterie, jednotka pro zpracování signálu, místní úložiště dat (datalogger), převodník dat, ochranný box proti extrémním povětrnostním vlivům a dešti a prostor pro odběr vzorků vzduchu.

Často kladenou otázkou je, **které senzorové zařízení je to nejlepší/nejvýkonnější**. V první řadě je vždy důležité **zaměřit se na primární detekční jednotku a její vlastnosti**. Existuje 5 základních kategorií primárních nízkonákladových senzorů (tzv. *low-cost sensors* neboli *LCSs*) lišících se principem měřicí technologie a základními vlastnostmi, které přinášejí své výhody i nevýhody.

Důležitá poznámka: Pro lepší využitelnost tohoto dokumentu v praxi jsou v Příloze A2 uvedena doporučení na minimální specifikaci senzorových zařízení pro nejčastěji monitorované znečišťující látky.

2.1. Metal-oxidové senzory (pro monitoring plynných látek)

Tyto nízkonákladové senzory se skládají z oxidu kovu (odporového nebo polovodičového MOx), jehož odpor nebo vodivost se mění při vystavení plynu s oxidačním potenciálem. Reakce takových plynů se zahřátým oxidem kovu vede k zachycení elektronů a k jejich akumulaci na povrchu senzoru, což vytváří negativní náboj působící jako bariéra pro elektrony, čímž se mění vodivost. Změny vodivosti jsou obvykle úměrné koncentracím plynu/ů s oxidačním potenciálem v ovzduší a lze je monitorovat pomocí externího okruhu. Metal-oxidové senzory mohou měřit ne-metanové uhlovodíky, oxid uhelnatý (CO), oxid uhličitý (CO₂), oxid dusný (NO), oxid dusičitý (NO₂) a ozón (O₃)^{1,2}. Výhody a nevýhody těchto typů senzorů jsou uvedeny v **Tab. 1**. Příklad podoby MOx senzorů je uveden na **Obr. 1**.

Tab. 1. Shrnutí výhod a nevýhod metal-oxidových typů senzorů pro monitoring plynných látek¹⁻³.

Výhody	Nevýhody
Nízké pořizovací náklady (10–20 EUR/ks)	Citlivé na výrazné změny teploty a vlhkosti
Dobrá citlivost, od $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ do $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo od ppb po nízké ppm	Dlouhá doba odezvy senzoru, mezi 5 až 50 min
Dlouhá životnost a odolnost vůči extrémním meteorologickým podmínkám	Chemická reakce není stabilní (v závislosti na teplotě, vlhkosti nebo opotřebením)
	Možný posun v citlivosti vyžadující častou fyzickou kalibraci
	Velké nároky na výkon elektrického napájení kvůli potřebě vytápění senzoru



Obr. 1. Příklad podoby metal-oxidových nízkonákladových senzorů (MOx senzory) pro monitoring plynných látek. Použitý zdroj⁴.

2.2. Elektrochemické senzory (pro monitoring plynných látek)

Elektrochemické (EC) nízkonákladové senzory jsou založeny na oxidačně-redukční reakci mezi látkou znečišťující ovzduší a senzorovou elektrodou ponořenou do elektrolytu. Reakcí vzniká elektrický proud mezi elektrodami, který je úměrný koncentracím látek znečišťujících ovzduší. Elektrochemické senzory se používají k měření NO₂, NO, O₃, CO a oxidu siřičitého (SO₂)¹⁻². Výhody a nevýhody těchto typů senzorů jsou uvedeny v **Tab. 2**. Příklad podoby EC senzorů je uveden na **Obr. 2**.

Tab. 2. Shrnutí výhod a nevýhod elektrochemických senzorů pro monitoring plynných látek¹⁻³.

Výhody	Nevýhody
Střední pořizovací cena: 50–150 EUR/ks	Citlivé na změny teploty a vlhkosti s menším rozsahem než u MOx
Dobrá citlivost, od $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ do $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo od ppb po nízké ppm	Špatná selektivita: vykazuje zkříženou reaktivitu s podobnými typy molekul (interference)
Velmi krátká doba odezvy, 30–200 s	Kratší životnost než u MOx senzorů a vysoce závislá na hladinách exponovaných plynů
Na rozdíl od MOx-LCS není potřeba velký výkon	Méně odolné vůči meteorologickým podmínkám než MOx senzory
	Možnost vysoušení elektrolytu (snížení provozuschopnosti) vlivem kombinace nízké vlhkosti a vysoké teploty



Obr. 2. Příklad podoby elektrochemických nízkonákladových senzorů (EC senzory) pro monitoring plynných látek. Použité zdroje^{5,6}.

2.3. Optoelektronické senzory na bázi absorpce infračerveného záření (pro monitoring plynných látek)

Optoelektronické nedisperzní senzory (NDIR) jsou založeny na absorpci infračerveného záření specifického pro dané molekuly. Zatímco infračervené záření ze zdroje prochází plynem, specifické vlnové délky jsou absorbovány podle známého Lambert-Beerova zákona, kdy je absorpce logaritmicky úměrná koncentraci plynu a délce dráhy paprsku. NDIR senzory jsou široce používány pro měření koncentrací CO₂ i CO^{1,2}. Výhody a nevýhody těchto typů senzorů jsou uvedeny v **Tab. 3**. Příklad podoby NDIR senzorů je uveden na **Obr. 3**.

Tab. 3. Shrnutí výhod a nevýhod optoelektronických senzorů na bázi absorpce infračerveného záření pro monitoring plynných látek¹⁻³.

Výhody	Nevýhody
Střední cena: 100–350 EUR/ks	Ovlivňovány teplotou, vlhkostí a tlakem, a proto mohou vyžadovat opravy
Dobrá selektivita a citlivost na CO ₂ , mezi 350 a 2000 ppm	Vysoké detekční limity pro jiné plyny než CO ₂
Velmi krátká doba odezvy, 20–120 s	Často se vyskytuje odlišná reakce při nízkých a vysokých koncentracích
Omezené kolísání citlivosti snímače	
Dlouhá životnost	
Malé nároky na napájení	



Obr. 3. Příklad podoby nedisperzního senzoru na bázi absorpce infračerveného záření (NDIR) pro monitoring plynných látek. Použité zdroje^{5,7}.

2.4. Fotoionizační detektory (monitoring organických látek)

Fotoionizační detektory (PID) využívají vysokoenergetické fotony k excitaci a nakonec k ionizaci organických molekul. Energie fotonů dopadajících na PID je obvykle přibližně 10 eV, a proto jsou v nich ionizovány pouze organické molekuly s ionizační energií rovnající se této nebo nižší energii. Tyto ionty generují elektrický proud úměrný excitovaným organickým sloučeninám^{1,2}. Výhody a nevýhody těchto typů senzorů jsou uvedeny v **Tab. 4**. Příklad podoby PID senzorů je uveden na **Obr. 4**.

Tab. 4. Shrnutí výhod a nevýhod fotoionizačních detektorů pro monitoring organických látek¹⁻³.

Výhody	Nevýhody
O mnoho levnější než konvenční měření těkavých organických látek (VOC), cena 400 EUR/ks	Vysoká spotřeba elektrické energie
Malá závislost na teplotě a nízká citlivost na vlhkost	Vysoké meze detekce (do ppm)
Rychlá reakční doba	Odchyly linearit mezi vysokými a nízkými koncentracemi
Dobrá citlivost: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ až nižší $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	Není selektivní, tj. nemožnost rozlišení dílčích VOC
	Významný krátkodobý posun v průběhu měření (drift)
	Vyžaduje častou údržbu a kalibraci



Obr. 4. Příklad podoby nízkonákladových fotoionizačních detektorů (PID) pro monitoring směsí organických látek. Použité zdroje^{5,8}.

2.5. Optické čítače částic

Optické čítače částic (OPC) jsou vybaveny zdrojem světla a detektorem umožňujícím měřit rozptýlené světlo jednotlivými částicemi v proudu vzduchu. Laserová dioda je nejběžnějším zdrojem světla používaným v těchto nízkonákladových senzorech. Čítače částic počítají jednotlivé částice, které hodnotí ve více velikostních skupinách. Často rovněž poskytují přepočtenou hmotnostní koncentraci různých velikostních frakcí aerosolu^{1,2}. Výhody a nevýhody těchto typů senzorů jsou uvedeny v **Tab. 5**. Příklad podoby OPC senzorů je uveden na **Obr. 5**.

Tab. 5. Shrnutí výhod a nevýhod optických čítačů částic pro monitoring aerosolového znečištění¹⁻³.

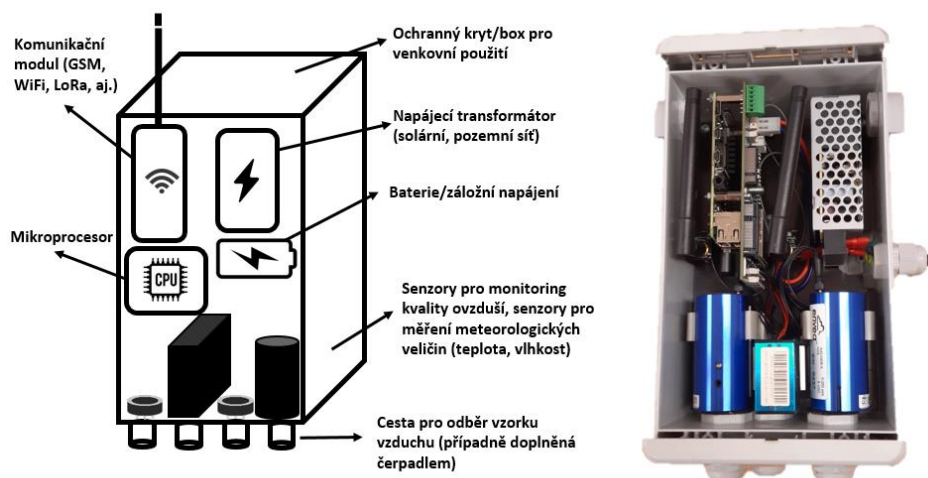
Výhody	Nevýhody
Nižší cena: 25–400 EUR/ks	Přepočet počtu částic na hmotnostní koncentrace PM vychází z teoretických modelů
Rychlá doba odezvy, řádově 1 s	Naměřené signály jsou ovlivňovány několika faktory jako např. tvar, barva a hustota částic, dále vlhkost či index lomu
Možnost měření několika velikostních frakcí PM	Častá je nízká citlivost u frakcí větších než 2,5 μm
Dobrá citlivost měření v rozsahu $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Problematika měřená/dopočítávaná frakce (specifikum výrobce)



Obr. 5. Příklad podoby nízkonákladových optických čítačů částic (OPC) pro monitoring koncentrací či počtů aerosolových částic. Použité zdroje⁹⁻¹¹.

2.6. Komplexní senzorové systémy

Jak již bylo naznačeno na začátku kapitoly 1, pro plnou funkčnost a uvedení nízkonákladového měření do provozu jsou LCSs obvykle integrovány do tzv. senzorových systémů (definice dle technické normy pro měření plyných látek senzorovými systémy¹²). Tyto **senzorové systémy mohou integrovat více typů primárních senzorových jednotek pro monitoring kvality venkovního ovzduší** (monitoring plyných látek i monitoring aerosolových částic). Zařízení jsou často doplňována i o senzory měřící základní meteorologické veličiny (teplota, vlhkost vzduchu, atmosférický tlak). **Výhodou je jednotnost řešení systému** včetně elektrického napájení (ze sítě či baterie), místa pro odběr vzorků vzduchu (nasávání, čerpadlo, vymezená cesta vzorku vzduchu do místa detekce), jednotek pro zpracování signálu, zařízení pro místní úložiště dat, zařízení pro přenos dat a ochranný box proti extrémním venkovním podmínkám (voda, námraza, aj.). Cena takovýchto komplexních senzorových systémů je velmi různorodá podle náročnosti jejich provedení. Odhadem se uvádí, že se kompletní senzorový systém připravený pro zapojení více primárních LCSs může cenově pohybovat v rozmezí 400 až několik tisíc eur (bez započtení ceny za samotné primární LCSs)¹⁻³. Příklad podoby konstrukce senzorových systémů je uveden na **Obr. 6**.

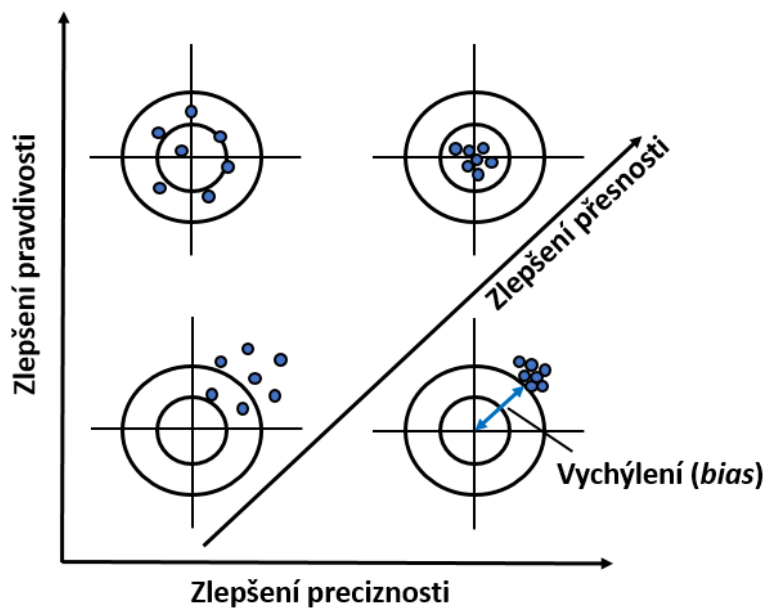


Obr. 6. Příklad možné podoby komplexního sensorového systému pro monitoring kvality venkovního ovzduší (ilustrativní obrázek s popisem komponentů vlevo; foto s příkladem konkrétního sensorového systému vpravo). Zdroj ČHMÚ.

3. Známé faktory ovlivňující kvalitu měření senzorů

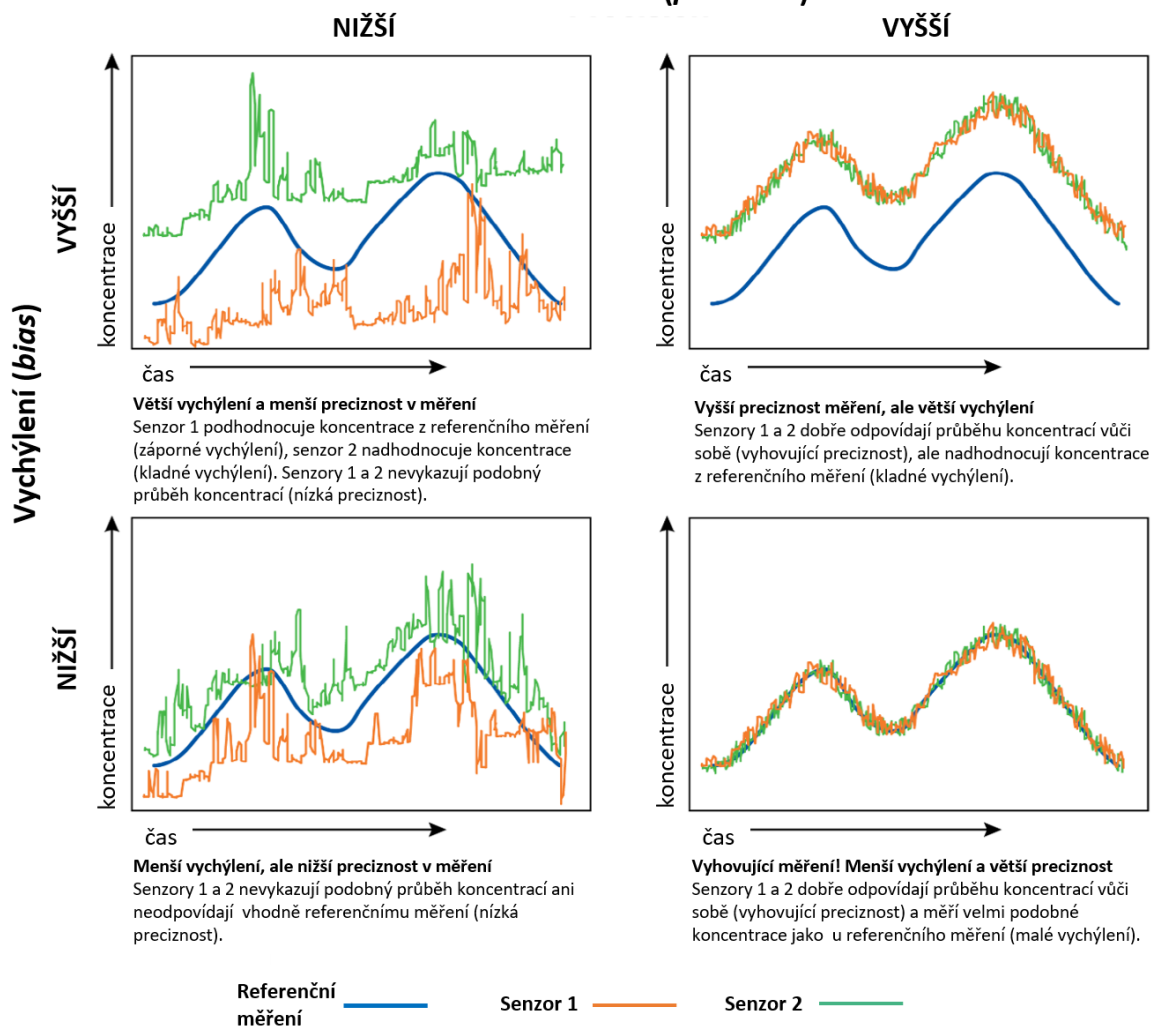
3.1. Parametry související s kvalitou měření

Kvalita měření senzoru je definována několika parametry, které je potřeba posuzovat zároveň. Základem je **přesnost měření senzoru** (*measurement accuracy*), která popisuje míru shody mezi měřením znečišťující látky senzorem a přístrojem používaným pro referenční metody monitoringu. Přesnost měření se skládá ze dvou složek: **preciznosti měření** (*precision*) a **vychýlení/odchylky měření** senzoru (*bias*). Preciznost měření poukazuje na to, jak shodně sada senzorů reprodukuje měření znečišťující látky za stejných podmínek (např. za stejné koncentrace a teploty). Vychýlení/odchylka se vztahuje k systematické odchylce měření. To znamená, že senzor vždy měří o něco více nebo méně, než je správná koncentrace (viz ilustrace na **Obr. 7**). Vychýlení pak dále odkazuje na chybu měření senzoru (*measurement error*)³. **Tyto parametry se doporučuje ověřovat u každého senzoru zvlášť**, a to v laboratorních podmínkách (tzv. kalibrace; *calibration*) nebo ve venkovních podmínkách (tzv. srovnávací měření společným umístěním s kontrolním zařízením; *collocation*) porovnáním se zařízeními splňujícími podmínky referenční či ekvivalentní metody měření (viz **kapitola 5**). Příklad uvádějící různé projevy preciznosti a vychýlení na kvalitu měření koncentrací znečišťující látky různými senzory je uveden na **Obr. 8**. Zvláště preciznost měření bývá u nízkonákladových senzorů častou slabinou, kdy mohou být detekována různá vychýlení (tzv. posuny v nulové koncentraci) mezi jednotlivými sensorovými jednotkami stejného typu a výrobce. Dále pak může v průběhu času měření senzoru docházet k různým **náhlým či systematickým datovým posunům** (*data drift*; **Obr. 9**).

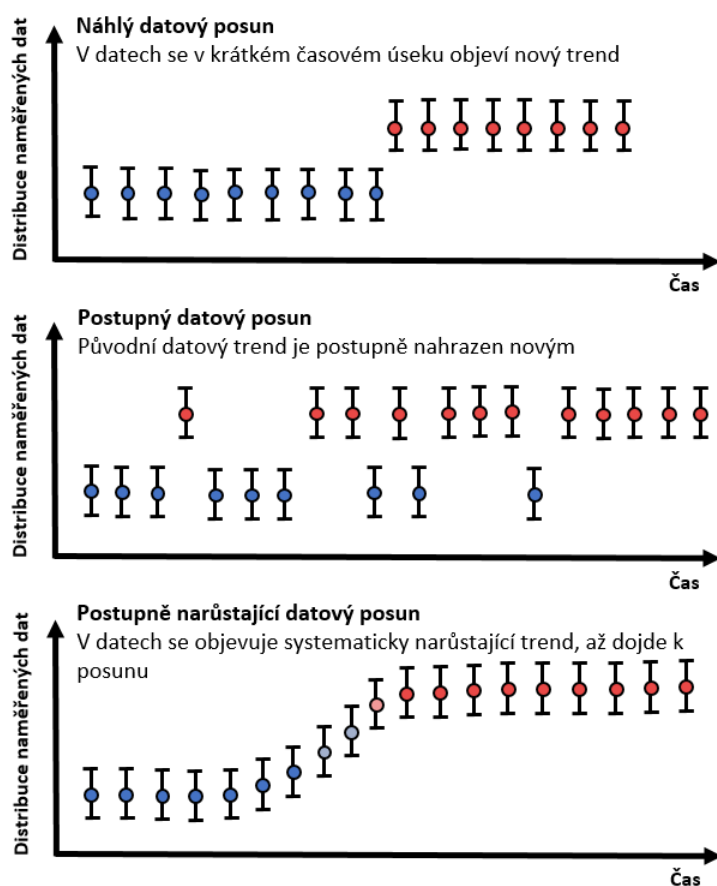


Obr. 7. Ilustrační obrázek popisující efekt preciznosti, přesnosti a vychýlení na celkovou pravdivost měření. Upravený zdroj¹³.

Preciznost (precision)



Obr. 8. Parametry související s kvalitou měření senzorů a příklady jejich různých projevů na měření koncentrací znečišťujících látek. Upravený zdroj³.



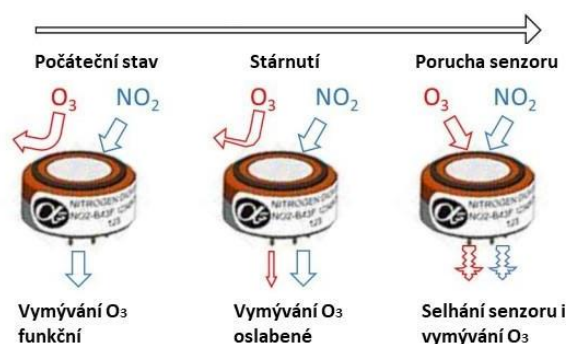
Obr. 9. Ilustrační obrázek popisující různé typy datových posunů. Upravený zdroj¹⁴.

3.2. Vliv okolních podmínek na kvalitu měření senzorů

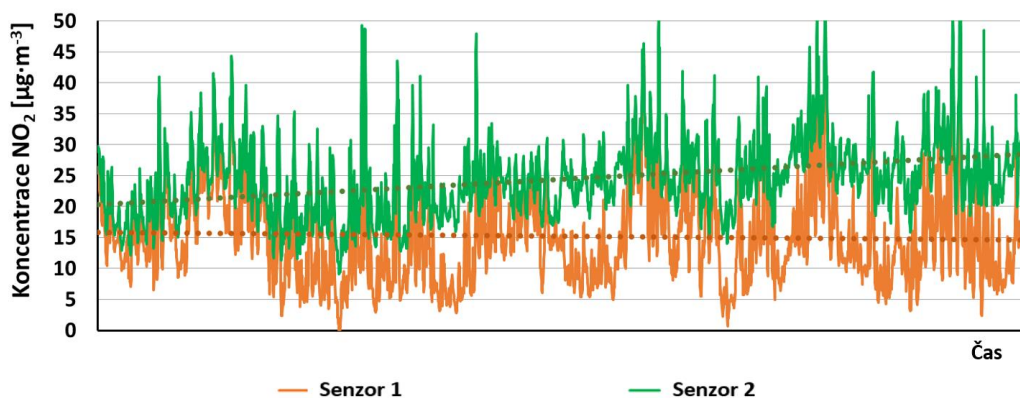
Kvalita měření senzorů nezávisí jen na samotných parametrech daného čidla, jako je rozsah měření (*measurement range*) či limit detekce (*detection limit*), ale je ovlivňována i jinými vnějšími parametry prostředí, ve kterém senzor měří. Je tedy důležité si uvědomit, že **kvalita měření senzoru**, jeho přesnost, preciznost i vychýlení měření se může v průběhu času měnit. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2, většina typů senzorů je citlivá na rychlé změny teploty a vlhkosti v prostředí, včetně možnosti stejné reakce senzoru na různé chemické sloučeniny (tzv. interference látek zejména u plyných senzorů). U optických čítačů částic je pak známo, že se kvalita měření senzoru snižuje při vysoké vlhkosti vzduchu (vysoká chybovost při kondenzačních podmínkách) a dále se může měnit s typem aerosolových částic či jejich velikostí¹⁻³. V souvislosti s tím je rovněž zapotřebí zmínit, že parametry související s kvalitou měření senzorů, které jsou uváděny výrobcem v technických specifikacích zařízení, nemusí tyto změny nereflaktovat. Uváděné technické parametry senzorů včetně chybovosti jsou ve většině případů stanovovány v definovaných laboratorních podmínkách, které nepodléhají velkým výkyvům (např. v provozních podmínkách o teplotě $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, relativní vlhkosti $50\% \pm 10\%$ a atmosférickém tlaku $1013\text{ mbar} \pm 5\%$).

3.3. Vliv stárnutí/opotřebení senzorů

Jednotlivé typy senzorů mají rovněž různou dobu své provozní životnosti. Například elektrochemické senzory trpí na rychlejší opotřebení měřící jednotky, tzv. zestárnutí/oslabení elektrolytu v průběhu času (viz příklad pozbyetí funkčnosti NO₂ senzoru na Obr. 10). Optické čítače částic trpí na znečištění nebo jiné poškození optické měřící komory. V obou případech pak dochází ke změně citlivosti senzoru a změně v odchylce měření až k datovému posunu (náhlý či postupný datový drift viz příklad Obr. 11). Někteří výrobci uvádějí průměrnou dobu životnosti senzoru v technických specifikacích zařízení (viz kapitola 2), nicméně tento parametr může být silně individuální a proměnlivý v závislosti na konkrétních podmínkách prostředí, ve kterých je senzor provozován. Případné pozbyetí funkční životnosti senzoru v podobě změny kvality měření je zapotřebí rovněž průběžně kontrolovat a vyhodnocovat (viz dále kapitoly 5 a 6).



Obr. 10. Ilustrační obrázek k projevům stárnutí nízkonákladového senzoru pro monitoring NO₂ na oslabení chemismu reakce zajišťující vymývání O₃ až po selhání senzoru v podobě reakce na směs obou plynů. Upravený zdroj¹⁵.



Obr. 11. Příklad projevu stárnutí elektrochemického senzoru na NO₂, kdy po 380 dnech měření začalo u senzoru 2 docházet k datovému posunu v podobě postupného narůstání měřených koncentrací. Sensory 1 a 2 měřily ve stejných podmínkách. Zdroj ČHMÚ.

4. Důležité otázky k zodpovězení před pořízením senzorového zařízení

Při výběru vhodného typu senzoru či senzorového systému by měl vždy rozhodovat **výsledný účel záměru**, pro který chceme senzor použít, a **konečná informace, kterou chceme získat**. Dále je zapotřebí zohlednit, že zmíněné orientační pořizovací ceny senzorů či senzorových systémů nezahrnují provozní náklady spojené s elektrickým napájením, přenosem dat (připojení k internetu), datové servery, dále dostatečný personál, potřebný pro výběr a přípravu míst instalace, instalaci senzorů samotnou, kalibraci senzorů či jejich kontrolu vůči referenčním metodám měření ve venkovních podmínkách a dále kontrolu a vyhodnocování dat. Dále **je pak zapotřebí počítat s omezenou životností primárních senzorů** a s potřebou jejich úplného obnovení v případě nesprávné funkce či po uplynutí funkční životnosti. Senzorové systémy se obvykle dají repasovat, primární nízkonákladová čidla nikoliv a musí být nahrazena novými kusy (považováno za spotřební materiál).

Na samotném začátku je důležité si uvědomit, že **nízkonákladové senzory jsou doplňková zařízení, která mohou být použita pro účely orientačního měření nebo objektivních odhadů (nereferenční metody monitoringu)**. Kategorie účelů měření, pro které je vhodné použití senzorových zařízení, jsou uvedeny v **Tab. 6**.

Základní kroky, které jsou součástí **procesu plánování** při zavádění senzorového měření: definice základní otázky, stanovení plánu měření, nastavení měřicí kampaně, nastavení sběru dat a plán vyhodnocení dat (viz **Obr. 12**). **Osmero nejdůležitějších otázek**, na které je zapotřebí si odpovědět před pořízením senzorů, je shrnuto na **Obr. 13**.

Tab. 6. Příklady účelů měření, pro které je za předpokladu dodržení podmínek pro kontrolu kvality měření a dat vhodné použití nízkonákladových senzorů kvality ovzduší. Upravený zdroj³.

Kategorie účelu měření	Popis účelu měření	Konkrétní příklady měření
Časoprostorová proměnlivost kvality venkovního ovzduší	Charakterizace koncentrace znečišťujících látek v geografické oblasti a/nebo čase, např.: <i>Je znečištění na určitém místě ráno vyšší než odpoledne?</i> <i>Je znečištění ovzduší v centru města nižší po zavedení dopravního obchvatu města nebo před ním?</i>	- Denní trendy úrovně znečištění ovzduší - Stanovení gradientů/změn v prostředí - Doplňková data pro předpovědní modely kvality ovzduší - Občanská věda - Reakce na havarijní situace v prostředí (velmi vysoké koncentrace) - Výuka a osvěta v oblasti kvality ovzduší
Porovnávání kvality ovzduší v odlišných lokalitách	Analýza rozdílů a/nebo podobností v charakteristikách znečištění ovzduší mezi různými lokalitami nebo regiony. <i>Je vyšší znečištění ve městě nebo v obci?</i> <i>Jaký je rozdíl mezi průmyslovou lokalitou na východě a na západě republiky?</i>	- Identifikace nových hotspotů - Doplňkový monitoring pro další specifické průzkumy lokality - Doplňková data pro další statistická zpracování (datová fúze) - Diferenční měření
Měření kvality ovzduší za pohybu	Měření koncentrací znečišťujících látek ve vybraném prostředí za pohybu pomocí mobilní platformy (automobil, kolo, dron, aj.) <i>Jaké jsou koncentrace znečišťujících látek v prostředí při jízdě městem na kole do práce?</i> <i>Jaké koncentrace se vyskytují ve vyšších výškách nad obcí s převážným vytápěním tuhými palivy?</i>	- Okamžité měření změn v prostředí - Doplňková data pro předpovědní modely kvality ovzduší



Obr. 12. Základní kroky důležité při plánování záměru monitoringu kvality ovzduší pomocí senzorových zařízení. Upravený zdroj³.



OSMERO otázek, které je zapotřebí zodpovědět před pořízením sensorového zařízení



1. Pro jaký účel chci senzory instalovat? Co chci měřením zjistit?

- vzdělávací a edukativní účely
- identifikace problémových lokalit (tzv. hotspotů), diferenční měření
- výzkumné účely



2. Jaká problematika mě v souvislosti s tímto účelem zajímá?

- odhad efektu dopravní zátěže na místní kvalitu ovzduší
- odhad efektu lokálního vytápění na místní kvalitu ovzduší
- odhad efektu průmyslového zdroje na místní kvalitu ovzduší
- úroveň požadovaných koncentrací na „nedotčených“ lokalitách



3. Jaké znečišťující látky mě v souvislosti s cílem měření zajímají?

- aerosolové, resp. prachové částice (PM₁₀, PM_{2,5})
- plynné látky (NO₂, O₃, CO)
- jiné specifické sloučeniny (konkrétní sloučeniny VOC, PAH, ...), které vyžadují spíše laboratorní či jiné referenční stanovení



4. Poskytujete výrobce daného senzoru dostatek informací o měřicím systému?

- Co přesně a na jakém principu dané zařízení měří?
- Je senzor vhodný pro instalaci do venkovního prostředí?
- Jaké jsou technické parametry zařízení (rozměry, hmotnost, způsob elektrického napájení, způsob ukládání a přenosu dat)?
- Jaká je mez detekce měření a rozsah měření dané látky, nejistota měření?
- Jaká je průměrná doba životnosti senzorů?
- Jaké jsou podmínky pro údržbu zařízení?



5. Jak ověřím kvalitu měření individuálních sensorových jednotek?

- srovnávací měření s referenčním nebo jiným ekvivalentním zařízením ve venkovním prostředí před instalací a ideálně částečně i během měření
- pravidelná kontrola dat v průběhu měření
- kontrola efektu jiných proměnných ovlivňujících měření (změny teploty, vlhkosti, tlaku, aj.)
- pravidelná kontrola datových posunů (významných odchylek) či jiných chyb v průběhu měření



6. Jaké budou náklady na pořízení a provoz senzorů?

- Kolik sensorových jednotek budu potřebovat?
- Kolik bude stát instalace senzorů na místo zájmu?
- Kolik budou stát služby spojené s ověřováním kvality měření senzorů před začátkem a v průběhu měřicí kampaně?
- Jak dlouho plánuji měření provádět s ohledem na životnost senzorů?



7. Kam instaluji senzory, aby měření splňovalo účel měřicí kampaně?

- Budu při instalaci dostatečně obezřetný vůči rozhraní emise/imise?
- Kam senzor umístím, aby nebyl významně ovlivňován „šumem“ v bezprostředním okolí (např. kuřáci na zastávkách MHD, grilování vs. lokální vytápění aj.)?
- Mám pro instalaci potřebnou infrastrukturu (el. napájení, datový přenos...)?



8. Jak vhodně interpretuji informace plynoucí z měření senzorů?

- Zohledňuji nejistotu měření senzorů, jejich vychýlení a preciznost?
- Uvědomuji si, že se jedná pouze o orientační měření, na základě kterého nelze omezovat svobodu lidí ani výdělečnou činnost jiných subjektů?
- Respektuji fakt, že sensorové měření může sloužit pouze jako podklad pro další přesnější analýzy nebo pro edukativní účely?

T A
Č R



Český
hydrometeorologický
ústav

Obr. 13. Osmero nejdůležitějších důležitých otázek, na které je zapotřebí si odpovědět před pořízením senzorů.

5. Výběr vhodné lokality a umístění senzorů na cílové lokalitě

5.1. Výběr vhodné lokality pro monitoring kvality ovzduší senzorovými zařízeními

Pokud mám stanovený cíl měření a vybrané vhodné zařízení, je důležité rovněž **naplánovat vhodné umístění senzorových zařízení**, aby splňovalo požadovaný účel. S ohledem na to je velmi důležité být obezřetný vůči gradientu prostředí, tedy že **bezprostředně u zdroje se jedná o monitoring emisí látek uvolňovaných do prostředí**, a teprve **dále od zdroje se zabýváme imisním znečištěním prostředí**, které bezprostředně působí na člověka či jiný živý organismus a může se dále projevovat na celkové vitalitě prostředí. Jedná se tedy o koncentrace znečišťující látky, které jsou výsledkem rozptylu emisí z různých zdrojů a působení řady dalších faktorů v prostředí (sluneční záření, aktivní chemické procesy, vliv povrchů aj.).

Při výběru lokality je důležité zodpovědět si následující základní otázky:

- Jaký typ změn kvality ovzduší v zájmové oblasti očekávám?
- Jak očekávám, že se bude vybraná lokalita lišit od jiných v okolí?
- Kam vhodně umístit senzory tak, abychom postihli tyto změny v prostředí?
- Jaké je typické nebo převládající proudění větru v dané lokalitě? Jakým směrem očekávám šíření znečišťujících látek?
- Potřebuji meteorologická data pro vhodnou interpretaci zamýšleného cíle měření?
- Mohu pro daný účel použít data ze stávající (státní) sítě monitoringu kvality ovzduší?
- Jak dlouho potřebuji v dané lokalitě měření provádět, aby byl postihnut účel měření?
- Jaké budou celkové náklady na pořízení a provoz uvažovaného senzorového měření (včetně zahrnutí náhradních senzorů pro případ poruchy a zajištění kontroly kvality měření)?

5.2. Podmínky pro výběr místa instalace zařízení

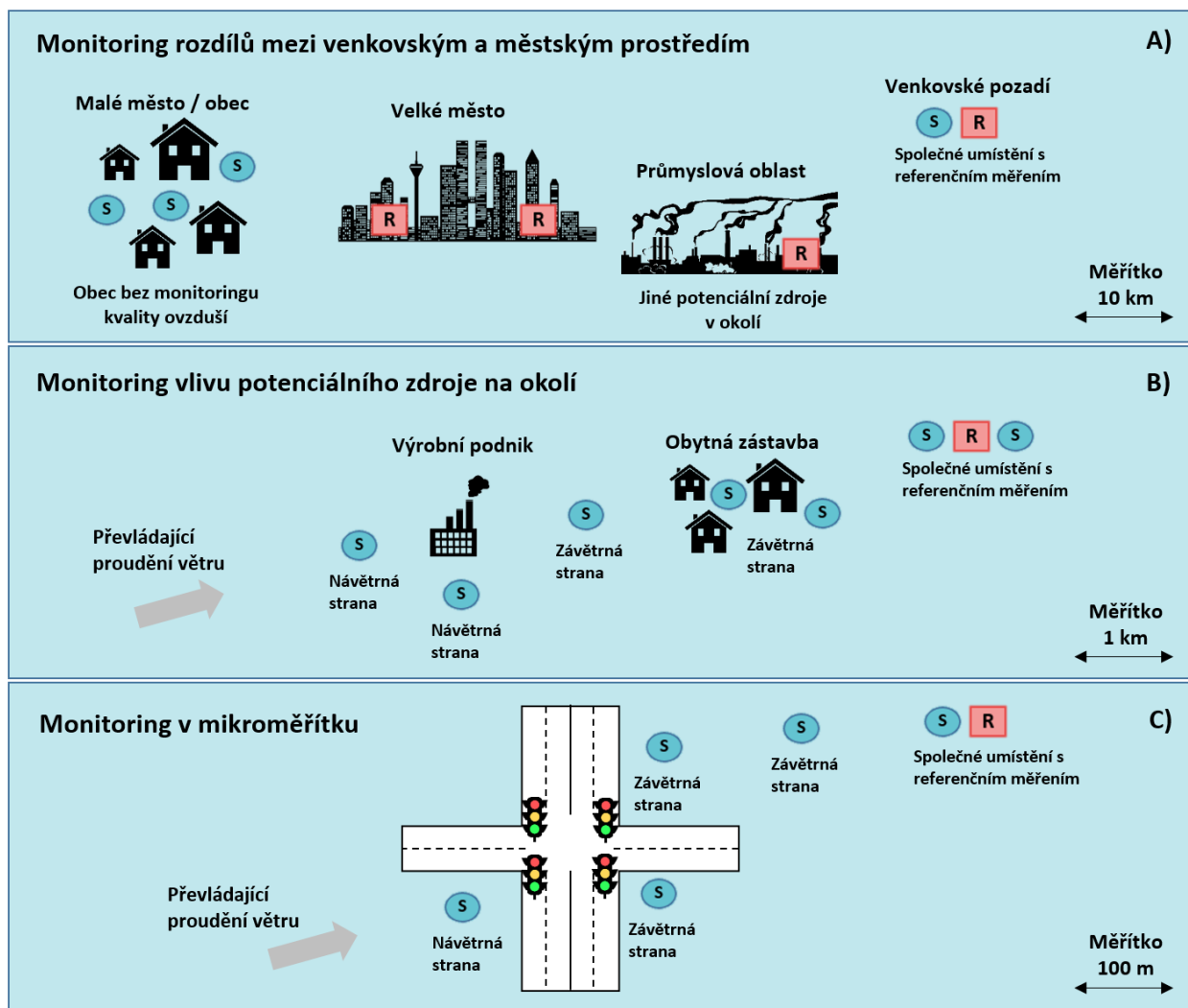
Senzory pro monitoring úrovně znečištění ve venkovním prostředí **ideálně umístíme do volného prostoru** alespoň s 2m odstupem od zemského povrchu či úrovně střechy a dále od jiných překážek, jako jsou budovy, vzrostlá vegetace či jiné emisní zdroje, které by mohly ovlivňovat dané měření. V případě, že nejsme schopni v daném místě nějaký **rušivý element** vytěsnit (např. přímý dosah komína, kuřáckých míst, aktivních stavenišť či dočasných odstavných ploch pro automobily), je zapotřebí s tímto rušivým elementem při hodnocení a interpretaci dat počítat, případně ho zpětným zkoumáním identifikovat. To vyžaduje zejména **zájem o lokalitu v době měření**, případně provádění pravidelných návštěv lokality a dokumentování procesů v prostředí.

Pokud nás zajímá **odhad efektu nějakého emisního zdroje na okolní prostředí**, je vždy dobré při plánování umístění senzorů zahrnout **měření v určité síti respektující možný rozptyl a výškový gradient prostředí** včetně zahrnutí tzv. pozadové lokality (bez ovlivnění, např. na návětrné straně zdroje). Vyplatí se tedy investovat do více kusů zařízení. Stejně tak je s ohledem na časté změny v odchylkách měření v čase a datové drifty vhodné zahrnout **společné umístění (kolokaci) alespoň jednoho senzorového zařízení s kontrolní referenční stanicí umístěnou poblíž zájmové lokality** (stacionární nebo mobilní stanice státního imisního monitoringu). Porovnání senzorového měření vůči měření na kontrolní stanici pak umožňuje odhalení podezřelých hodnot měření či posunů v měření i na

jiných senzorech. Rovněž je výhodou, pokud se v rámci plánování kampaně v dané lokalitě vyskytuje **alespoň jedno měření poskytující meteorologické parametry**. V opačném případě je doporučeno uvažovat o umístění alespoň jedné nízkonákladové meteorologické stanice (možnost identifikace změn v kvalitě měření senzorů a případné identifikace potenciálních zdrojů). Meteorologické měření by mělo být instalováno v reprezentativním místě uvažované sensorové sítě. Ideální instalace je opět ve volném prostoru, v místech bez přítomnosti větrných bariér. Měření větru by mělo být umístěno v minimální výšce 7 m nad zemí, teplotní čidlo by mělo být umístěno v radiačním krytu, aby nedocházelo k ovlivnění přímým slunečním zářením, do výšky 2 m až maximálně 4 m nad zemí. **Příklady instalací sensorových zařízení s ohledem na různé účely měření** (s různým geografickým měřítkem) jsou uvedeny na **Obr. 14**.

V rámci plánování instalace na konkrétní místa ve vybrané lokalitě je rovněž důležité předem zajistit **přístup k místu instalace**, zajistit **elektrické napájení** sensorového zařízení a **datový přenos**. Senzory je vhodné umístit v rámci venkovního prostoru s ohledem na **splnění podmínek pro měření** a zároveň **bezpečně**, aby nedocházelo k poškození či odcizení zařízení. S ohledem na pozdější potřeby vyhodnocování měření je vždy doporučeno **dostatečně zdokumentovat** místo instalace zařízení a jeho okolí jak před začátkem měření, tak v jeho průběhu (viz shrnutí na **Obr. 15**).

Důležitá poznámka: V neposlední řadě je při definici základní otázky a plánování umístění zařízení nutné zvážit načasování samotné měřicí kampaně. Orientační/indikativní měření nízkonákladovými senzory může sloužit pro zachycení efektů nějaké změny v prostředí. Např. monitoring stavu před a po zavedení nějakého opatření, změny ve využívání krajiny, změny průmyslového zatížení. Stejně tak je vhodné postihnout sezónní změny v prostředí (měření v letních i zimních měsících). S ohledem na omezenou provozní životnost senzorů dává větší smysl tato zařízení využívat pro krátkodobé cílené měřicí kampaně (trvání 1 až 2 roky). Pokud je uvažováno o monitoringu delším jak 2 roky, je zapotřebí počítat s dalšími pořizovacími i provozními náklady na periodickou obměnu senzorů v síti.



Obr. 14. Příklad instalací senzorových zařízení s ohledem na různé účely měření: **A)** Monitoring rozdílů mezi venkovským a městským prostředím (měřítko v řádu desítek km), **B)** monitoring vlivu potenciálního zdroje na okolí (měřítko v řádu jednotek kilometrů), **C)** monitoring v mikroměřítku (měřítko v řádu jednotek až stovek metrů). S = senzorové měření, R = referenční nebo jiná ekvivalentní měření (státní síť imisního monitoringu). V každé z uvažovaných situací je doporučeno alespoň 1 senzorové zařízení umístit na referenční stanici v okolí (či jiném typově odpovídajícím prostředí) pro možnost kontroly kvality měření v průběhu měřicí kampaně (srovnávací měření společným umístěním). Upravený zdroj³.



Volba místa instalace zařízení

Zvážit, kde je vhodné s ohledem na cíle měření sensorová zařízení umístit (zohlednění gradientu prostředí, alespoň jedna kontrolní lokalita s referenčním měřením).



Přístup k lokalitě a instalovanému zařízení

Předem si vyjednat podmínky přístupu na danou lokalitu a přístup na místo instalace zařízení (povolení vlastníka, smlouva o umístění zařízení, aj.).



Zajištění elektrického napájení zařízení

Předem si zjistit možnosti a podmínky elektrického napájení na vybrané lokalitě, případně zajistit náhradní zdroj (baterie, solární panel, aj.)



Zajištění datového přenosu

Předem si zjistit možnosti a podmínky pro datové připojení na vybrané lokalitě (kabelové připojení, WiFi, LoRa, GSM, aj.)



Zajištění bezpečnosti

Předem se ujistit, že zařízení bude v místě instalace chráněno proti vandalismu či krádeži. Stejně tak, že instalace zařízení nezpůsobí škody na zdraví a majetku jiných osob v okolí.



Vhodné podmínky umístění zařízení

Senzorové zařízení umísťujeme mimo dosah lidí úrovní terénu nebo střeš (cca 2 m), ideálně do volného prostoru dále od překážek, vzrostlé vegetace či jiných zdrojů emisí, které by ovlivňovali měření.



Dokumentace a informovanost o lokalitě

Vždy je doporučeno pečlivě zaznamenávat poznámky k procesu instalace zařízení a průběhu měření. Zajistit částečný dohled nad lokalitou v průběhu měření (pravidelné návštěvy, fotodokumentace).

Obr. 15. Shrnutí sedmi základních bodů při plánování umístění sensorového zařízení pro monitoring venkovního ovzduší. Upravený zdroj³.

6. Ověření výkonnosti sensorových zařízení

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3, **ověření výkonnosti senzoru je jedním z nejkritičtějších bodů při plánování a zavádění sensorových zařízení** pro monitoring venkovního ovzduší. Bez ověření výkonnosti jednotlivých zařízení před a během jejich použití nemá jejich aplikace relevantní váhu. V praxi to pak často znamená, že i) si nejsme jisti, co měříme a jak moc se dá naměřeným koncentracím důvěřovat, ii) nejsme schopni relevantního porovnávání výsledků měření na různých místech (nevíme, zda je rozdílnost měření dána skutečně rozdílem lokalit nebo pouze různou individuální odchylkou senzorů).

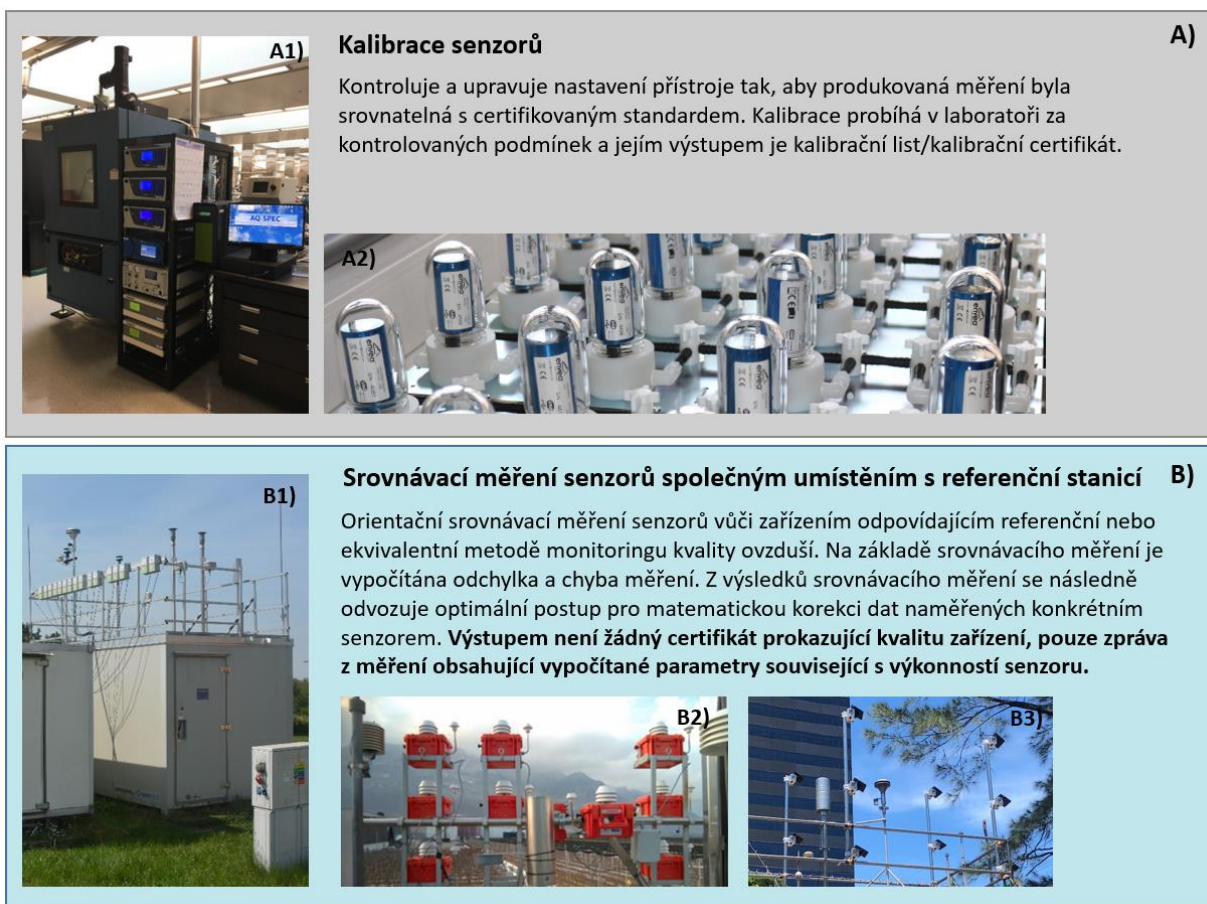
Obecně všechny přístroje pro monitorování kvality ovzduší potřebují pravidelné kontroly, aby se zajistilo, že fungují správně a generují data o známé kvalitě/relevanci. Z tohoto důvodu všechny instituce odpovědné za provoz **přístrojů používaných pro referenční metody monitoringu** úrovně znečištění venkovního ovzduší v daném státě **pravidelně kalibrují** tyto přístroje jejich testováním s certifikovanými a známými koncentračními standardy (etalony). Poté použijí **výsledky kalibrace k úpravě nastavení přístroje** tak, aby odpovídala certifikované nebo známé koncentraci. Tento **proces se pravidelně opakuje** a zaznamenává (kalibrační protokoly), aby byla zajištěna kontrolovaná kvalita měření a **vysoce přesná data**³.

6.1. Doporučené postupy ověřování výkonnosti senzorových zařízení

Přestože **nízkonákladové senzory** pro monitoring venkovního ovzduší necílí na vysoce přesná data o znečištění ovzduší, ale pouze na orientační stanovení či odhady, je rovněž zapotřebí pravidelná kontrola a dohled nad měřením. Na rozdíl od přístrojů používaných pro referenční měření, senzorová zařízení **ve většině případů nelze periodicky kalibrovat** (upravovat jejich nastavení). Kalibraci prokazuje buďto výrobce senzoru, nebo ji lze provést dodatečně u vybrané kalibrační laboratoře, která se senzory zabývá. Tento krok ovšem podstatně navyšuje celkové náklady na provoz těchto zařízení. Daleko častěji se tedy pro kontrolu výkonnosti senzorů aplikuje metoda tzv. **orientačního srovnávacího měření společným umístěním s přístrojem používaným pro referenční nebo ekvivalentní měření ve venkovních podmínkách** (tj. umístěním na odpovídající referenční stanici). Během tohoto měření se doporučuje společné umístění všech senzorových jednotek do bezprostřední blízkosti kontrolního zařízení. **Výsledky měření se následně vzájemně porovnají**, čímž lze získat informaci o tom, jak se liší měření daného senzoru od měření referenční metodou (přesnost měření), jak se liší měření různých kusů senzorů stejného typu mezi sebou navzájem (preciznost měření) a jaká je individuální odchylka měření senzorů. Postup pro přípravu dat a výpočty parametrů, které jsou výstupem srovnávacího měření, jsou uvedeny v **Příloze A3**. Výsledky srovnávacího měření pak **umožňují vypočítat tzv. korekční rovnice/algoritmy**, které jsou aplikovány pro **matematickou opravu původních dat ze senzorů** (viz shrnutí na **Obr. 16**).

Důležitá poznámka 1: Pokud existuje od výrobce senzoru nebo z vlastní iniciativy dodatečně zajištěný kalibrační list (kalibrační certifikát) k zařízení, je vysoce doporučeno před použitím senzorů vždy provést také orientační srovnávací měření všech zařízení společným umístěním s referenčním měřením ve venkovních podmínkách. Jak je známo, výkonnost zařízení se může v rychle proměnlivých venkovních podmínkách výrazně lišit od výkonnosti stanovené v kontrolovaných laboratorních podmínkách. Zároveň je doporučeno prověřit každý senzor vstupující do měření, jelikož se i jednotlivé kusy senzorových zařízení podobného typu mohou ve svém měření vzájemně lišit.

Důležitá poznámka 2: Přestože norma ČSN P CEN/TS 17660-1 pro měření vybraných plyných látek senzorovými systémy¹² není dosud kodifikovaná, je zásadní aby odpovědné kalibrační laboratoře zabývající se kalibracemi senzorových systémů dodržovaly zásady a pravidla stanovená touto normou.



Obr. 16. Postupy pro ověřování kvality měření senzorových zařízení. **A)** Kalibrace senzorů v laboratoři v kontrolovaných podmínkách, **A1)** příklad laboratoře AQ-SPEC zabývající se kalibrací senzorů¹⁶, **A2)** příklad kalibrace senzorů pro plynné sloučeniny ve firmě Envea¹⁷. **B)** Orientační srovnávací měření senzorů společným umístěním s referenčními či ekvivalentními metodami měření ve venkovních podmínkách, **B1)** příklad srovnávacího měření senzorů na stanici imisního monitoringu ČHMÚ, **B2)** a **B3)** příklady srovnávacího měření senzorů na stanicích imisního monitoringu US EPA^{18,19}.

6.2. Jak zajistit orientační srovnávací měření senzorů s referenční metodou měření?

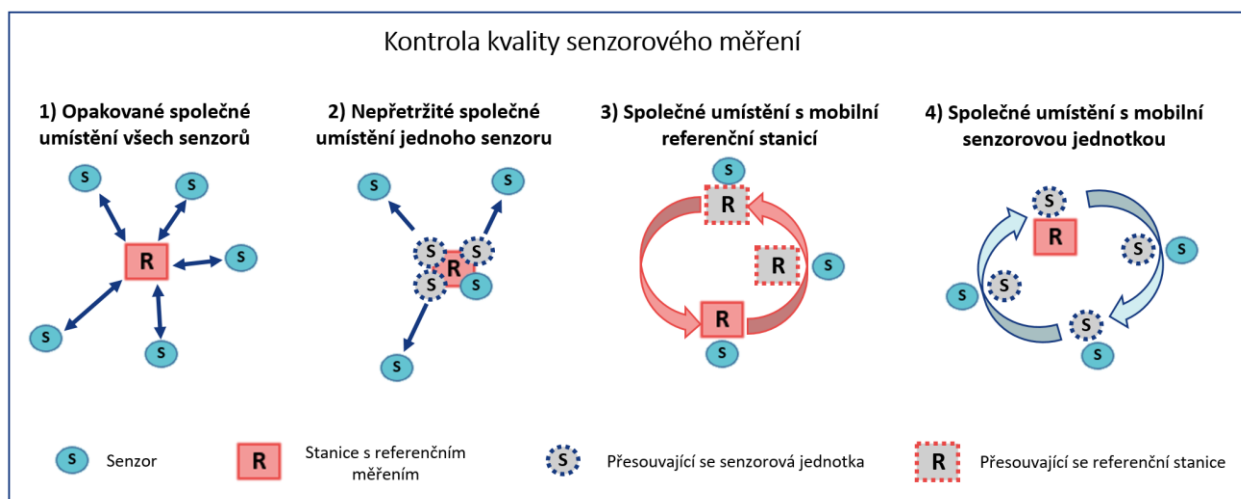
Srovnávací měření společným umístěním se zařízeními používanými pro **referenční či ekvivalentní metody měření** (*reference/equivalent measurement method*) lze zajistit po domluvě s organizacemi odpovědnými za referenční měření v rámci Státní sítě imisního monitoringu (v České republice je to ČHMÚ), popřípadě jinými odbornými subjekty autorizovanými a akreditovanými pro měření kvality ovzduší¹⁹. V souvislosti s dodržováním kontroly kvality měření **je nezbytné srovnávací měření provádět vždy před začátkem samotné měřicí kampaně** a dále je **doporučeno** ho provádět **opakovaně i v průběhu měřicí kampaně** (zachycení změny výkonnosti senzorů s postupem času) a na konci měřicí kampaně. **Konečné srovnávací měření** pak může nahrazovat srovnání v průběhu měřicí kampaně, pokud technické a jiné podmínky projektu (např. finanční či časové) dřívější kontrolní srovnání neumožňovaly.

Důležitá poznámka 1: Na rozdíl od kalibrace přístrojů v kalibrační laboratoři není v případě orientačního srovnávacího měření společným umístěním s referenčním měřením výstupem žádný certifikát o ověření výkonnosti senzoru²⁰. Výstupem srovnávacího měření je většinou zpráva s vypočtenými parametry měření, se kterými je zapotřebí dále pracovat při samotném zpracování a interpretaci naměřených dat. Nejedná se tedy o metodu jakkoliv garantující kvalitu měření senzorů po provedení srovnávacího měření.

Důležitá poznámka 2: Podmínky pro srovnávací měření stanovené ČHMÚ a objednávka orientačního srovnávacího měření jsou dostupné na webových stránkách²¹. Pokud zařízení splňují svými technickými parametry a metodou měření legislativou definované podmínky pro měření kvality ovzduší, měla by být provedena mezilaboratorní porovnávací zkouška s využitím laboratoří akreditovaných dle ČSN EN ISO/IEC 17025 (Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří) a vyhodnocena organizátorem akreditovaným²² dle ČSN EN ISO/IEC 17043 (Posuzování shody – Obecné požadavky na kompetenci poskytovatelů zkoušení způsobilosti).

6.3. Doporučené podmínky pro srovnávací měření

Srovnávací měření by mělo probíhat ideálně tak dlouho, aby reprezentativně postihlo reálné venkovní podmínky, které mohou nastat na cílové lokalitě měření. S ohledem na omezenou životnost nízkonákladových senzorů je zapotřebí volit dobu srovnávacího měření tak, aby zásadním způsobem nezkrátila samotnou měřicí kampaň. **Obecně je ve střeoevropských podmínkách doporučeno srovnávací měření provádět po dobu minimálně 40 dní^{2,3}.** Ideálně v době, kdy dochází k výkyvům počasí (přechodová období). Pokud tak nelze učinit a srovnávací měření je realizováno například pouze v letních dnech, doporučuje se s přechodem sezóny srovnávací měření v průběhu kampaně opakovat. Pokud není technicky (či z jiného praktického důvodu) možné v průběhu měření opakovaně přesunout všechny senzorové jednotky na kontrolní lokalitu s referenčním měřením, je možné přistoupit k alternativním scénářům kontroly, které jsou uvedeny na **Obr. 17** a dále jsou popsány níže.



Obr. 17. Různé scénáře pro kontrolu kvality sensorového měření v průběhu měřicí kampaně. Upravený zdroj.

6.3.1. Opakované společné umístění všech senzorových jednotek

Během toho scénáře jsou všechny senzorové jednotky po vymezenou dobu společně umístěny na referenční stanici imisního monitoringu, a to před měřicí kampaní, opětovně během ní, případně na konci měřicí kampaně. Výhodou tohoto scénáře je, že jsou všechny senzorové jednotky srovnávány ve stejném čase a vůči stejnému zařízení. Určitým rizikem může být fakt, že jednotlivé senzory nejsou testovány na cílové lokalitě svého umístění, a tudíž se jejich výkonnost může po přenosu jinak změnit. Nevýhodou je rovněž složitá logistika s demontáží všech senzorů a jejich přesuny, pokud se jedná o početnou senzorovou síť^{1-3,21}.

6.3.2. Nepřetržité společné umístění alespoň jednoho senzoru

Po úvodním srovnávacím měření všech senzorových jednotek na jednom zařízení pro referenční monitoring je jeden vybraný senzor (nebo více senzorů) společně umístěn/y trvale s referenční stanicí, zatímco ostatní se přesunou na cílové lokality měření v okolí. Kvalita měření jednotlivých senzorů se pak v průběhu měřicí kampaně odhaduje podle tohoto jednoho vybraného (nebo více vybraných) senzoru/ů. Rizikem je v tomto případě nezhodnost změny v individuálních odchylkách senzorů (předpokládáme, že se všechny jednotky chovají stejně). Výhodou tohoto scénáře je, že není logisticky tak složitý (nevyžaduje opakované přesuny všech senzorových jednotek^{1-3,21}).

6.3.3. Společné umístění s mobilní referenční stanicí

Prizpůsobená referenční stanice (např. mobilní referenční stanice v podobě měřicího vozu) se periodicky přesouvá a je po vymezenou dobu společně umístěna s jednotlivými senzory v místě jejich cílového měření. Výhodou tohoto scénáře je, že jsou senzory testovány přímo v místě zájmu. Nevýhodou je logistika spojená s přesuny referenční stanice a také to, že touto metodou nelze porovnat všechny senzorové jednotky ve stejnou dobu^{1-3,21}.

6.3.4. Společné umístění s mobilní senzorovou jednotkou

Jeden vybraný senzor (tzv. „zlatý vzorek“), který byl nejdelší dobu společně umístěn s nejbližší referenční stanicí a je nejlépe známa jeho kvalita měření, se postupně přesouvá a je po vymezenou dobu společně umístěn s ostatními senzory umístěnými na cílových lokalitách. Nevýhodou je opět logistika spojená s potřebou přesunu senzoru na různé lokality, stejně jako různé načasování srovnávacího měření u jednotlivých senzorů. Výhodou pak je, že jsou senzory testovány přímo v místě jejich cílové měřicí lokality^{1-3,21}.

Důležitá poznámka 1: Pro opakované průběžné či konečné srovnávací měření společným umístěním s referenční stanicí nejsou definována žádná jednotná doporučení co do doby jejich trvání. Dle dosavadních zkušeností s provozem senzorových zařízení by průběžné srovnávací měření mělo trvat alespoň po dobu 2 dnů a konečné srovnávací měření minimálně po dobu 14ti dní. Stejně tak není definováno jednotné doporučení, jak často se mají průběžné kontrolní srovnávací měření opakovat. Individuální potřeby se odvíjí dle podmínek a možností měřicí kampaně (vypozorovaná proměnlivost kvality měření jednotlivých senzorů v průběhu měření, limitovaná délka měřicí kampaně, technická omezení pro vytváření podmínek na lokalitách aj.) a často vyžadují posouzení zkušené osoby znalé v oboru měření kvality ovzduší.

Důležitá poznámka 2: S ohledem na možnost komplexnějšího posouzení změn v kvalitě sensorového měření v průběhu času je rovněž doporučeno mít k dispozici měření alespoň základních meteorologických prvků (tj. teplota a relativní vlhkost vzduchu).

6.4. Co když referenční metoda měření není k dispozici?

Pokud není možnost (z technických, finančních či jiných důvodů) navázat spolupráci s některým z odborných partnerů pro zajištění srovnávacího měření s odpovídajícími přístroji používanými pro referenční či ekvivalentní měření, je **vhodné uvažovat alespoň o srovnávacím měření všech sensorových jednotek na jedné vybrané venkovní lokalitě** (bez přítomnosti referenčního měření). Cílem tohoto vzájemného porovnání je **identifikovat odchylky v rámci sensorových jednotek**, popřípadě **sjednotit jejich měřené koncentrace podle jednoho vybraného senzoru** (aplikací vhodné matematické korekce). Tímto krokem sice nedosáhneme ověření věrohodnosti daného sensorového měření, nicméně **umožní to alespoň relevantní porovnání výstupů ze senzorů v rámci dané instalované sensorové sítě³** (tzv. *diferenční měření* neboli *differential measurement*).

7. Metody kontroly sensorových dat a jejich matematických korekcí

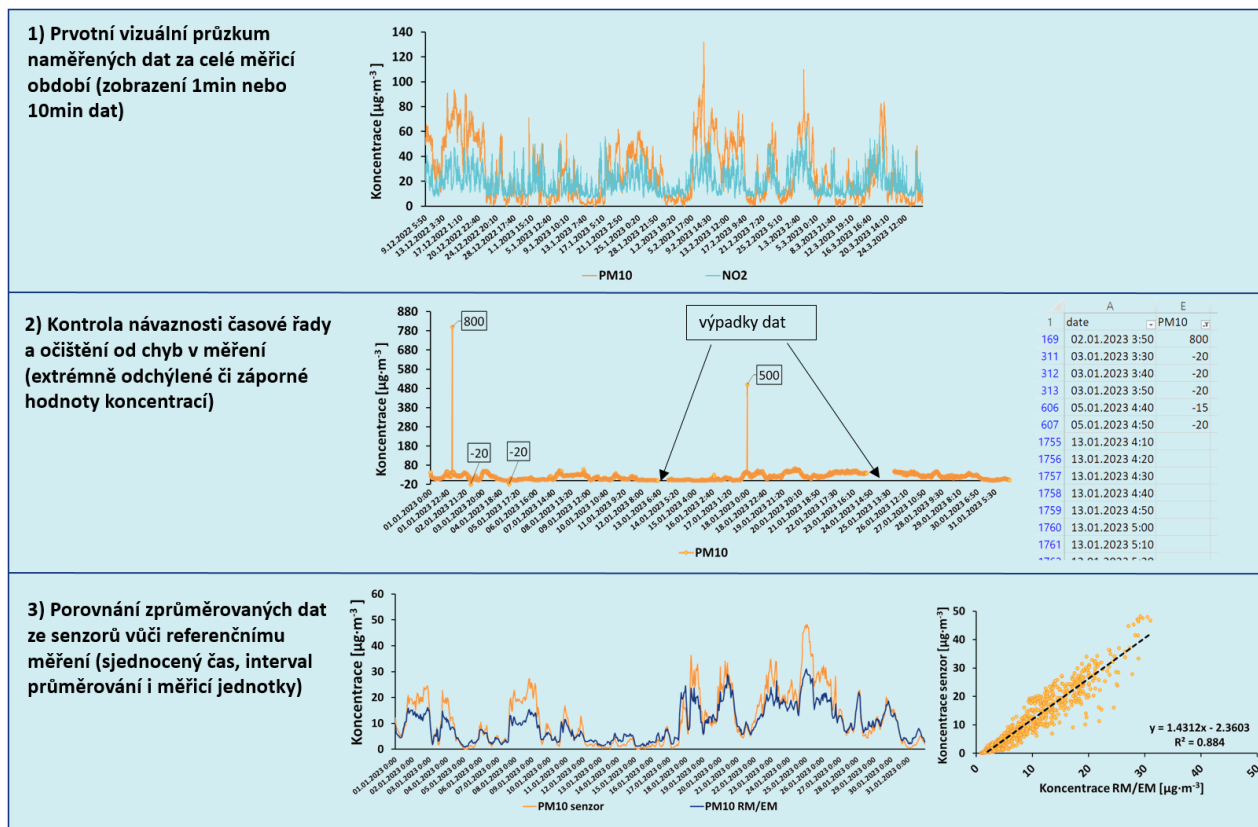
Hlavním cílem srovnávacího měření senzorů vůči referenčnímu měření ve venkovních podmínkách je **orientační stanovení přesnosti a odchylek v měření, včetně zvolení vhodné metody matematické korekce sensorových dat** tak, aby se naměřené koncentrace hodnotově i trendově více shodovaly s koncentracemi naměřenými referenčními přístroji. Tento proces nemá za cíl udělat z orientačního sensorového zařízení přesnější přístroj splňující požadavky na referenční metody měření (což v současné době není ani technicky, ani legislativně možné), ale **stanovit odhad známé relevance dat** tak, aby sensorové měření bylo alespoň přibližně (s větší nebo menší nejistotou/odchylkou) porovnatelné s ostatními měřeními běžně používanými v síti. Obecně vzato jen tak dokážeme informace ze sensorového měření efektivně vytěžit a použít pro nejčastěji definované účely.

V závislosti na složitosti zvoleného opravného procesu matematické korekce je možné zohlednit jak známá zkreslení dat (např. měřicí odchylka), tak i neznámé interference způsobené počasím či jinými znečišťujícími látkami ovlivňujícími měření. **Algoritmy pro korekci dat jsou různé – od jednoduchých** (např. lineární regrese) **po velmi složité** (komplexní modely na bázi strojového učení zahrnující různé množství parametrů). Tato kapitola shrnuje **nejčastější postupy kontroly a korekce sensorových dat**.

7.1. Kontrola dat ze sensorového měření

Kontrola dat zahrnuje celou řadu procesů. Nejprve je vhodné provést **prvotní průzkum dat** ze senzorů **grafickým zobrazením časových řad naměřených koncentrací**. Následně je podstatné v tabulkové formě **zkontrolovat návaznost časové řady, očistit data od výpadků, případně jiných chyb v měření** („záporné“ hodnoty koncentrací, ojedinělé extrémně odlehlé hodnoty) a provést **průměrování** původně naměřených dat **v požadovaném intervalu** (nejčastěji 1hodinové průměry), aby byla porovnatelná s daty z kontrolního/referenčního měření (viz souhrn na **Obr. 18**).

Důležitá poznámka: Příprava dat je nezbytnou součástí procesu jejich kontroly a zajištění správnosti jejich celkového hodnocení. Kompletní doporučení k přípravě sensorových dat pro zpracování (tj. kontrola nastavení zařízení, sjednocení datových formátů, očištění dat a jejich průměrování, faktory pro převod jednotek jednotlivých znečišťujících látek) jsou detailně popsána v **Příloze A3**.



Obr. 18. Základní kroky v postupu kontroly dat. **1)** Prvotní průzkum původně naměřených sensorových dat; **2)** Kontrola návaznosti dat a očištění od chyb pro možnost zprůměrování dat; **3)** Kontrola zprůměrovaných sensorových dat vůči datům z referenčního či ekvivalentního měření.

7.2. Jednoduchá lineární regrese (metoda nejmenších čtverců) pro hodnocení výkonu sensorového měření

Kontrola sensorových dat vůči referenčnímu měření nejčastěji probíhá formou **vytvoření bodového grafu**, kdy **hodnoty naměřené senzorem jsou vyneseny na ose y** (jakožto závislá/vysvětlovaná proměnná) a **hodnoty naměřené referenčním nebo ekvivalentním přístrojem na ose x** (jakožto nezávislá/vysvětlující proměnná). Díky tomuto vykreslení následně lze **regresní analýzou (metodou nejmenších čtverců) spočítat parametry regresní rovnice** (regresní přímka nejlépe odpovídající proložení jednotlivých měřicích bodů) včetně **koeficientu determinace (R^2)**. Příklady regresních analýz dat z různých sensorů na měření PM_{10} jsou uvedeny na **Obr. 19**. Po vynesení bodového grafu je důležité sledovat rozptyl měřicích bodů a jejich linearitu. V ideálním případě, tedy pokud by měření senzorem perfektně odpovídalo referenčnímu měření, by všechny měřicí body ležely podél regresní přímky ve

sklonu 1:1 (viz očekávané hodnoty a jejich lineární proložení na **Obr. 19**). Pokud vztah mezi naměřenými hodnotami ze senzorů a z referenčního měření následuje alespoň přibližně lineární trend, jsou **body proloženy odpovídající lineární regresní přímkou** (dána rovnicí $y = b_0 + b_1 \cdot x$). Nejdůležitějšími parametry regresní rovnice pak jsou **směrnice** (b_1 ; *slope*) a **průsečík** (b_0 ; *intercept*). Průsečík s osou y značí, zda měření senzoru nadhodnocuje či podhodnocuje v nízkých koncentracích (rozhoduje znaménko u hodnoty průsečíku). Stejně tak jako směrnice přímkou, která je buďto menší než 1 (senzor ve vyšších koncentracích spíše podhodnocuje), nebo větší než 1 (senzor ve vyšších koncentracích spíše nadhodnocuje³).

Dalším důležitým parametrem vycházejícím z regresní analýzy je **koeficient determinace** (R^2 ; *coefficient of determination*), který číselně vyjadřuje, jaký podíl variability závislé proměnné regresní model vysvětluje. Tento parametr nabývá hodnot $<-1;1>$ s tím, že u senzorů je zpravidla hodnota $R^2 > 0,50$ považována za svým způsobem akceptovatelnou pro další zpracování (matematická korekce dat) a **hodnota $> 0,70$ už značí poměrně dobré výsledky** (tj. regresní model vysvětluje více jak 50 % nebo 70 % variability sensorového měření). Naopak **hodnoty $R^2 < 0,50$ značí v případě sensorového měření nevyhovující výsledky** (špatný senzor/vadný kus).

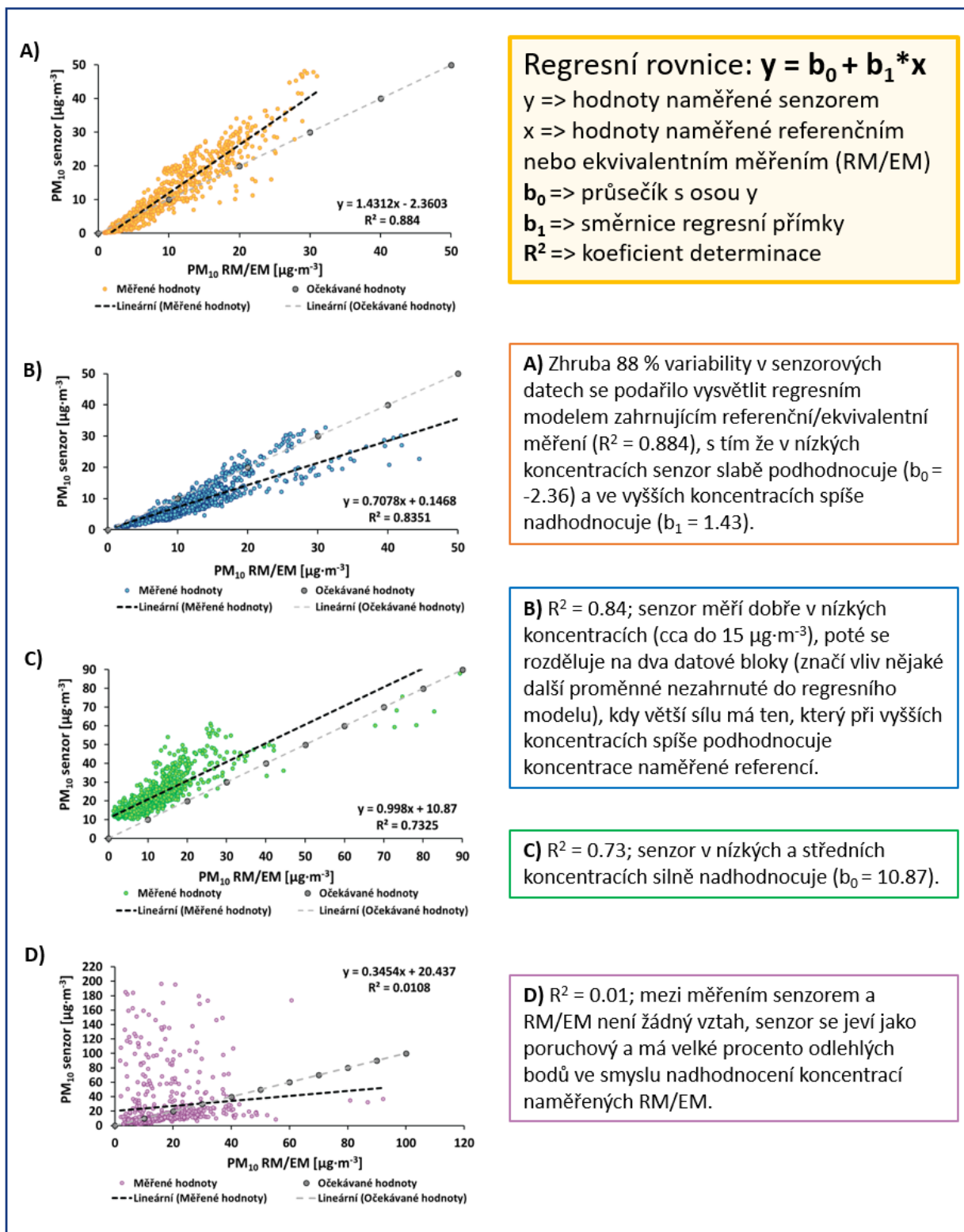
Je rovněž důležité zmínit, že **regresní analýza je poměrně citlivá na přítomnost extrémně odlehlých bodů** (tzv. outlierů), kdy tyto byt' ojedinělé body mohou způsobit, že tzv. „táhnou“ vypočtenou regresní linii do extrémních poloh, což má za následek i snížení parametru R^2 . **Příprava a přečištění dat** od těchto ojedinělých odlehlých bodů tedy **může podstatně zlepšit výsledky regresní analýzy**. Pokud se ovšem v datovém souboru nevyskytují žádné extrémně odlehlé hodnoty (spíše se větší část bodů vyskytuje mimo rozhraní kontrolního referenčního měření) a hodnota R^2 je méně než 0,50, je zde velmi nízká pravděpodobnost, že nalezneme vhodnou metodu korekce, která tento vztahlepší (vadný senzor).

Pokud vztah mezi daty naměřenými senzorem a referenční metodou není lineární a **vykazuje určitá zakřivení či dokonce rozdělení na různé datové bloky**, bude zapotřebí pro korekci dat **využít složitější regresní metody**, které jsou popsány dále v kapitole 7.4.

V případě **posuzování** kvality sensorového měření **se nikdy nestačí zaměřit pouze na jeden vybraný parametr**, např. nejčastěji pouze na hodnotu parametru R^2 , protože neodráží kompletní obraz o výkonnosti senzorů (pouze z hodnoty R^2 nepoznáme, jestli senzor podhodnocuje či nadhodnocuje nebo kolik se v datovém souboru nachází odlehlých měřicích bodů). Příklady interpretace kompletních výsledků lineární regrese u různých senzorů na měření koncentrací PM_{10} jsou uvedeny v **Obr. 19**.

Důležitá poznámka 1: Výpočet parametrů lineární regrese včetně grafického zobrazení závislosti mezi proměnnými je dnes již součástí mnoha softwarových nástrojů pro datové zpracování. Mezi nejčastěji používané patří Microsoft Excel, R software, Python nebo placené programy Statistica, SPSS aj.

Důležitá poznámka 2: V **Příloze A3** je uveden příklad výpočtu parametrů regresní analýzy (směrnice a průsečíku rovnice) včetně koeficientu determinace a směrodatné (střední) chyby odhadu na zkrácené datové sadě ze srovnávacího měření senzorů NO_2 s referenčním zařízením.



Obr. 19. Příklady výstupů regresní analýzy u tří různých sensorů na měření koncentrací PM_{10} (včetně interpretace výstupních parametrů z lineární regrese).

7.3. Další parametry popisující výkonnost senzorového zařízení

Dalšími doporučenými parametry, které mohou posloužit při posuzování kvality měření senzorů, jsou: **nejistota mezi senzorovými systémy a různé typy výpočtů reziduální chyby regresního modelu.**

Nejistota mezi senzorovými systémy vyjadřuje číselně míru nejistoty mezi naměřenými hodnotami různých senzorových zařízení testovaných ve stejném čase na stejném místě (vyjádřená v jednotkách, v jakých je měřena daná znečišťující látka). Mezipřístrojovou nejistotu definuje stávající norma pro plynné senzory a lze vypočítat dle rovnice [1] a její výsledky porovnat s tabulkou kritérií definovanou v ČSN P CEN/TS 17660-1 z roku 2022:

$$u(bs, s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_s} (y_{i,j} - \bar{y}_i)^2}{n*(n_s - 1)}} \quad [1]$$

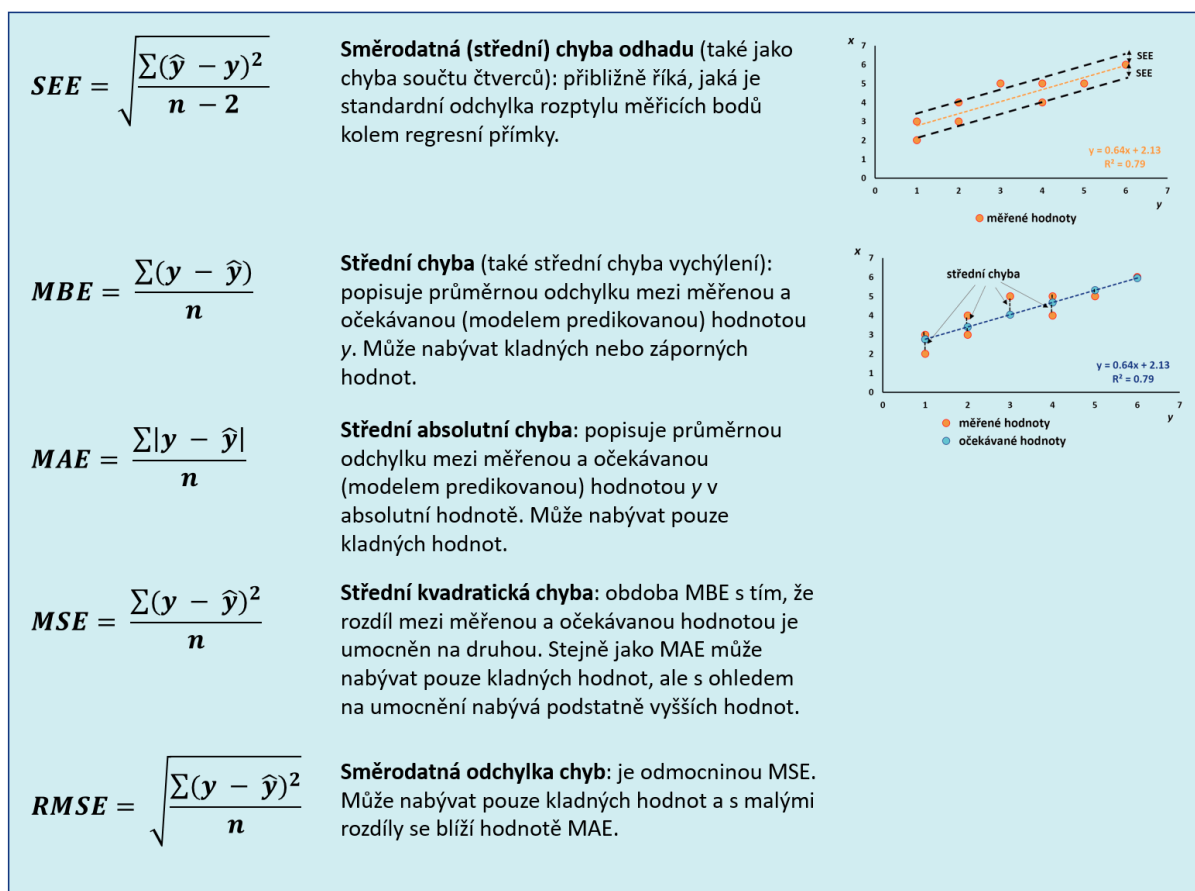
kde je

$y_{i,j}$	měřená hodnota senzorového systému pro i -té období a j -tý senzorový systém;
\bar{y}_i	průměr měřených hodnot pro i -tou periodu z n_s replikovaných senzorových systémů;
n	počet měření (počet naměřených hodnot jednotlivými systémy);
n_s	počet měření (počet testovaných senzorových systémů) ¹² .

Výpočet **reziduální chyby regresního modelu** (tj. rozdíl mezi hodnotami naměřenými senzory a mezi očekávanými hodnotami vypočítanými dle rovnice lineární regrese) má několik variant. V souvislosti se senzorovými systémy se nejčastěji používají tyto: **směrodatná chyba odhadu regresního modelu (SEE; standard error of estimate)**, **střední chyba měření (MBE; mean bias error)**, **střední absolutní chyba měření (MAE; mean absolute error)** a tzv. **směrodatná odchylka chyb měření (RMSE; root mean squared error)**. Výpočetní vzorce a popisy těchto chyb jsou uvedeny na **Obr. 20**.

Důležitá poznámka 1: Pro výpočet zmíněných parametrů je opět možné využít různé programové nástroje (Microsoft Excel, R software, Python, Statistica, SPSS aj.)

Důležitá poznámka 2: V Příloze A3 je uveden příklad výpočtu parametrů chyby měření na zkrácené datové sadě ze srovnávacího měření senzorů NO₂ vůči referenčnímu měření.



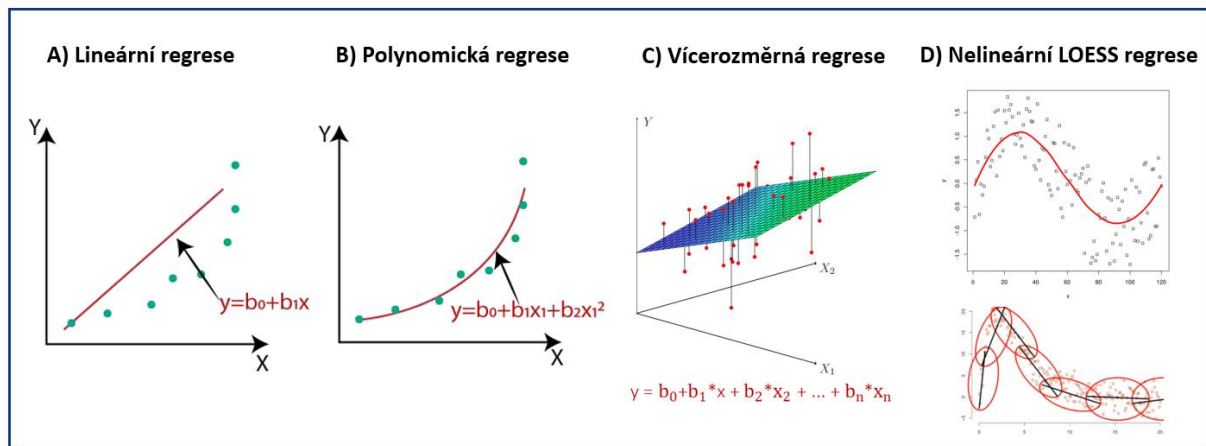
Obr. 20. Nejčastěji používané výpočty pro stanovení chyb reziduálního modelu při posuzování senzorového měření. Zdroj ČHMÚ.

7.4. Pokročilejší metody regresních analýz pro popis variability v senzorových datech

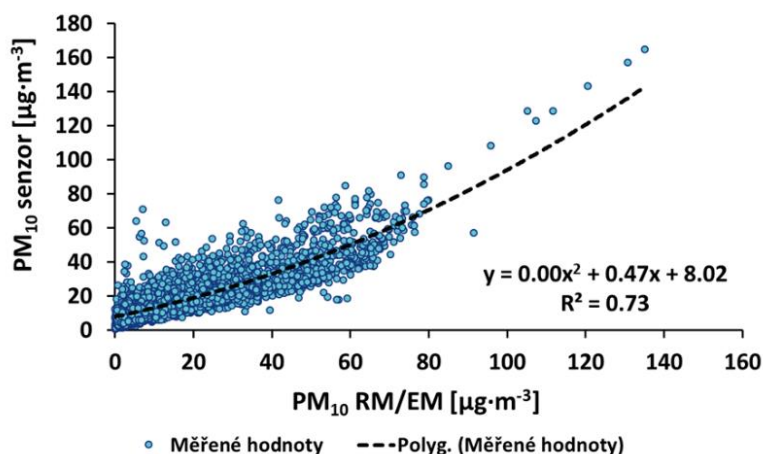
Při porovnávání senzorových dat s daty z referenčního nebo ekvivalentního měření mohou nastat i případy, kdy vztah nebude odpovídat jednoduchému lineárnímu trendu, a tudíž **pro vysvětlení vztahu mezi daty a následné odvození korekčního algoritmu** bude zapotřebí použít **složitější matematickou funkci**, jako je např. **polynomická regrese** (s polynomem druhého nebo třetího stupně vysvětlující proměnné x), **vícerozměrná regrese** (se zahrnutím dalších vysvětlujících proměnných – např. teploty (x_2), relativní vlhkosti (x_3) aj.) nebo **nelineární metoda lokální polynomiální regrese** (tzv. LOESS; *locally estimated scatterplot smoothing*), která proloží datovou sadu parciálními lineárními funkcemi (tj. „*locally estimated*“), které následně vyhledá do křivky („*smoothing*“). Příklady všech popisovaných regresních funkcí jsou uvedeny v **Obr. 21**.

Častým důvodem, proč nemusí vyhovovat model jednoduché lineární regrese pro vysvětlení celkové variability v senzorových datech, je například to, že **senzor nemusí reagovat stejně v celém svém měřicím rozsahu**. V takovém případě může docházet k tomu, že senzorové měření ukazuje lineární odezvu vzhledem k referenčnímu měření při nižších koncentracích a nelineární odezvu při vyšších koncentracích³ (viz příklad na **Obr. 22**). Stejně tak může být důvodem nezahrnutí důležitých

vysvětlujících proměnných, které kvalitu měření prokazatelně ovlivňují (zmiňovaná teplota, vlhkost, stáří senzoru aj.). Často to může být kombinace více faktorů.



Obr. 21. Příklady používaných regresních funkcí při zpracovávání sensorových dat. **A)** Jednoduchá lineární regrese zahrnující pouze data ze sensorového měření (na ose y) a data z referenčního měření (na ose x; použitý zdroj²²). **B)** Polynomická regrese umožňující zahrnutí polynomu různého stupně u vysvětlující proměnné (referenční měření na ose x; použitý zdroj²²). **C)** Vícerozměrná regrese umožňující zahrnutí dalších vysvětlujících proměnných (např. teplotu na ose x_2 nebo i relativní vlhkost na ose x_3 ; použitý zdroj²³). **D)** nelineární LOESS regrese založená na místně odhadovaném vyhlazování rozptylu dat (použitý zdroj^{24,25}).



Obr. 22. Příklad polynomické regrese u senzoru na měření koncentrací PM_{10} . Z výsledků je patrné, že při nižších koncentracích cca do $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ senzor (osa y) měří ve srovnání s ekvivalentním měřením (osa x) přibližně lineárně, zatímco vyšší koncentrace už měří s větším posunem do nadhodnocování reálných koncentrací. Zdroj ČHMÚ.

7.5. Nejčastěji používané metody matematické korekce senzorových dat

Jak již bylo vysvětleno, **srovnávací měření senzorů společným umístěním s referenčním nebo ekvivalentním měřením ve venkovních sloužích** nejen pro orientační kontrolu kvality měření a zjištění odchylek, ale také **pro možnost stanovení korekčního algoritmu** pro původně naměřená senzorová data, tedy pro jejich **verifikaci** (viz vysvětlení pojmů validace a verifikace ve slovníku pojmů v **Příloze A1**).

S ohledem na vysoké procento individuální chyby jednotlivých senzorů (velká míra mezipřístrojové variability v datech) **je doporučeno stanovit korekční algoritmus individuálně pro každý senzor zvlášť**, nikoliv jeden pro několik kusů zařízení (pokud to podmínky dovolí).

Nejjednodušší matematický model pro korekci senzorových dat je využití **rovnice lineární regrese**, pokud data tomuto vztahu přibližně odpovídají. V takovém případě jsou **opravená/korigovaná měření senzoru získána** přeskupením „nejlépe vyhovující“ lineární rovnice (tj. $y = b_0 + b_1 \cdot x$), kde za požadované opravené/korigované měření senzoru ($y_{korekce}$) prakticky považujeme hodnoty z referenčního měření (x)³. Korekce senzorových dat se tedy vypočítá **dle následující rovnice** [2]:

$$y_{korekce} = \frac{y_{měřené} - b_0}{b_1} \quad [2]$$

kde je

$y_{korekce}$	opravená/korigovaná hodnota senzorového měření
$y_{měřené}$	původní hodnota ze senzorového měření
b_0	hodnota průsečíku původní rovnice regresní přímky
b_1	hodnota směrnice původní rovnice regresní přímky

Příklad využití rovnice lineární regresní přímky pro korekci senzorových dat včetně výpočtu je uveden na **Obr. 23**.

Při hledání **složitějších (komplexnějších) korekčních matematických algoritmů**, jako jsou polynomičké nebo vícerozměrné lineární i nelineární regrese (např. statistické metody GAM, MARS), včetně možnosti zahrnutí postupů strojového učení (modely *random forest*, *regression trees* nebo neuronové sítě), **je zapotřebí použít odpovídající statistický software** (např. R, Python, Statistica aj.), který tuto korekci vypočítá.

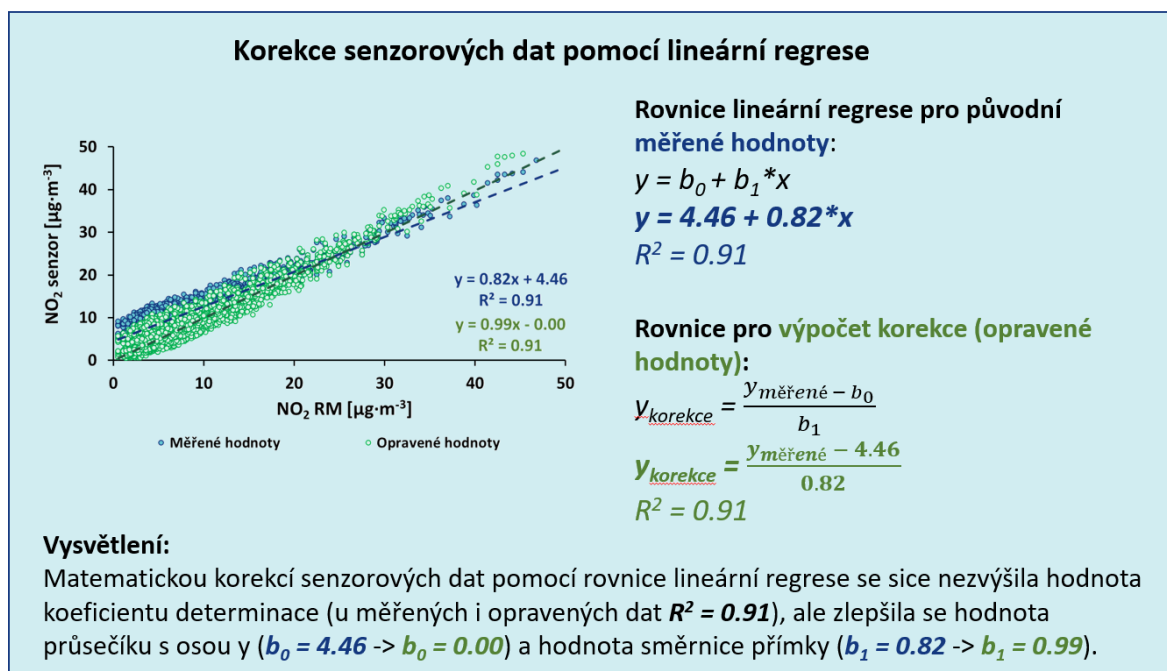
Cílem složitějších korekčních algoritmů pro senzorová měření je podchytit maximum variability v datech včetně nenáhodných chyb tak, aby se dané senzorové měření, pokud možno, co nejvíce přiblížilo referenčnímu měření. V této souvislosti je důležité zmínit, že **pochopení korekčního algoritmu je nezbytné pro zajištění kontrolovatelnosti a reprodukce postupu od originálních (nezpracovaných) po opravená (korigovaná) data a pro pochopení procesů, které ovlivňují kvalitu měření senzorů**. Velmi složité algoritmy typu „černých skříněk“ (tzv. *black box*; tj. postup, kdy dojdeme k uspokojivému výsledku, ale nevíme jakým způsobem), mohou mít slibné výsledky, nicméně častěji **jsou preferovány raději o něco jednodušší, nicméně popsitelné a dobře pochopitelné modely korekce**^{1-3,21}.

Různé metody korekce dat jsou natolik kvalitní, nakolik mají kvalitní datové vstupy. S ohledem na to, že data ze senzorového měření jsou často zatěžována systémovými i náhodnými chybami, je **zapotřebí**

zajistit vstupy o velkém množství dat (ideálně několik měsíců pro pokrytí případných změn v podmínkách během roku). **U žádné metody matematické korekce dat** (ať už jednoduché, nebo složitější) **nelze zaručit, že bude fungovat během celého měření se stejnou výkonností**. Z tohoto důvodu se doporučují **provádět opakované kontroly** vůči referenčnímu měření, **a to včetně kontroly funkčnosti použitých korekčních algoritmů** i během měřicí kampaně nebo po ní (viz kapitola 6).

Důležitá poznámka 1: Někteří výrobci senzorů již implementují vlastní korekční algoritmy do zpracovatelských jednotek senzorů. Pokud se tak děje, je dobré se u výrobce vždy informovat, o jakou korekci se jedná.

Důležitá poznámka 2: Před korekcí sensorových dat i po ní je vždy doporučeno vizualizovat a porovnat také samotné časové řady koncentrací u senzorů i referenčních zařízení (průběh měření koncentrací v čase), a to z toho důvodu, že mohou být přítomny ojedinělé situace v podobě špiček koncentrací, které mohou být z pohledu sensorového měření ojedinělé a mohou různou mírou ovlivňovat výsledky měření včetně úspěšnosti korekce. Posouzení úspěšnosti nasazené matematické korekce sensorových dat je vždy na odborně znalé osobě zodpovědné za správu a verifikaci dat ze sensorového měření.



Obr. 23. Příklad výpočtu matematické korekce sensorových dat pomocí rovnice lineární regrese.

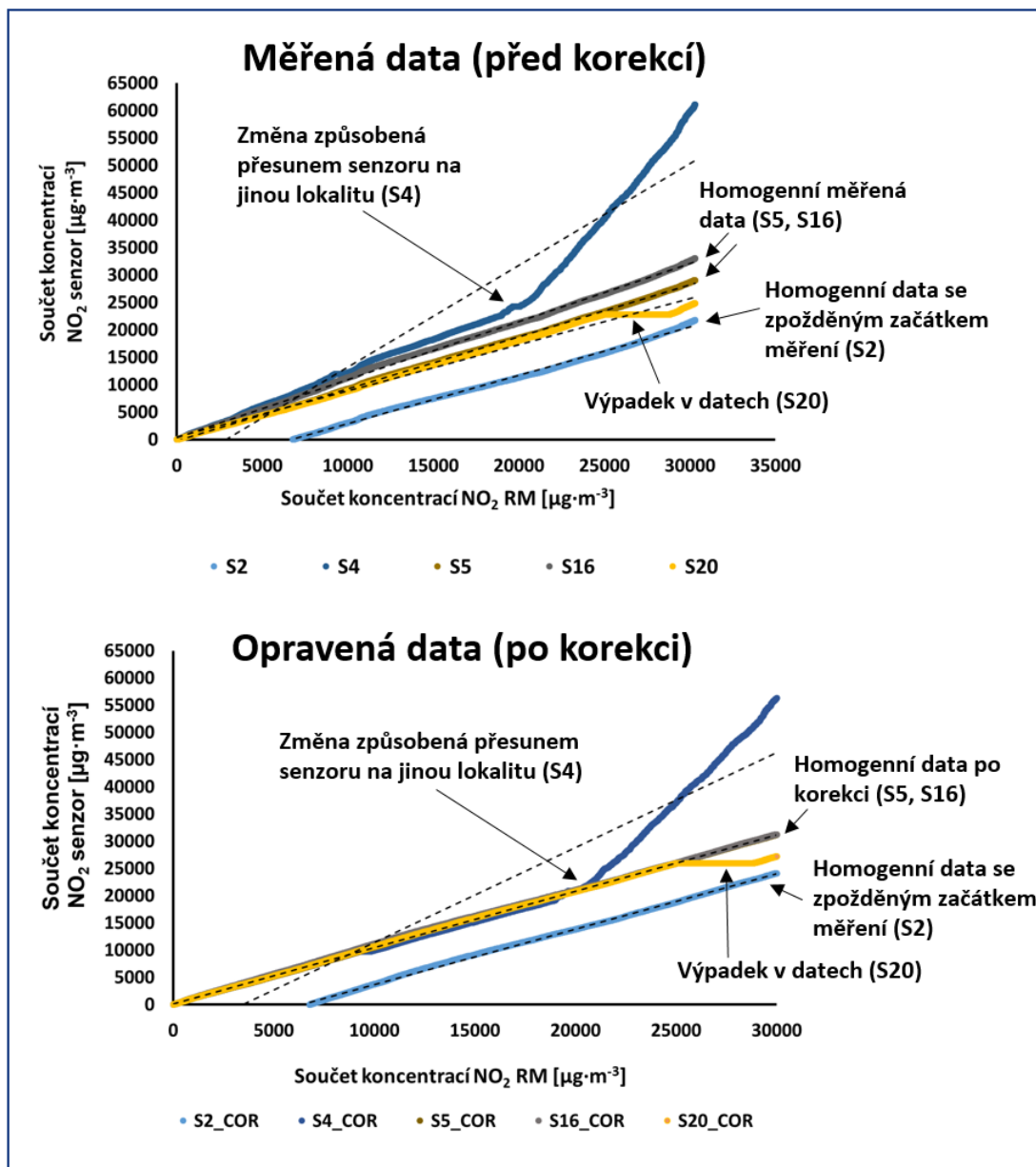
7.6. Kontrola změn výkonnosti senzorových zařízení a datových posunů

Změna výkonnosti senzorových zařízení v čase nebo po přesunu na jinou lokalitu není nic ojedinělého. Z toho důvodu je zapotřebí mít stanovený vhodný plán na průběžnou kontrolu kvality měření senzoru a výkonnosti nastavených matematických korekcí dat i v průběhu dané měřicí kampaně.

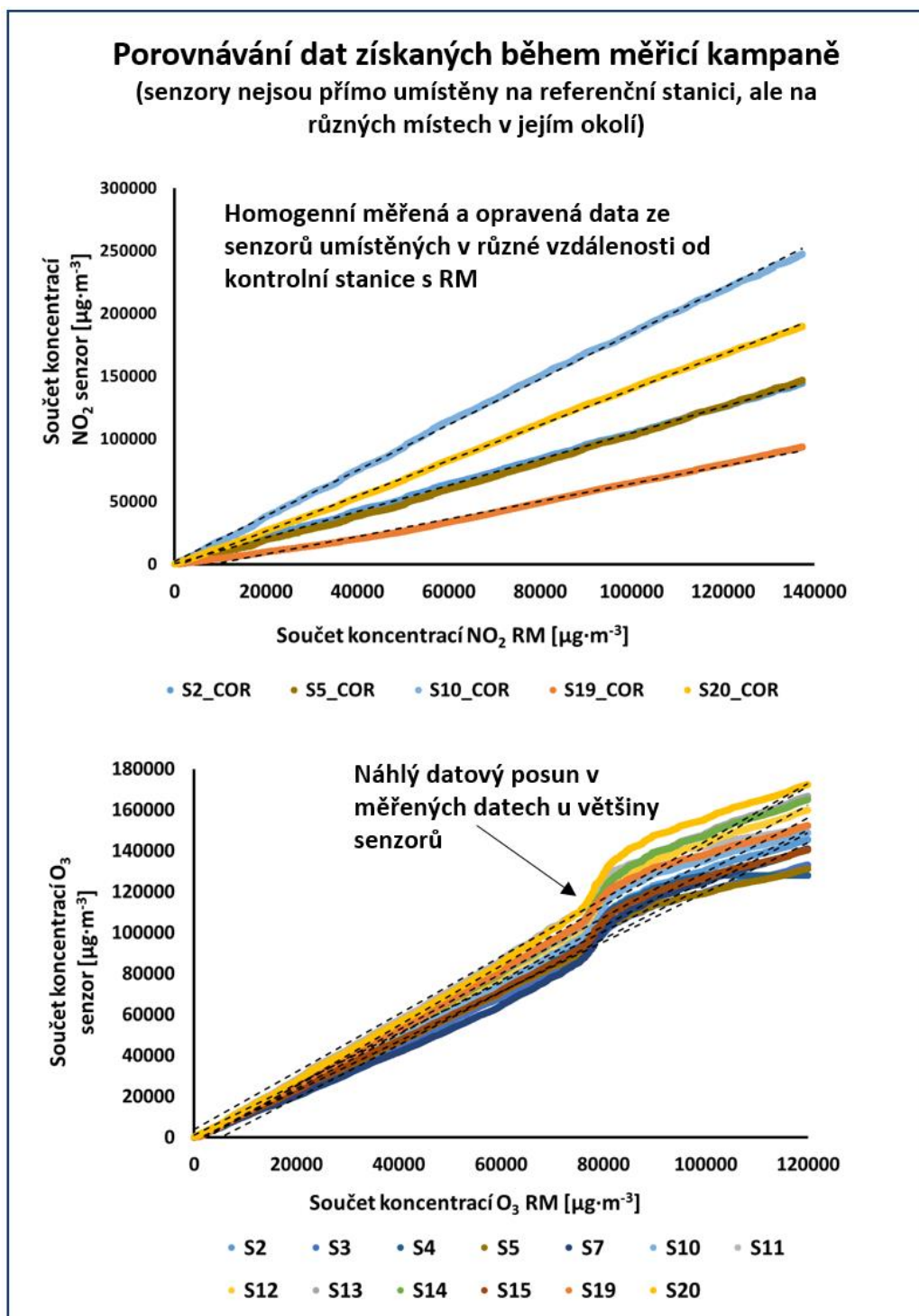
V souvislosti se senzorovými zařízeními jsou zmiňovány dva pojmy, a to **datový posun v měření senzorového zařízení** (*data drift*) a **posun měřicího konceptu senzorového zařízení** (*concept drift*). **K datovému posunu může dojít kdykoliv během měření z důvodu náhlé změny okolních podmínek**, ve kterých senzor měří, nebo vlivem stárnutí senzoru (viz kapitola 3). **Posun měřicího konceptu pak nejčastěji souvisí s pozbytím funkčnosti nastavených korekčních algoritmů**, tedy že nastavený korekční algoritmus začne po určité době vykazovat data s nevěrohodnými výsledky. **K posunu měřicího konceptu často dochází v případě, kdy jsou korekční algoritmy stanovovány pouze na malém vzorku dat** ze srovnávacího měření, a tudíž není postihnoutý dostatečný rozsah variability v datech (např. na základě dat ze srovnávacího měření trvajících pouze v řádu hodin nebo několika dnů)²⁶.

Oba typy těchto posunů v datech v průběhu měření lze celkem snadno a rychle identifikovat pomocí metody dvojně součtové čáry (*double mass curve*)^{21,27}. Metoda dvojně součtové čáry je založena na jednoduchém principu **sledování homogenity dat**. Součtová čára se opět generuje **na vztahu mezi senzorovou a referenční datovou sadou** (podobně jako u výše popsané lineární regrese). S tím rozdílem, že do **lineární regrese vstupují kumulativní součty (postupné součty) hodnot naměřených koncentrací senzorem (proměnná y zobrazená na ose y) a kumulativní součty hodnot koncentrací z referenčního měření (proměnná x na ose x)**. Za homogenní data se považují data, která jsou v těsném vztahu a dvojná součtová čára aproximuje přímku (liniové proložení vztahu). **Za nehomogenitu v datech se považuje jakákoliv odchylka od přímky či nerovnost v proložení datové sady**²⁸. Jako odchylka v datech se projeví přesun zařízení na jinou lokalitu, dočasný výpadek dat či jakákoliv změna v chování zařízení nebo změna v okolí, která ovlivní průběh měření senzoru. Výhodou této metody je, že ji lze použít pro ověření výskytu datových posunů i za předpokladu, že senzor již není přímo umístěn na stejném místě jako reference, ale je umístěn někde jinde v širším dosahu reference (v rámci senzorové sítě s referenčním měřením v okolí cca do vzdálenosti 3 km)²¹.

Příklady využití dvojně součtové čáry pro kontrolu datových posunů v měření senzorů jsou uvedeny na **Obr. 24 a 25**.



Obr. 24. Příklad využití dvojně součtové čáry pro kontrolu datových posunů během srovnávacího měření senzorů (součet koncentrací na ose y) s referenční metodou měření (součet koncentrací na ose x) na jedné kontrolní lokalitě. Na měřených datech (před korekcí) jsou patrné rozdílné směrnice/sklony datových křivek způsobené individuálními odchylkami senzorů. Odklony od přímky pak značí buďto přesun senzoru na jinou lokalitu, nebo výpadek v datech. Opravená data pak již mají podobný sklon křivek, nicméně stále jsou patrné nehomogenity, které platily i v neopravených datech. Zdroj ČHMÚ.



Obr. 25. Příklad využití dvojné součtové čáry pro kontrolu datových posunů během cílové měřicí kampaně (tj. senzory nejsou umístěny na stejném místě, ale v různé vzdálenosti v okolí stanice s referenčním měřením). Rozdílná směrnice/sklon přímek je způsobena rozdílností podmínek lokalit, kde jsou senzory instalovány. V prvním případě je ukázka homogenních dat z měření koncentrací NO₂. V druhém případě je ukázka náhlého datového posunu u všech senzorů v případě měření O₃ (posun nebyl způsoben změnou lokality, pravděpodobně se jednalo o posun způsobený opotřebením po více jak 380 dnech měření v terénu). Zdroj ČHMÚ.

8. Nejčastější způsoby interpretace senzorových dat, doporučení vhodných postupů

Způsob interpretace dat o kvalitě ovzduší získaných ze senzorových měření veřejnosti je **zásadním bodem celého procesu**, který je mnohdy podceňován a nedostatečně komunikován. S ohledem na chybovost senzorové technologie a nestálost měření v čase a místě je velmi důležité při interpretaci v **první úrovni jasně zohledňovat a otevřeně komunikovat, že se jedná o orientační údaje. Dále pak je nutné při každé interpretaci uvádět, zda se jedná o operativní/nezpracovaná data nebo zpracovaná/korigovaná data**, která podchycují individuální odchylky senzoru i chyby v průběhu měření. A to zejména v případech, kdy mají být data uvolňována veřejnosti v reálném čase (nebo pouze s velmi malým zpožděním).

Dostatečná obezřetnost při používání dat ze senzorových měření pro informování veřejnosti je naprosto stěžejní z důvodu **předcházení vzniku a šíření velmi nepřesných, v horším případě nepravdivých nebo falešně alarmujících informací o stavu prostředí.**

Při každé interpretaci dat je tedy doporučeno uvádět postupy, které byly aplikovány během samotného měření i datové správy. Pokud nebyl dodržen postup pravidelné kontroly a verifikace dat, nelze při interpretaci vztahovat výsledky daného měření k výsledkům ostatních měření (jiné projekty nebo výstupy měření státní sítě imisního monitoringu) nebo k legislativou stanoveným imisním limitům.

Důležitá poznámka 1: Na základě interpretace senzorových dat (jakoukoliv z níže zmíněných forem) **nelze zavádět varovné regulační systémy a řídit nebo omezovat volný pohyb obyvatel** (omezení venkovního pobytu, omezení dopravních komunikací) **či jakoukoliv podnikatelskou nebo výrobní činnost** výrobních subjektů (omezení průmyslových provozů). Zmíněná omezení může vydávat pouze pověřený orgán státní správy (ČHMÚ), který vychází z verifikovaných údajů obdržených za podmínek měření definovaných platnou legislativou.

Důležitá poznámka 2: Sensorová data mají při jakékoli prezentaci **orientační význam a nelze je používat pro hodnocení možných dopadů na lidské zdraví. Stejně omezení platí i v případě interpretací senzorových dat formou vlastních indexů kvality ovzduší.**

8.1. Prezentace naměřených koncentrací a vztahování vůči imisním limitům

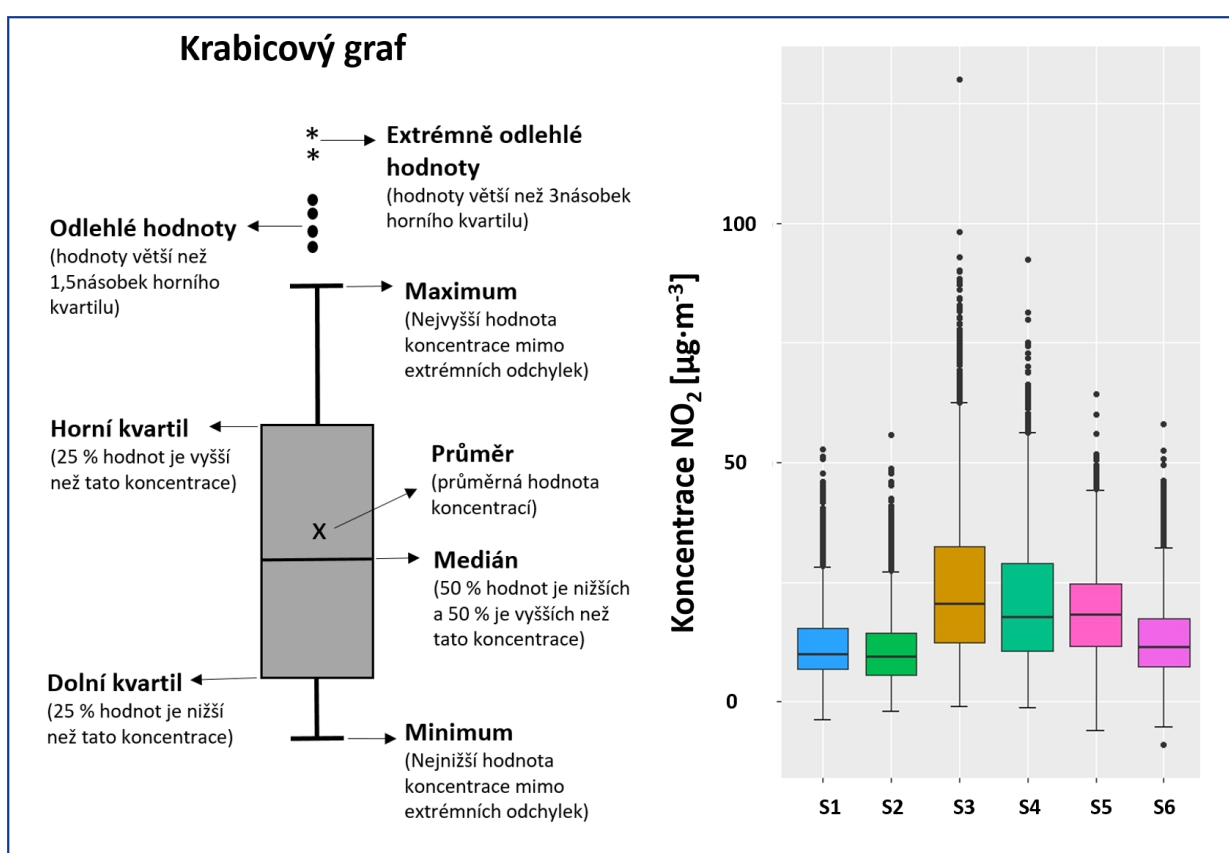
Pokud je cílem celého projektu/měřicí kampaně prezentovat koncentrace naměřené senzorovými zařízeními, je důležité, aby byly **dodrženy a společně s daty posléze i uveřejněny informace o postupech kontroly kvality dat** (včetně uvedení informace o provedení/neprovedení korekce dat).

Pokud přetrvává nedůvěra v získaná data (nedostatečná kontrola, nefunkční matematické korekce aj.), lze zvolit například cestu **hrubšího průměrování (např. prezentací 12hodinových nebo 24hodinových průměrných koncentrací aj.)**, které může pomoci částečně vyhladit rozkolísaná data. V tomto případě ovšem platí, že aritmetický průměr je silně ovlivňován případnými extrémně odchýlenými hodnotami měření (tzv. outliers). Před průměrováním je tedy doporučeno tyto extrémní odchylky zkontrolovat, případně očistit (pokud je podezření na falešně měřené údaje).

Jednou z dalších možností je, zejména pokud je například cílem měření **poukázat na rozdíly mezi vybranými lokalitami**, zvolit **prezentaci formou tzv. krabicových grafů**. Krabicový graf (*boxplot*) je

forma grafické vizualizace naměřených koncentrací formou popisné statistiky (zobrazení hranic prvního a třetího kvartilu a mediánu koncentrací) včetně možnosti vizualizace celého rozsahu měřených koncentrací i odlehlých hodnot. Vysvětlení parametrů krabicového grafu a příklad využití při sensorovém měření je uveden na **Obr. 26**.

S ohledem na nejistoty nízkonákladových senzorů **nelze porovnávat tato měření s imisními limity** stanovenými platnou legislativou (zákon č. 201/2012, Sb. a vyhláška č. 330/2012, Sb., v aktuálním znění) nebo jinými mezinárodními organizacemi (např. doporučeními Světové zdravotnické organizace²⁹). **Imisní limity** platné pro jednotlivé znečišťující látky v ČR, včetně jejich definice, jsou uvedeny na webu ČHMÚ³⁰ a jejich dosažení/překročení může být relevantně vyhodnocováno pouze na základě dat získaných z referenčních či ekvivalentních metod měření.



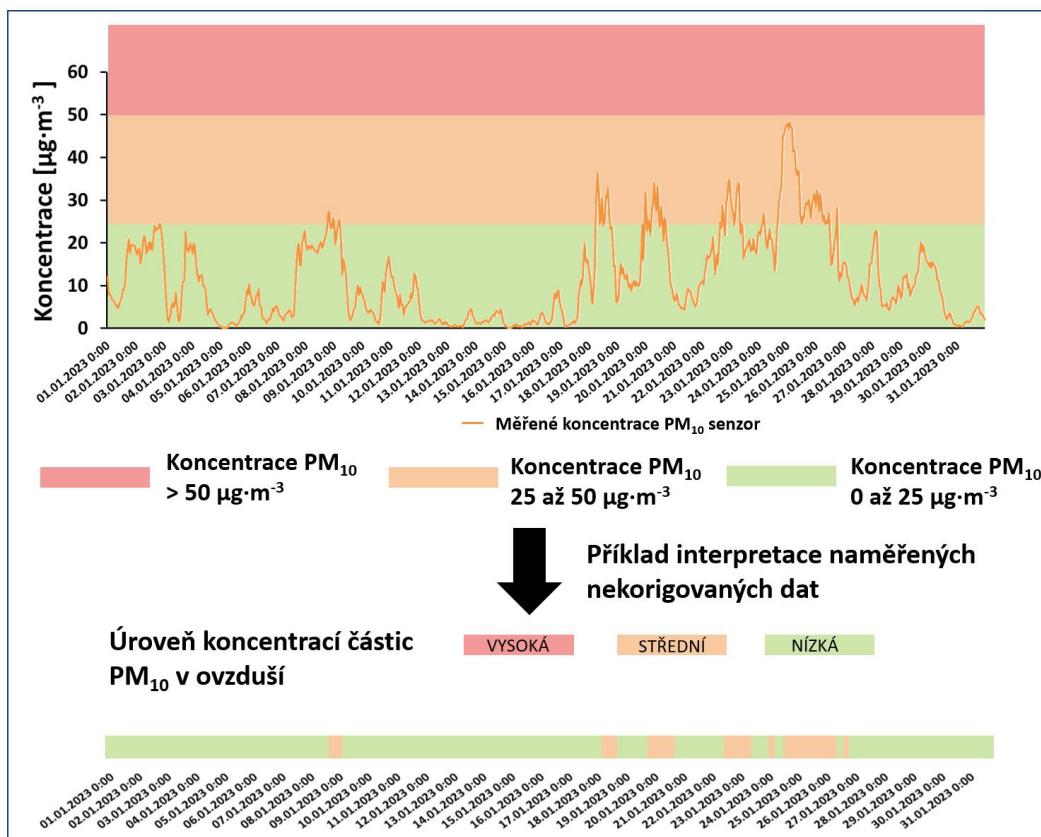
Obr. 26. Vysvětlení parametrů krabicového grafu a příklad využití při sensorovém měření. S1–S6 značí senzory měřící na různých lokalitách. Nejvyšší koncentrace co do rozsahu i mediánu byly naměřeny senzorem S3. Zdroj ČHMÚ.

8.2. Používání barevné škály pro stanovené rozsahy měřených koncentrací

V případě, že pracujeme s daty s velkou nepodchycenou variabilitou, je rovněž možné data prezentovat formou **barevných škál s definovanými dílčími rozsahy naměřených koncentrací a vyhnout se tak prezentaci konkrétních hodnot koncentrací**. Tímto krokem lze částečně „skrýt“ nepodchycené odchylky v měření jednotlivých senzorů, a tudíž částečně porovnat měření v dané měřicí síti vůči sobě. I v tomto případě je ovšem **vždy důležité uvést informaci, jak je daná barevná škála specifikována** (tj. jasně uvedená legenda s rozsahem koncentrací u každé barvy). Stanovení hranic těchto škál koncentrací ovšem není nijak jednoduché, a proto je doporučeno tento postup konzultovat s osobou znalou problematiky měření kvality venkovního ovzduší. Ilustrativní příklad stanovení vlastní barevné škály pro možnou interpretaci koncentrací PM₁₀ naměřených senzorem je na **Obr. 27**.

Důležitá poznámka 1: Použití barevných škál slouží pouze k interpretaci rozdílů hodnot naměřených senzory v daném čase nebo na zvolené ploše (výstupy z tzv. diferenčního měření). **Barevné škály zde nerepresentují informaci o potenciálním vlivu na lidské zdraví (nezaměňovat s indexem kvality ovzduší viz kapitola 8.3).**

Důležitá poznámka 2: V souvislosti s barevnými škálami je rovněž často používána vizualizace dat naměřených senzory v mapách. V takovém případě by mapa měla obsahovat bodová měření (s body v místech instalace senzorů) s aktuálními nebo agregovanými údaji (průměry, maxima, minima aj.). Interpolace bodově naměřených hodnot do plochy v mapě může být velmi zavádějící, pokud do analýzy není zahrnut funkční modelový nástroj, který zohledňuje výskyt budov, uličních kaňonů, reliéf terénu, proudění vzduchu a mnohé další parametry.



Obr. 27. Ilustrativní příklad použití barevných škál pro interpretaci dat ze sensorového měření kvality ovzduší. Při použití prezentace dat formou barevných škál by mělo být vždy uvedeno, jak je škála definována. Barvy použité při škálování nereprezentují informaci o potenciálních zdravotních rizicích (nesouvisí s indexem kvality ovzduší).

8.3. Index kvality ovzduší

Index kvality ovzduší (IKO) je komplexní ukazatel, který vyjadřuje **aktuální stav** znečištění ovzduší. Index je vázán na data SSIM, má primárně informativní význam a dává doporučení k omezení možných dopadů na zdraví obyvatel. V případě zvýšené zátěže má varovnou funkci, zejména pro citlivé skupiny obyvatel. Byl/je proto v jednotlivých zemích Evropy i světa zaváděn **pro interpretaci vztahu mezi operativními hodnotami znečištění ovzduší a imisními limity, případně doporučeními WHO (nebo i jinými ověřenými hodnotami) podle toho, jak je jeho hodnota vypočítávána. Často je aktuální stav venkovního ovzduší prezentován barevnou škálou.**

V České republice je pro hodnocení kvality venkovního ovzduší používán index kvality ovzduší zavedený Státním zdravotním ústavem. Jedná se o kombinovaný alfanumerický údaj o třech kategoriích (1, 2 a 3) s vždy dvěma podkategoriemi (A a B), který vyjadřuje úroveň celkového znečištění ovzduší v daném čase a místě. Podkategorie jsou zároveň opatřeny barevnou škálou (barevné odstíny od zelené = velmi dobrá kvalita ovzduší, přes oranžovou = přijatelná kvalita ovzduší, po červenou = špatná kvalita ovzduší) a doporučení jsou různá pro běžnou populaci a pro citlivé/ohrožené skupiny obyvatel (viz definovaná škála na Obr. 28). Do výpočtu IKO používaného v ČR vstupují 3hodinové klouzavé průměry

koncentrací těchto látek: suspendované částice PM₁₀, SO₂, NO₂ a v létě (období 1. 4. – 30. 9.) i O₃. Pro možnost okamžitého použití v operativě se index zpravidla vypočítává již z operativních (neverifikovaných) dat. Algoritmus výpočtu IKO používaného v ČR je uveden na stránkách ČHMÚ v rámci aktuálních informací o kvalitě ovzduší³⁰.

Důležitá poznámka 1: Nejen různé státy, ale v případě nízkonákladových senzorů mohou různí výrobci používat vlastní podoby/výpočty/interpretace indexů kvality ovzduší (viz např. index kvality ovzduší používaný v USA dle US EPA³¹). **Vzhledem k tomu, že se vždy jedná o aproximaci měřených hodnot, v případě sensorových sítí, často s neznámou kvalitou, je pro správnou interpretaci vždy nutno znát podklady o způsobu výpočtu daného indexu.** Zároveň pokud chceme výstupy ze senzorů formou indexu kvality ovzduší porovnávat s jinými studiemi/projekty, měli bychom se ujistit, že forma výpočtu a interpretace indexů je srovnatelná!

Důležitá poznámka 2: Postup výpočtu indexu používaného pro venkovní ovzduší nelze, pro zcela odlišný postup hodnocení expozice, aplikovat na kvalitu vnitřního ovzduší.

Kvalita ovzduší	Stupeň	Citlivé/ohrožené skupiny	Obecná populace
Velmi dobrá až dobrá	1A	Ideální podmínky pro pobyt venku	Ideální podmínky pro pobyt venku
	1B	Venkovní aktivity bez omezení	Venkovní aktivity bez omezení
Přijatelná	2A	Může představovat nepatrné riziko vzniku obtíží pro velmi malý počet lidí, kteří jsou mimořádně citliví na znečištění ovzduší. Není třeba měnit své obvyklé venkovní aktivity, pokud nezaznamenáte příznaky, jako je kašel a dráždění krku.	Venkovní aktivity bez omezení
	2B	Zvažte snížení nebo odložení/přesunutí namáhavých činností venku, zejména pokud se zhorší Váš zdravotní stav nebo se objeví příznaky, jako je kašel a dráždění v krku.	Není třeba měnit své obvyklé aktivity venku.
Zhoršená až špatná	3A	Omezte namáhavé činnosti zejména ve venkovním prostředí, zvláště pokud se zhorší Váš zdravotní stav nebo se objeví příznaky jako je kašel a podráždění krku. Astmatici a lidé s chronickým onemocněním mohou mít potřebu častějšího použití úlevového léku. Všichni starší lidé a děti by měli omezit fyzickou aktivitu.	Zvažte snížení nebo odložení/přesunutí namáhavé činnosti venku, pokud se objeví příznaky, jako je kašel a podráždění krku.
	3B	Zkraťte pobyt venku a vyhněte se při tom fyzické námaze. Astmatici a lidé s chronickým onemocněním mohou mít potřebu častějšího použití úlevového léku.	Omezte nebo odložte namáhavé činnosti venku, zvláště když zaznamenáte jakékoliv nepříjemné pocity a příznaky jako je dráždění v krku, pálení očí kašel apod.

Obr. 28. Tabulka indexu kvality ovzduší používaného v České republice dle doporučení Státního zdravotního ústavu ke snížení expozice znečišťujícím látkám a ochraně zdraví³¹.

9. Závěr a doporučení

Nízkonákladová zařízení pro monitoring venkovního ovzduší mohou sloužit jako vhodný doplněk stávajících monitorovacích sítí pouze za předpokladu, že jsou dodrženy vhodné postupy pro provoz těchto zařízení a pro kontrolu a verifikaci dat. Zároveň platí, že toto orientační měření může za vhodných podmínek provozování sloužit pro osvětu veřejnosti a pro vzdělávací účely v oblasti ochrany životního prostředí. V případě použití senzorů pro identifikaci nových hotspotů (lokalit se silným zatížením znečištění ovzduší) může toto měření sloužit jako indikace pro případné prověření lokality referenčním měřením a provedení podrobnějšího průzkumu. **Nadále platí, že sensorová měření nelze využívat pro vyhodnocování plnění požadavků vyplývajících z environmentální legislativy ani jako podklady pro hodnocení zdravotních dopadů nebo jiná rozhodnutí, která by zasahovala do života občanů a případně omezovala jejich práva, včetně případů, kdy by taková rozhodnutí měla za následek výrazné ekonomické náklady nebo ztráty.**

Dobrá příprava je pro úspěšnost projektu/záměru měřicí kampaně za použití nízkonákladových senzorů stěžejní (plán měření včetně vhodného umístění, volba metody ověřování a korekce dat, způsob interpretace dat). Různorodost kvality nízkonákladových zařízení, včetně rozdílnosti v postupech zpracování primárních dat a rozdílnosti v účelech měření, jsou důvody, proč není možné definovat jednotný/univerzální postup pro zavádění a provoz sensorových zařízení. Cílem každého sensorového měření by mělo být v první řadě získat povědomí o relevanci měřených dat (v porovnání s uznanými metodami měření kvality ovzduší). **Z tohoto důvodu je vždy doporučeno konzultovat zvažované záměry na zavádění nízkonákladových senzorů za účelem monitoringu kvality ovzduší v zájmové lokalitě se zástupci odborných institucí, které se dlouhodobě zabývají měřením a vyhodnocováním znečištění ovzduší v rámci Státní sítě imisního monitoringu v České republice (Úsek kvality ovzduší Českého hydrometeorologického ústavu, Oddělení hygieny ovzduší Státního zdravotního ústavu nebo Oddělení ovzduší Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě a další).**

10. Zdroje

- (1) Yatkin, S.; Gerboles, M.; Borowiak, A.; Borowiak, M. *Guidance on Low-Cost Sensors Deployment for Air Quality Monitoring Experts Based on the AirSensEUR Experience*; EUR 31274 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, **2022**.
- (2) Yatkin, S.; Gerboles, M.; Borowiak, A.; Signorini, M. *Guidance on Low-Cost Air Quality Sensor Deployment for Non-Experts Based on the AirSensEUR Experience*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, **2022**.
- (3) Clements, A.; Duvall, R.; Greene, D.; Dye, T. *Enhanced Air Sensor Guidebook*; U.S. EPA, **2022**.
- (4) *Metal-oxidové senzory UST [online]*. Dostupné z: <https://www.umweltsensortechnik.de/en/gas-sensors/mox-gas-sensors-overview.html> [citace 2024-08-27].
- (5) *Senzory Alphasense [online]*. Dostupné z: <https://www.alphasense.com/-/media/project/oneweb/oneweb/alphasense/products/product-guide/alphasense-air-quality-product-guide.pdf?la=en&revision=5afd2da9-345b-4fc7-878f-18365bff9fb8&hash=62BB3D74A71FF9C788DEE38A885BA5B9> [citace 2024-08-27].
- (6) *Elektrochemické senzory n.e.t. [online]*. Dostupné z: <https://www.nenvitech.com/products/electrochemical-cells/> [citace 2024-08-27].
- (7) *Optoelektronické nedisperzní senzory Cubic [online]*. Dostupné z: https://en.gassensor.com.cn/CO2Sensor/info_itemid_95.html [citace 2024-08-27].
- (8) *Fotoionizační detektory Ionscience [online]*. Dostupné z: <https://ionscience.com/usa/sensors-and-components/> [citace 2024-08-27].
- (9) *Optické čítače částic Alphasense obrázek [online]*. Dostupné z: <https://store.alphasense.com/opc-n3/> [citace 2024-08-27].
- (10) *Optické čítače částic Honeywell [online]*. Dostupné z: https://www.mouser.com/datasheet/2/187/HWSC_S_A0012942921_1-3073234.pdf [citace 2024-08-27].
- (11) *Optické čítače částic Sensirion [online]*. Dostupné z: <https://sensirion.com/products/catalog/SPS30> [citace 2024-08-27].
- (12) *ČSN P CEN/TS 17660-1: Kvalita ovzduší - Hodnocení výkonnosti senzorových systémů pro měření kvality ovzduší - Část 1: Plynné znečišťující látky v okolním ovzduší*; **2023**.
- (13) *Measurement trueness, precision, accuracy, bias [online]*. Dostupné z: <https://shoury01.medium.com/precision-trueness-and-accuracy-d4f391160e3b> [citace 2024-08-27].
- (14) Lu, J.; Liu, A.; Dong, F.; Gu, F.; Gama, J.; Zhang, G. Learning under Concept Drift: A Review. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* **2019**, 31 (12), 2346–2363. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2876857>.
- (15) Li, J.; Hauryliuk, A.; Malings, C.; Eilenberg, S. R.; Subramanian, R.; Presto, A. A. Characterizing the Aging of Alphasense NO₂ Sensors in Long-Term Field Deployments. *ACS Sens.* **2021**, 6 (8), 2952–2959. <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c00729>.
- (16) *AQ-SPEC laboratory [online]*. Dostupné z: <https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-12/polidori.pdf> [citace 2024-08-27].

- (17) *Envea Autonomous networks of sensor-based mini-stations [online]*. Dostupné z: https://www.envea.global/design/pdf/envea_cairnet_air-quality-networks-sensor-based-mini-stations_en.pdf [citace 2024-08-27].
- (18) *Clarity sensor stations [online]*. Dostupné z: <https://www.clarity.io/blog/us-epa-air-sensor-guidebook-series-what-is-air-quality-measurement-equipment-collocation-and-why-is-it-important> [citace 2024-08-27].
- (19) Bisignano, A.; Carotenuto, F.; Zaldei, A.; Giovannini, L. Field Calibration of a Low-Cost Sensors Network to Assess Traffic-Related Air Pollution along the Brenner Highway. *Atmospheric Environment* **2022**, 275, 119008. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119008>.
- (20) Spinelle, L.; Aleixandre, M.; Gerboles, M. Protocol of Evaluation and Calibration of Low-Cost Gas Sensors for the Monitoring of Air Pollution, **2013**. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/9916>.
- (21) Bauerová, P.; Keder, J.; Šindelářová, A.; Vlček, O.; Patiño, W.; Resler, J.; Krč, P.; Geletič, J.; Řezníček, H.; Bureš, M.; Eben, K.; Belda, M.; Radović, J.; Fuka, V.; Jareš, R.; Ezau, I. Measurement Report: TURBAN Observation Campaign Combining Street-Level Low-Cost Air Quality Sensors and Meteorological Profile Measurements in Prague. *Copernicus Publications*, **2024**. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1222>.
- (22) *Linear and polynomial regression [online]*. Dostupné z: <https://medium.com/analytics-vidhya/understanding-polynomial-regression-5ac25b970e18> [citace 2024-08-27].
- (23) *Multiple linear regression [online]*. Dostupné z: <https://medium.com/analytics-vidhya/multiple-linear-regression-an-intuitive-approach-f874f7a6a7f9> [citace 2024-08-27].
- (24) *Local regression [online]*. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Local_regression [citace 2024-08-27].
- (25) *Fiting data LOESS regression [online]*. Dostupné z: <https://www.andreaperlato.com/theorypost/fitting-a-curve-to-data-lowess-and-loess/> [citace 2024-08-27].
- (26) De Vito, S.; Esposito, E.; Castell, N.; Schneider, P.; Bartonova, A. On the Robustness of Field Calibration for Smart Air Quality Monitors. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2020**, 310, 127869. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127869>.
- (27) Blažek, Z.; Kříž, V.; Schneder, B. Využití metody dvojné součtové čáry v hydrologii a meteorologii. *Vodohospodářský časopis* **1981**, 29 (1), 100–107.
- (28) Searcy, J. K.; Hardison, C. H.; Langbein, W. B.; Survey (U.S.), G. *Double-Mass Curves; Double-mass Curves; U.S. Government Printing Office, 1960*.
- (29) *Globální pokyny WHO pro kvalitu ovzduší (2021) [online]*. Dostupné z: <https://archiv.szu.cz/tema/zivotni-prostredi/doporuceni-who> [citace 2024-10-14].
- (30) *Platné imisní limity v ČR [online]*. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/info/limity_CZ.html [citace 2024-08-27].
- (31) *Doporučení SZÚ ke snížení expozice znečišťujícími látkám a ochraně zdraví [online]*. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/d_szu.pdf [citace 2024-08-27].
- (32) *TNI 01 0115: Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM); 2009*.

- (33) Braun, P.; Hlínová, Y.; Keder, J.; Kojanová, I.; Krýsl, S.; Matoušková, L.; Modlík, M. *Příručka ochrany kvality ovzduší*, Vyd. 1.; Sdružení společností IREAS centrum; *Vodní zdroje Ekomonitor*: Praha, Chrudim, **2013**.
- (34) van Zoest, V. M.; Stein, A.; Hoek, G. Outlier Detection in Urban Air Quality Sensor Networks. *Water Air Soil Pollut* **2018**, 229 (4), 111. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3756-7>.
- (35) Gressent, A.; Malherbe, L.; Colette, A.; Rollin, H.; Scimia, R. Data Fusion for Air Quality Mapping Using Low-Cost Sensor Observations: Feasibility and Added-Value. *Environment International* **2020**, 143, 105965. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105965>.
- (36) Bauerová, P.; Šindelářová, A.; Rychlík, Š.; Novák, Z.; Keder, J. Low-Cost Air Quality Sensors: One-Year Field Comparative Measurement of Different Gas Sensors and Particle Counters with Reference Monitors at Tušimice Observatory. *Atmosphere* **2020**, 11 (5), 492. <https://doi.org/10.3390/atmos11050492>.

Příloha A1: Slovník nejčastěji používaných pojmů, včetně výkladu

Agregace dat (*data aggregation*) = způsob zpracování dat za účelem sumarizace nebo seskupení tak, aby lépe vystihovala potřebnou informaci. Zpravidla vede ke snížení počtu pozorování/měřených údajů.

Citlivost měřicího systému (*sensitivity of measuring system*) = podíl změny indikace měřicího systému a odpovídající změny hodnoty měřené veličiny¹². Jednodušeji řečeno se jedná o rozdíl mezi tím, jaká změna koncentrací sledované látky proběhla ve skutečnosti a jakou změnu zaznamenalo senzorové zařízení.

Datový posun (*data drift/sensitivity drift*) = nestabilita v odezvě na koncentrace znečišťujících látek v čase. K datovým posunům nejčastěji dochází v důsledku stárnutí senzorů nebo významné změny podmínek prostředí.

Datový šum (*data noise*) = nežádoucí náhodná složka výstupního signálu ze senzorového zařízení způsobující částečné zkreslení reálné informace.

Diferenční měření (*differential measurement*) = měření, které umožňuje hodnocení rozdílu uvnitř jednoho jinak nezávislého systému.

Doba odezvy senzoru (*response time*) = rychlost reakce senzoru ze stavu bez zatížení na skokovou změnu zatížení. Senzor, který reaguje rychle (tj. s vysokým časovým rozlišením), může být užitečný pro mobilní monitorování nebo měření velmi rychlých (v řádu sekund) změn koncentrací znečišťujících látek na stanovených místech (např. v blízkosti silnic s hustým provozem). Senzor, který reaguje pomalu (tj. s nízkým časovým rozlišením), může být vhodnější pro stacionární monitorování, kde se koncentrace znečišťujících látek často mění pozvolněji (např. minuty až desítky minut).

Ekvivalentní metoda měření (*equivalent measurement method*) = metoda měření, která má dle platné legislativy uznané testy ekvivalence s referenční metodou měření. Testy ekvivalence provádí pro danou zemi laboratoře s akreditací dle ČSN EN ISO/IEC 17025 (např. národní referenční laboratoř).

Frekvence měření/vzorkovací frekvence (*measurement frequency, sampling rate, temporal resolution*) = vyjadřuje počet měření prováděných za definovaný časový interval, typicky jako měření za sekundu (např. 10 000/s). Převrácená hodnota se označuje jako doba cyklu měření.

Homogenita dat (*data homogeneity*) = míra shody nebo naopak rozdílnosti v měření v rámci vybraného časového úseku u jednoho zařízení nebo v rámci měření více posuzovaných měřicích systémů.

Chyba měření (*measurement error*) = rozdíl mezi hodnotu naměřenou senzorem a hodnotou naměřenou kontrolním referenčním zařízením. Pojem lze dále dělit na: i) systematickou chybu měření (*systematic measurement error*) = složka chyby měření, která v opakovaných měřeních senzorů zůstává konstantní a mění se předvídatelným způsobem, a ii) náhodnou chybu měření (*random measurement error*) = složka chyby měření, která se v opakovaných měřeních mění nepředvídatelným způsobem³².

Imisní limity (*air pollution limit values*) = představují nejvyšší přípustnou úroveň znečištění definovaných látek v ovzduší (průměr či maximum) za daný časový úsek (1 h, 24 h, rok). Imisní limity byly stanoveny za účelem ochrany lidského zdraví, ale také ekosystémů a vegetace. Pro některé z imisních limitů navíc platí maximální počet překročení za časový interval a o překročení imisního limitu na daném místě hovoříme až v případě, že je hodnota daného imisního limitu překročena vícekrát, než činí maximální povolený počet překročení. Imisní limity jsou definovány platnou legislativou a jsou uvedeny na stránkách ČHMÚ.

Interference/zkřížená reaktivita senzoru (*cross sensitivity*) = podíl jakým je reakce senzoru na danou sloučeninu ovlivňována jiným faktorem (např. teplota nebo vlhkost) nebo jinou sloučeninou podobného chemického složení (podobná reakce na různé chemické sloučeniny). Podíl interference je většinou uvádějí výrobci zařízení v procentech v technické specifikaci zařízení.

Interpolace hodnot v mapách (*data interpolation in maps*) = metoda použití vektorových bodů se známými hodnotami k odhadu hodnot na neznámých místech s cílem vytvoření rastrového povrchu pokrývajícího celou oblast. Výsledkem interpolace je rastrová vrstva.

Kalibrace senzoru (*sensor calibration*) = postup, který kontroluje a upravuje nastavení senzoru tak, aby produkovaná měření byla srovnatelná s certifikovaným standardem. Kalibrace probíhá v kalibrační nebo jiné testovací laboratoři za kontrolovaných podmínek.

Koeficient determinace (*coefficient of determination*) = běžně označovaný R^2 , je v matematické statistice míra kvality regresního modelu. Hodnota tohoto koeficientu vyjadřuje, jaký podíl variability závisle proměnné (měření senzorem) model vysvětluje pomocí vysvětlující/ch proměnné/ých. Koeficient je vyjádřen číselnou hodnotou v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, po vynásobení 100 lze vyjádřit procentuální hodnotou.

Kolokace/srovnávací měření společným umístěním (*collocation nebo comparative measurement by collocation*) = proces kontroly výkonnosti senzoru instalací v těsné blízkosti zařízení používaného/ných pro referenční nebo ekvivalentní metody měření. Naměřené hodnoty se pak vzájemně porovnávají, přičemž jsou statisticky vyhodnoceny parametry výkonnosti senzoru. Na tento proces pak obvykle navazuje korekce dat.

Korekce dat (*data correction nebo statistical correction*) = úprava dat pocházejících ze senzorového měření pro zvýšení jejich přesnosti vzhledem ke známé referenční hodnotě (naměřené zařízením používaným pro referenční nebo ekvivalentní metodu měření). Korekce na rozdíl od kalibrace nezasahuje do vlastního nastavení senzoru, pouze statisticky upravuje jeho datový výstup.

Linearita dat (*data linearity*) = přímková závislost mezi dvěma testovanými proměnnými. V této souvislosti je v kalibračních laboratořích stanovována tzv. odchylka od linearity v měřených výstupech, způsoby stanovení viz norma v platném znění¹².

Metoda dvojnásobné součtové čáry (*double mass curve/double mass analysis*) = metoda pro testování homogenity dat v časových řadách používaná nejčastěji v hydrologii a meteorologii. Metoda předpokládá testování dvou chronologických datových řad y (řada měření, jehož homogenitu chceme testovat – data ze senzoru) a x (srovnávací/kontrolní řada měření – data z referenčního měření). Z chronologické posloupnosti hodnot y se vytvoří postupné (kumulativní) součty, stejně tak se následně provede postupný součet hodnot x . Výsledné kumulativní hodnoty x a y se vyobrazí pomocí lineární regrese a posuzuje se, zda průběh dat je lineární nebo se mění na křivku. V případě nehomogenních dat se objevují zlomy, které značí dobu, kdy došlo ke změně podmínek měření (přesun čidla na jinou lokalitu, výpadek měření, drift měření, aj.)²⁷.

Mez/limit detekce senzoru (*detection limit nebo limit of detection*) = měřená hodnota veličiny získaná daným postupem měření, pro kterou je pravděpodobnost chybného tvrzení o nepřítomnosti složky v materiálu β , přičemž pravděpodobnost chybného tvrzení o její přítomnosti je α ¹². V podstatě se jedná o nejnižší koncentraci, kterou je senzorové zařízení schopno běžně detekovat. Je důležité, aby byl senzor schopen detekovat i nižší koncentrace, které se v případě monitoringu imisního znečištění atmosféry vyskytují (vyhnout se senzorům, které svým limitem detekce odpovídají spíše měření emisí).

Nejistota měření (*measurement uncertainty*) = nezáporný parametr, který souvisí s výsledkem měření a charakterizuje rozsah/rozptyl hodnot veličiny, které je možné racionálně přiřadit k měřené veličině.

Nejistota měření mezi senzorovými systémy/mezipřístrojová nejistota (*measurement uncertainty between sensor systems*) = vyjadřuje číselně míru nejistoty mezi naměřenými hodnotami různých senzorových zařízení testovaných ve stejném čase na stejném místě (vyjádřená v jednotkách, v jakých je měřena daná znečišťující látka). Výpočet je definován v ČSN P CEN/TS 17660-1¹².

Nízkonákladové senzory (*low-cost sensors, LCSs*) = čidla pro měření znečišťujících látek v ovzduší s nízkou pořizovací cenou. V souvislosti se senzorovými systémy uváděny také někdy jako primární senzorová čidla. Mnohdy nemusí být autonomní jednotkou a pro použití ve venkovním prostředí je zapotřebí zapojení do senzorového systému.

Odlehlé hodnoty/extremní odlehlé hodnoty (*data outliers/extreme outliers*) = hodnoty měření, které se výrazně vymykají většině ostatních měření. Odlehlých hodnot bývá menší procentuální podíl v datovém souboru (jednotky procent až 25 % maximálně). Pokud je takovýchto hodnot větší zastoupení, pravděpodobně se již jedná o vadný senzorový systém/chybové zařízení.

Podmínky provozu (*operating conditions*) = podmínky provozu zařízení definované jeho výrobcem. Tj. např. rozsah teplot, vlhkosti a atmosférického tlaku, ve kterých je zařízení schopno fungovat dle dané technické specifikace výrobce (vč. možnosti vystavení vodě, vodním kapkám aj.).

Posun konceptu dat/drift konceptu dat (*concept drift*) = datový posun, který znehodnocuje použitý datový model (matematický model). Tento pojem souvisí zejména s prediktivní analytikou, datovou analytikou, strojovým učením a jinými souvisejícími disciplínami, které jsou využívány zejména při zpracovávání senzorových dat a hledání funkčních korekčních algoritmů. K driftu konceptu dochází nejčastěji tehdy, když se statistické vlastnosti cílové proměnné, kterou se model snaží predikovat, mění v průběhu času nepředvídatelným způsobem. To způsobuje problémy, protože předpovědi se postupem času stávají méně přesné.

Pravdivost měření senzoru (*measurement trueness*) = těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných hodnot naměřených senzorem/senzory a hodnotou naměřenou referenčním měřením³².

Preciznost měření senzoru (*measurement precision*) = těsnost shody mezi hodnotami naměřenými opakovaným měřením senzorem za stejných nebo obdobných podmínek³².

Provozní doba životnosti senzoru (*operational lifetime*) = průměrná doba funkční provozní životnosti senzoru uváděná výrobcem.

Průsečík regresní přímky (*intercept*) = označen nejčastěji b nebo b_0 , je hodnota y v bodě, kde regresní přímka protíná osu y . Zpravidla označuje posun, se kterým senzor měří v nízkých koncentracích.

Přesnost měření senzoru (*measurement accuracy*) = těsnost shody mezi hodnotou naměřenou senzorem a skutečnou hodnotou naměřenou referenčním měřením³².

Referenční metoda měření/referenční monitoring (*reference measurement method/reference monitoring*) = metoda měření, která je v rámci platné legislativy uznaná pro monitoring kvality ovzduší (viz Zákon č. 201/2012 Sb., Vyhláška č. 330/2012, v platném znění, Směrnice 2024/2881/EC a v nich odkazované normy s referenčními metodami).

Regresní analýza (*regression analysis*) = je označení statistických metod, pomocí nichž odhadujeme hodnotu jisté náhodné veličiny (takzvané závisle proměnné, nazývané též cílová proměnná anebo vysvětlovaná proměnná) na základě znalosti jiných veličin (nezávisle proměnných anebo vysvětlujících proměnných). Podle charakteristiky studovaných dat je zvolen konkrétní typ regresní analýzy (lineární, mnohorozměrná, polynomická, logistická, aj.).

Rozlišení senzoru (*resolution*) = Rozlišení označuje nejmenší změnu hodnoty, kterou může přístroj detekovat nebo zobrazit.

Rozsah měření senzoru (*measurement range*) = označuje nejnižší a nejvyšší koncentrace znečišťujících látek, které může zařízení měřit. Je důležité, aby byl senzor schopen měřit jak velmi nízké, tak velmi vysoké koncentrace, které se mohou ve venkovním ovzduší vyskytovat.

Selektivita měřicího systému (*selectivity of measuring system*) = míra schopnosti měřicího systému reagovat nezávisle na jednotlivé chemické sloučeniny. Opakem dobré selektivity měřicího systému je interference nebo zkřížená reaktivita systému, kdy zařízení reaguje zároveň na různé typy chemicky podobných sloučenin.

Senzorové systémy/stanice (*sensor systems/stations*) = Kombinovaná zařízení obsahující zpravidla více senzorů pro různé znečišťující látky uzpůsobené pro venkovní instalaci včetně vlastního řešení elektrického napájení a datového zpracování.

Skladovací podmínky (*storage conditions*) = definice podmínek prostředí, ve kterých má být zařízení skladováno tak, aby nebyla ovlivněna kvalita měření zařízení při jeho následném použití.

Směrnice/sklon regresní přímky (*slope*) = označen nejčastěji jako b_1 , je číselně vyjádřený poměr mezi vertikální změnou a horizontální změnou podél regresní přímky.

Smogový varovný a regulační systém (*smog alert and regulation system*) = varovný systém provozovaný ČHMÚ dle zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, a vyhlášky č. 330/2012 Sb. v platném znění. Systém slouží k upozornění na mimořádně znečištěné ovzduší (smogovou situaci) a také k regulaci (omezení) vypouštění znečišťujících látek z vybraných zdrojů významně ovlivňujících kvalitu ovzduší daného území. Mezi sledované látky patří suspendované částice PM_{10} , oxid siřičitý SO_2 , oxid dusičitý NO_2 a přízemní (troposférický) ozon O_3 . Pravidla pro vyhlášení a regulaci jsou shrnuta na stránkách ČHMÚ.

Státní síť imisního monitoringu (*SSIM; national network of air quality*) = státní síť měření kvality ovzduší provozovaná ČHMÚ dle platné legislativy. Data ze SSIM jsou používána pro hodnocení kvality ovzduší, hodnocení zdravotních dopadů, tvorbu závazných stanovisek a pro provoz smogového a varovného regulačního systému.

Úplnost dat (*data completeness*) = metrika udávající jaká část potenciálních dat z měření je platná nebo je zachycena v konečné databázi. Hodnota je většinou udávána v procentech a mohou být stanoveny určité meze přijatelnosti z ohledem na úplnost dat (např. pokud je v databázi méně jak 50 % platných hodnot, může být považována za nevěrohodnou).

Validace dat (*data validation*) = prokázání platnosti/vhodnosti dat pro daný účel (např. porovnáním výstupů senzorových měření s očekávanou skutečností). Ověření datových výstupů tak, aby specifikované požadavky byly přiměřené pro zamýšlené použití dat³².

Verifikace dat (*data verification*) = potvrzení získané objektivními důkazy, že specifikované požadavky jsou splněny. Ověření, potvrzení pravosti, kontrola, důkaz pravosti, přezkoumání.

Vychýlení/odchylka měření (*measurement bias*) = hodnota odhadu systematické chyby měření senzoru³².

Příloha A2: Minimální specifikace senzorů vhodných pro monitoring venkovního ovzduší

Při uvažování o využití nízkonákladových senzorů pro lokální monitoring venkovního ovzduší je doporučeno, aby byla splněna následující minimální specifikace pro jednotlivé typy zařízení:

- Sensory vhodné pro monitoring venkovního ovzduší (kontrola výrobcem definovaných provozních podmínek pro zařízení)
- Se zárukou životnosti senzoru alespoň 12 měsíců
- Systém umožňující kontinuální záznam a ukládání naměřených dat (vč. možnosti přenosu na zpracovatelskou/správcovskou platformu)
- Pokud byla ověřována kvalita měření daného zařízení (dle výrobního čísla zařízení), zjistit, za jakých podmínek a s jakým výsledkem
- Technické parametry pro měření koncentrace PM₁₀ a PM_{2,5}:
 - koncentrační rozsah (*measurement range*) 0 až alespoň 500 µg·m⁻³
 - mez detekce (*limit of detection*) maximálně 5 µg·m⁻³
 - nejistota měření (*measurement uncertainty*) maximálně 35 %
- Parametry pro měření koncentrace NO₂:
 - koncentrační rozsah 0 až alespoň 250 ppb
 - mez detekce maximálně 20 ppb
 - nejistota měření (*measurement uncertainty*) maximálně 35 %
- Parametry pro měření koncentrace O₃:
 - koncentrační rozsah 0 až alespoň 250 ppb
 - mez detekce maximálně 20 ppb
 - nejistota měření (*measurement uncertainty*) maximálně 35 %
- Parametry pro měření CO:
 - koncentrační rozsah (*measurement range*) 0 až alespoň 20 ppm (20.000 ppb)
 - mez detekce maximálně 0.05 ppm (50 ppb)
 - nejistota měření maximálně 35 %
- Doplňkové meteorologické prvky – teplota a relativní vlhkost vzduchu:
 - rozsah měření teploty -20 °C až +50 °C
 - rozlišení měření teploty maximálně 1 °C
 - rozsah měření relativní vlhkosti vzduchu 0 % až 100 %
 - rozlišení měření relativní vlhkosti vzduchu maximálně 10 %
- Doplňkové meteorologické prvky – atmosférický tlak, rychlost a směr větru:
 - rozsah měření atmosférického tlaku 950 hPa až 1050 hPa
 - rozlišení měření atmosférického tlaku maximálně 10 hPa
 - rozlišení měření směru větru maximálně 45 stupňů (tzn. 8 směrů větru nebo podrobnější)
 - rozlišení měření rychlosti větru maximálně 1 m/s

Doporučení na minimální specifikaci senzorových zařízení nezahrnují: senzory pro monitoring CO₂ (použitelné především pro monitoring vnitřního prostředí), senzory pro monitoring SO₂ (dává smysl spíše v případě monitoringu emisí z průmyslových či jiných technických provozů) a dále specifické senzory pro monitoring směsi VOC, H₂S, CH₄S, NH₃ a jiných sloučenin, pro které nejsou dostupné online analyzátory nebo nejsou monitorovány v rámci státní sítě imisního monitoringu v ČR (tj. v síti nejsou pro tyto znečišťující látky dostupné analyzátory, které by splňovaly podmínky referenčních nebo ekvivalentních metod monitoringu, vůči kterým by se dala tato měření efektivně kontrolovat³³).

Příloha A3: Příprava senzorových dat pro zpracování, výpočet parametrů lineární regrese a reziduální chyby

A3.1 Sjednocení času měření a průměrování

V první řadě je vždy podstatné **sjednotit data ze senzorů a kontrolního zařízení** co do doby vzorkování, intervalu průměrování a časové známky (včetně kontroly používaného časového pásma). Typickým výstupem přístrojů používaných pro referenční měření jsou hodinové průměrné koncentrace. Pokud senzory generují data s intervalem např. 1 minuta nebo 10 minut, je tedy zapotřebí **v rámci přípravy dat vypočítat 1hod. průměry**. V této souvislosti je rovněž důležité se u obou datových zdrojů informovat, zda po zprůměrování dat odpovídá přidělená **časová známka začátku nebo konci intervalu průměrování** (např. pokud začátku průměrování je přidělena při 1hod. průměru vypočítaném z měření probíhajícího od 12:00 do 12:59 časová známka 12:00, konci měření by pak pro stejné průměrovací období byla přidělena časová známka 13:00). V neposlední řadě je důležité zkontrolovat **návaznost porovnávaných časových řad**. Např. pokud senzorové měření obsahuje výpadky v časové řadě (způsobené např. výpadky v měření či poruchami), je zapotřebí tuto řadu zkompletovat, případně doplnit chybějícími hodnotami (často označováno jako NA podle „not available“).

Důležité poznámka: Během instalace senzorů je nezbytné dbát na sjednocení nastavení času porovnávaných zařízení, včetně zaznamenání informace o nastavení časového pásma (koordinovaný světový čas UTC, středoevropský letní čas SELČ aj.). Nesprávné nastavení času může vést ke zcela zkresleným závěrům při porovnávání výstupů měření.

A3.2 Očištění dat od chyb před průměrováním

Před samotným průměrováním naměřených hodnot senzory je rovněž důležité **data prohlédnout a očistit od případných chybných údajů**. Za chybné údaje lze považovat naměřené záporné či nulové hodnoty. Všechny tyto hodnoty by měly být před průměrováním odmazány a označeny jako neplatné/chybějící (zpravidla NA). Podobně by měla být ošetřena i případná chybějící data (výpadky měření). Dále je pak vhodné nastavit si určité **kritérium pro úplnost dat** (*data completeness*; tj. minimální počet platných hodnot ve vybraném intervalu), aby následně vypočítaný průměr byl platný a dostatečně reprezentativní. V souvislosti se senzorovými měřeními se často používá prahová hodnota 75 %, tedy pokud je v dané hodině méně než 75 % platných naměřených hodnot koncentrací, je daný hodinový průměr označený jako neplatný (NA).

Součástí procesu očišťování dat je rovněž identifikace a případné odmazání naměřených extrémně odlehklých hodnot (tzv. outlierů). Procesu automatické identifikace extrémně odchýlených hodnot v případě senzorového měření je věnována nejedna odborná publikace³⁴⁻³⁶ a neexistuje pro něj jednotné doporučení. Nicméně vždy je doporučeno provést manuální posouzení, a to nejprve vizualizací naměřených hodnot v čase a následně identifikací hodnot koncentrací, které jsou významně odlišné od ostatních datových hodnot (tj. identifikovat maxima a minima měřených koncentrací). To, zda je daný

extrémně odlehlý údaj relevantní, či ne (vzhledem k okolnostem probíhajícím v lokalitě), závisí na odborném posouzení správce dat a technika zodpovědného za měření A3.3 Kontrola a sjednocení měřících jednotek

Před vzájemným porovnáváním dat je důležité **zkontrolovat nastavení jednotek měření**, případně **provést nezbytné převody**. V případě senzorů kvality ovzduší se nejčastěji používají jednotky v ppb (*parts per billion*), ppm (*parts per million*) nebo $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (mikrogram na metr krychlový), vzácněji pak $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (miligram na metr krychlový; např. u oxidu uhelnatého). Jelikož v České republice se ve státní síti imisního monitoringu používají $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, může být zapotřebí provést převod jednotek za použití definovaných převodních koeficientů pro jednotlivé znečišťující látky (viz **Tab. A3.1**).

Tab. A3.1. Převodní faktory používané pro jednotlivé znečišťující látky (EC = podmínky pro reportování kvality ovzduší dle Evropské komise; WHO = podmínky pro reportování kvality ovzduší dle Světové zdravotnické organizace). V tabulce nejsou uvedeny převodní koeficienty pro koncentrace aerosolových částic (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$), protože jsou výhradně měřeny v $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

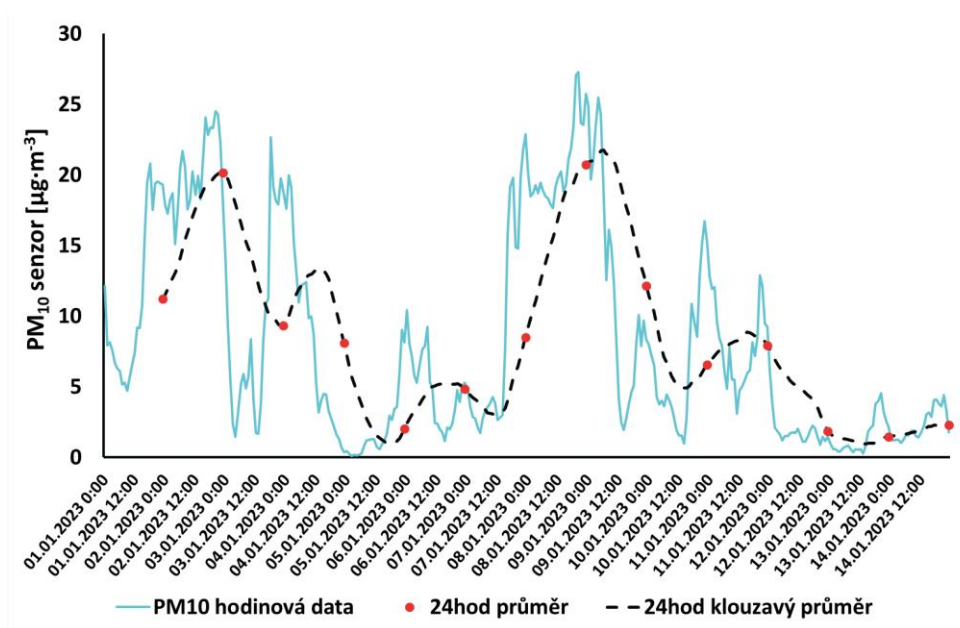
Znečišťující látka	Převodní faktory	
	EC (20 °C, 1013 mb)	WHO (25 °C, 1013 mb)
O₃ (troposférický ozon)	1 ppb = 1,9957 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1 ppb = 1,96 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
NO₂ (oxid dusičitý)	1 ppb = 1,9125 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1 ppb = 1,88 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
NO (oxid dusný)	1 ppb = 1,248 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1 ppb = 1,25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
SO₂ (oxid siřičitý)	1 ppb = 2,6609 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1 ppb = 2,62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
CO (oxid uhelnatý)	1 ppm = 1,1642 mg (1 ppm = 1164 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 ppm = 1,15 mg

A3.4 Metody průměrování

Průměrování je nejběžnější formou agregace dat tak, aby data mohla být lépe analyzována (např. hodinové, denní, měsíční či roční trendy koncentrací) a orientačně porovnávána s vybranými prahovými hodnotami či škálami. Pro průměrování dat o kvalitě ovzduší jsou nejčastěji používány dvě metody:

- **Aritmetický průměr** po částech (blokový průměr; *block average*) – průměr hodnot za zvolený časový interval (10 minut, 1 hodina, 24 hodin aj.), kdy výsledkem je jedna průměrná hodnota za zvolený časový interval. Tato metoda pomáhá zredukovat počet naměřených hodnot.
- **Klouzavý průměr** (*moving average*) – posouvající se průměr za sebou jdoucích hodnot koncentrací ve zvoleném časovém intervalu. Nejčastěji se používá k získání celkové představy o trendech v souboru dat a k „vyhlazení“ rychlých změn v datech. Pro posuzování kvality ovzduší s ohledem na imisní limity jsou obvykle počítány 24hodinové klouzavé průměry pro $\text{PM}_{2.5}$ a PM_{10} nebo 8hodinové klouzavé průměry pro O_3 .

Vizualizace dat v podobě hodinových dat, 24hod. průměrů a 24hod. klouzavých průměrů je na **Obr. A3.1**.



Obr. A3.1. Ukázka agregace dat formou průměrování. Původní 1hod. data, 24hod. průměrné koncentrace a trend koncentrací stanovený formou 24hodinových klouzavých průměrů.

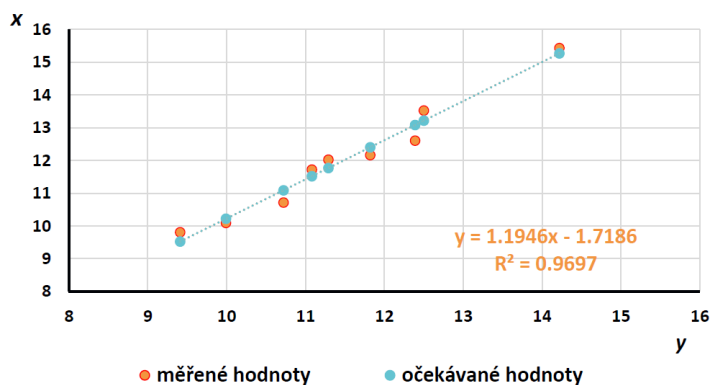
A3.5 Příklad výpočtu parametrů lineární regrese, koeficientu determinace, parametrů chyby měření

Výpočet parametrů lineární regrese je základním nástrojem sloužícím k vyhodnocení kvality měření senzoru vzájemným porovnáním s referenčním měřením. Na **Obr. A3.2** a **Obr. A3.3** je uveden příklad výpočtu jednotlivých parametrů lineární regrese včetně koeficientu determinace a směrodatné chyby regresního modelu na zkrácené datové sadě. Na stejné datové sadě je dále na **Obr. A3.4** uveden příklad výpočtu různých podob chyb měření.

RM	Senzor	Výpočet parametrů regresní rovnice				Výpočet koef. determinace				Výpočet směr. chyby odhadu
		$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(x - \bar{x}) * (y - \bar{y})$	$(y - \bar{y})^2$	$\hat{y} = b_0 + b_1 * x$	$\hat{y} - \bar{y}$	$(\hat{y} - \bar{y})^2$	
12.5	13.52	1.0	1.5	1.02	1.53	2.29	13.21	1.21	1.45	0.10
14.22	15.43	2.7	3.4	7.45	9.34	11.72	15.27	3.26	10.63	0.03
11.29	12.02	-2.0	0.0	0.04	0.00	0.00	11.77	-0.24	0.06	0.06
9.41	9.81	-2.1	-2.2	4.33	4.58	4.85	9.52	-2.49	6.18	0.08
9.99	10.09	-1.5	-1.9	2.25	2.88	3.67	10.22	-1.79	3.22	0.02
10.72	10.71	-0.8	-1.3	0.59	1.00	1.68	11.09	-0.92	0.85	0.14
11.08	11.72	-0.4	-0.3	0.17	0.12	0.08	11.52	-0.49	0.24	0.04
12.39	12.61	0.9	0.6	0.81	0.54	0.36	13.08	1.07	1.15	0.23
11.82	12.16	0.3	0.2	0.11	0.05	0.02	12.40	0.39	0.15	0.06
průměr (\bar{x}, \bar{y})	11.5 12.0	suma		16.77	20.03	24.68		0.00	23.93	0.75

Rovnice regres. přímky	$\hat{y} = b_0 + b_1 * x$	směrnice/sklon	$b_1 = 1.195$
Výpočet směrnice regres. přímky	$b_1 = \frac{(x - \bar{x}) * (y - \bar{y})}{(x - \bar{x})^2}$	průsečík	$b_0 = -1.719$
Výpočet průsečíku regres. přímky	$b_0 = \bar{y} - b_1 * \bar{x}$	koef. determinace	$R^2 = 0.970$
Výpočet koef. determinace	$R^2 = \frac{\sum(\hat{y} - \bar{y})}{\sum(y - \bar{y})}$	očekávané hodnoty	\hat{y}
Výpočet směrodatné (střední) chyby odhadu	$SSE = \sqrt{\frac{\sum(\hat{y} - y)^2}{n - 2}}$	měřené hodnoty	y
		směr. chyba odhadu	$SSE = 0.33$

Obr. A3.2. Příklad výpočtu parametrů regresního modelu, koeficientu determinace a směrodatné chyby regresního modelu.



Obr. A3.3. Vizualizace regresní analýzy a jejích výsledných parametrů.

Výpočet směrodatné (střední) chyby měření	$MBE = \frac{\sum(y - \hat{y})}{n}$			
Výpočet střední absolutní chyby měření	$MAE = \frac{\sum y - \hat{y} }{n}$			
Výpočet střední kvadratické chyby měření	$MSE = \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{n}$			
Výpočet odmocniny střední kvadratické chyby	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{n}}$			

Senzor		Chyba		
Měřená hodnota	Očekávaná hodnota	MBE	MAE	MSE
y	\hat{y}	$y - \hat{y}$	$ y - \hat{y} $	$(y - \hat{y})^2$
13.52	13.21	0.31	0.31	0.10
15.43	15.27	0.16	0.16	0.03
12.02	11.77	0.25	0.25	0.06
9.81	9.52	0.28	0.28	0.08
10.09	10.22	-0.12	0.12	0.02
10.71	11.09	-0.37	0.37	0.14
11.72	11.52	0.20	0.20	0.04
12.61	13.08	-0.48	0.48	0.23
12.16	12.40	-0.24	0.24	0.06
<i>suma</i>		0.00	2.43	0.75
$n = 9$		MBE = 0.00	MAE = 0.27	MSE = 0.08
		RMSE = 0.28		

Obr. A3.4. Příklad výpočtů různých podob chyby měření.